

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ



**ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

АВИАМАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ СИБИРИ

**Сборник статей
XIV Международной научно-технической конференции**

(г. Иркутск, 21–26 сентября 2020 г.)



**ИЗДАТЕЛЬСТВО
Иркутского национального исследовательского
технического университета
2020**



УДК 629+656 (082)
ББК 39Я45

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом ИРНИТУ

Авиамашиностроение и транспорт Сибири : сб. статей XIV Междунар. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 21–26 сентября 2020 г.). – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2020. – 202 с.

Представлены статьи, посвященные актуальным вопросам развития авиамашиностроительных технологий и транспортного комплекса. Приводятся обобщения результатов научных исследований, обмена практическим опытом в интересах развития перспективных конструкций и технологий авиа- и машиностроения, повышения качества транспортного обслуживания.

Редакционная коллегия:

Бобарика И.О. (отв. ред.) – канд. техн. наук, доцент

Фалеев С.Ю. – (верстка).

Материалы публикуются в авторской редакции.

Авторы опубликованных статей и тезисов несут ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, экономико-статистических данных и прочих сведений.

ISBN 978-5-8038-1479-5
ISBN 978-5-8038-1541-9

© ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИОННАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ..... 5

Метод диагностирования авиационных систем по допустимому уровню вероятности безотказной работы Н.И. Сидняев, Ю.И. Бутенко, Е.Е. Болотова 5

Оценка уточненной расчетной долговечности подшипников качения по методике SKF П.М. Гришкевич, В.И. Умнов..... 15

Анализ системы управления обеспечением авиационной техники запасными частями А.Б. Белхореев, Е.В. Федоров, А.В. Климович..... 21

Инженерное управление проектированием бортовой кабельной сети летательных аппаратов А.Ю. Мясников..... 31

Инженерное управление функциональным состоянием бортовых систем передачи информации Ю.В. Мясникова..... 38

Система Femap with NX Nastran как инструмент для оценки достоверности результатов численного эксперимента в среде программы APM FEM в КОМПАС-3D С. П. Марков, В.Б. Распопина 45

Качественная оценка напряжённого состояния детали авиационного узла с помощью системы APM FEM в КОМПАС-3D Л. И. Шеметов, А. О. Гаврилова, Д. А. Фролов..... 52

Совершенствование теории и практики ИПИ-технологии технического обслуживания бортового комплекса оборудования воздушных судов А.Н. Коптев..... 60

Выбор ВМГ на основе стендовых испытаний А.С. Груздев, А.П. Коваль 67

Применение численного моделирования аэродинамики при модернизации БПЛА Е.Б. Азеништейн, А.С.Груздев, А.П. Коваль 71

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА: ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ..... 78

Формообразование стальных заготовок методом аддитивной наплавки сварочной проволокой А.А. Куликов, Ю.В. Небышинец, А.В. Сидорова, А.Е. Балановский..... 78

Влияние технологической наследственности на выбор методов удаления заусенцев с малогабаритных деталей СВЧ-электроники Ю.И. Карлина, Д.А. Журавлёв, Т.А. Опарина..... 99

Моделирование формирования основных параметров качества поверхностного слоя при дробеударном упрочнении деталей Ле Чи Винь, В.П.Кольцов, Нгуен Минь Хоанг 104

*Проект автономной технологической платформы с шагающим механизмом перемещения. В.Н. Москвитин, С.Н. Дрожжин, П.Г. Шубин*113

Профилирование лепестковых кругов для зачистки обводообразующих деталей Кольцов В.П., Ле Чи Винь, Ракицкая В.Б., Орлов Д.А......118

Моделирование упругих, прочностных и теплофизических характеристик моно- и поликристалла алюминия Al И.Х. Бадамин.....122

Автоматизация процесса смены инструмента и анализ точности позиционирования робота KUKA KR210 R2700 extra С.Ю. Фалеев, А.С. Беломестных.....130

МЕХАНИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН137

Определение геометрических характеристик участков трения в контакте колеса шасси с твердой опорой Е.В. Балакина, Д.С. Сарбаев, И.В. Сергиенко137

Система обоснования свойств надежности и живучести уникальных механических систем А.Ф. Берман¹, О.А. Николайчук¹, А.Ю. Юрин^{1,2}.....143

Теоретические подходы к экономической оценке затрат участников дорожного движения в связи со снижением скорости сообщения Р.Н. Горбунов, З.В. Горбунова, Л.Н. Горбунова, А.И. Карлина, В.С. Колчин ...150

Исследование эффективности системы обслуживания автомобилей В.В. Коваленко, Н.Ф. Булгаков, А.В. Горбанева.....156

Динамика наведения оптической нагрузки многозвенного манипулятора Н.Е. Точилкин, А.И. Кимяев, В.В. Шеваль.....160

МЕХАНИКА КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ.....178

Обследование подвижности населения на основе данных сотового оператора А.Б. Бутузова, Е.А. Потылицын, И.В. Юшкова.....178

Влияние распределения транспортных потоков на скорость сообщения на двух полосных регулируемых сегментах городских улиц Ж. Т. Пиров.184

Эффективность применения экскаваторов в строительстве Худченко А.С., Сериков К.А......192

ДААННЫЕ АВТОРОВ.....197

АВИАЦИОННАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.3.019

Метод диагностирования авиационных систем по допустимому уровню вероятности безотказной работы

Н.И. Сидняев, Ю.И. Бутенко, Е.Е. Болотова

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана

В работе представлены методики прогнозирования надежности создаваемых устройств, проектирование устройств с заданной надежностью и сравнение надежности различных авиационных систем (АС). Приведены расчетные соотношения при различных видах резервирования в испытаниях, продления сроков эксплуатации блоков летательных аппаратов, основа которых – методология оценки остаточного ресурса. Систематизированы и изучены существующие методы анализа надежности. Изложены проблемы неопределенности информации по входным данным при расчетах классическими методами. Исследован характер влияния внешних факторов на надежность и степень учета факторов в существующих методах. Постулируется, что принцип сравнимости результатов количественных оценок ТС предполагает использование единого состава исходных данных за определённый отчётный период времени, единство используемых обобщённых и частных показателей, а также единство принятых допущений и ограничений. Показано применение общей и поэлементной постановки оценки состояния сложных механизмов с использованием диагностической матрицы и теории распознавания с целью определения состояния технических объектов. Описаны этапы общего процесса диагностирования объектов, состоящие из определения изменения параметров при воздействии на элементы объекта и дальнейшей обработки полученных результатов с применением методов синтеза и анализа.

Ключевые слова: *надежность, методики, ресурс, проектирование, летательный аппарат, оценка ресурса.*

Оценка технического состояния авиационных комплексов (АК) является важной задачей для предприятия-разработчика (изготовителя) при проведении анализа и оценки технического состояния АС и его

составных частей разработки и выпуска отчетов о техническом состоянии АК на этапах производства и эксплуатации.

Существующие методики устанавливает основные принципы и методы анализа, единую систему показателей технического состояния АК, а также порядок проведения анализа и оценки технического состояния, формирование выводов и рекомендаций с целью повышения существующих показателей технического состояния АК и их составных частей. В изделие АК входят: система, аппаратура, агрегат, прибор, блок, узел, изделие электронной компонентной базы, комплектующий элемент, программное изделие, входящие в состав ЛА или любой его структуры. Совокупность свойств, характеризующих его способность обеспечивать в процессе функционирования получение заданного в ТТЗ (ТЗ) выходного эффекта при заданных условиях и режимах эксплуатации. Отказ ЛА, трактуется как событие, состоящее в том, что при функционировании ЛА не достигается заданный уровень выходного эффекта. Важную роль играет экспериментальная отработка, которая подразумевает совокупность работ, определенных комплексной программой экспериментальной отработки и выполняемых при испытаниях на моделях, макетах, опытных образцах с целью проверки соответствия характеристик изделий требованиям ТТЗ (ТЗ), обеспечения функционирования изделий, определения запасов их работоспособности в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации. Важно техническое состояние (ЛА), которое трактуется как совокупность подверженных изменению количественных и (или) качественных параметров, характеризующих способность комплекса (изделия) выполнять при определенных условиях в заданный момент или период времени присущие ему функции на установленном в НД уровне с учетом срока активного существования, а именно календарный отрезок времени с момента выведения (или принятия в эксплуатацию в составе орбитальной системы ЛА) до момента прекращения использования ЛА по целевому назначению из-за достижения предельного состояния (необратимого снижения выходного эффекта КА ниже допустимого уровня). Срок активного существования ЛА, при котором предельное состояние достигается из-за наступления деградиционных отказов или исчерпания расходуемых компонентов бортовых систем ЛА, при отсутствии конструктивных, производственных и эксплуатационных отказов. Математическая модель, воспроизводящая реальные свойства, связи и взаимодействие изделий ЛА и внешние условия в процессе функционирования АС и позволяющая исследовать различные свойства АС. Основными целями проведения анализа технического состояния АС и его составных частей является оценка и установление тенденций изменений за определённый промежуток времени ТС АС и его составных частей, своевременная разработка рекомендаций и профилактических мероприятий, направленных на обеспечение требуемого уровня ТС и

надёжности, поддержание или повышение этого уровня (при серийном производстве), а также контроль реализации выработанных мероприятий [1-5].

При анализе и оценке технического состояния КК следует придерживаться следующих основных принципов сравнимости результатов количественной оценки технического состояния КК и его изделий; полнота и достоверность информации об отказах и неисправностях, выявленных в течение отчётного периода; системного подхода к использованию показателей ТС КК и входящих в его состав составных частей (СЧ) и основных изделий, а также выбор последовательности этапов проведения анализа и оценка технического состояния.

Принцип сравнимости результатов количественных оценок ТС предполагает использование единого состава исходных данных за определённый отчётный период времени, единство используемых обобщённых и частных показателей, а также единство принятых допущений и ограничений. Вследствие этого, показатели технического состояния могут быть распространены не только на различные модификации, виды, типы изделий (составных частей) АС, но и на различные комплексы, рассчитаны за соответствующие отчётные промежутки времени и должны быть сравнимы между собой. Принцип полноты и достоверности информации об отказах и неисправностях, выявленных в течение отчётного периода времени, предполагает, что исходные данные, используемые для проведения анализа и оценок ТС полно и достоверно характеризуют, имевшие место события и обеспечивают получение объективных оценок технического состояния АС. Все отказы и неисправности, выявленные на комплексе, независимо от того, повлияли ли они на результаты испытаний или нет, должны быть учтены, на них должны быть составлены информационные документы (сообщения о неисправности или рекламационные акты, акты исследования, подтверждённые протоколами исследования). В исходные данные включают все отказы и неисправности, выявленные на готовых изделиях в течение отчётного периода времени (по дате выявления неисправности или отказа) [6-8].

Диагностирование, т. е. заключение о техническом состоянии ЛА, имеет цель определить его пригодность к эксплуатации в настоящее время и в будущем за время эксплуатации до очередного обслуживания. Из этого следует, что при плановом диагностировании постановка диагноза содержит элементы прогнозирования ресурса исправной работы АС. Для уменьшения эксплуатационных затрат применяют два вида диагноза, различающиеся по глубине: общий и поэлементный. Диагноз работоспособности агрегата, системы, ЛА в целом называют общим, а детальный диагноз, определяющий причины снижения работоспособности – поэлементным. Как общий, так и поэлементный,

диагноз используют для управления технологическими процессами и качеством обслуживания ЛА. По результатам общего диагноза АС подвергают поэлементному диагностированию или направляют в эксплуатацию, а по результатам поэлементного производят ремонт или обслуживание. Кроме того, заключительный диагноз используют для контроля качества ТО и ремонта ЛА. Постановка диагноза состояния относительно простых механизмов, когда приходится пользоваться одним диагностическим параметром, не встречает особых методических затруднений. Она практически сводится к измерению величины диагностического параметра S сравнению ее с нормативом [9-11].

При этом для механизмов с известной непрерывной (возрастающей) закономерностью изменения технического состояния возможно три варианта диагноза: $S > S_{п}; S_y < S_{п}; S < S_y$. В первом варианте необходим ремонт с целью устранения неисправности, во втором требуется предупредительное техническое обслуживание ввиду недостаточного ресурса, а в третьем – восстановительное воздействие не требуется до следующего планового диагностирования. Для ЛА, диагностируемых при помощи дискретных диагностических параметров, когда прослеживание индивидуального изменения реализаций технического состояния нецелесообразно, возможны только два варианта диагноза: исправен и неисправен, т. е. $S > S_{п}; S < S_{п}$. В первом варианте требуется техническое обслуживание, а во втором не требуется – объект исправен. При этом безотказность работы в предстоящем полете гарантируется заблаговременным ужесточением диагностического норматива $S_{п}$.

Постановка поэлементного диагноза сложных АС, когда приходится пользоваться несколькими диагностическими параметрами, существенно осложняется.

Дело в том, что каждый диагностический параметр может быть связан с рядом структурных. Поэтому определенная величина каждого из них может свидетельствовать о той или иной неисправности объекта диагностирования. Значит, если число используемых диагностических параметров n , то возможное число технических состояний диагностируемого механизма составит 2^n . Теоретически постановка диагноза сводится к тому, чтобы из множества возможных состояний диагностируемого блока выделить одно, наиболее вероятное. Поэтому задачей диагноза по многим диагностическим параметрам является раскрытие множественных связей между структурными параметрами $X_1 X_2, \dots, X_n$ и соответствующими диагностическими параметрами $S_1 S_2, \dots, S_m$. Для этой цели в практике диагностирования составных частей КА наиболее часто применяют диагностические матрицы.

Диагностическая матрица (табл. 1) представляет собой двузначную логическую модель, описывающую связи между структурными и диагностическими параметрами, достигшими допустимой величины. Горизонтальные ряды матрицы соответствуют применяемым

диагностическим параметрам. При достижении диагностическим параметром нормативной величины возможна одна или несколько неисправностей объекта диагностирования. Вертикальные ряды соответствуют неисправностям объекта, т. е. его структурным параметрам, достигшим допустимой величины. Единица в месте пересечения горизонтального и вертикального рядов означает возможность существования неисправности. Нулем обозначено отсутствие такой возможности.

Таблица 1. Матричная модель связей между диагностическими и структурными параметрами.

		Нормативные величины структурных параметров (неисправностей)				
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
Нормативные величины диагностических параметров	S_1	0	0	1	0	0
	S_2	1	1	0	1	1
	S_3	0	0	0	0	1
	S_4	0	1	1	0	1
	S_5	0	1	0	0	0

При составлении матрицы стремятся применять минимальное число диагностических параметров. Для этого используют только наиболее чувствительные и информативные параметры. В то же время число диагностических параметров должно быть достаточным для получения достоверного однозначного диагноза. Аналитическую связь между структурными и диагностическими параметрами можно записать в общем виде следующими уравнениями:

$$\begin{cases} X_1 = f_1(S_1, S_2, \dots, S_m); \\ X_2 = f_2(S_1, S_2, \dots, S_m); \\ \dots\dots\dots \\ X_n = f_n(S_1, S_2, \dots, S_m). \end{cases}$$

Здесь система из n уравнений (где n – число структурных параметров X , каждый из которых может быть связан с m измеряемых диагностических параметров) описывает все возможные состояния объекта диагностирования, выраженные диагностическими параметрами S . Для практического составления этих уравнений необходимо знать перечень характерных неисправностей реактора, подлежащих выявлению, и структурно-следственную схему соответствующего диагностируемого механизма. Перечень характерных неисправностей механизма составляют на основе статистических показателей его надежности [12-15].

Пользуясь подобной схемой, составленной на основе инженерного изучения объекта диагностирования, можно применительно к данному

перечню неисправностей установить первоначальный перечень диагностических параметров и связи между теми и другими. Однако составленные таким образом логические уравнения, каждое из которых представляет горизонтальную строку матрицы, могут оказаться недостаточно информативными, поскольку структурно–следственные схемы не содержат количественной оценки диагностических параметров. Для того чтобы оценить значимость диагностических параметров, следует проанализировать их качества: чувствительность, информативность по вероятностям их возникновения при наличии данной неисправности или по вероятностным связям с основными параметрами работоспособности объекта диагностирования. При относительно малых вероятностях параметр считается малозначащим и приравнивается нулю. В противном случае он приравнивается единице. Подобранные таким образом диагностические параметры позволяют заполнять нулями и единицами соответствующие клетки матрицы.

Подобная матрица дает возможность решить задачу локализации неисправности диагностируемого механизма по наличию соответствующего комплекса диагностических параметров, достигших нормативной величины.

Физическая сущность решения данной задачи заключается в исключении неисправностей, несовместимых с существованием определенной комбинации измеренных диагностических параметров. Процесс выявления неисправности можно рассматривать как снижение энтропии (степени неопределенности технического состояния диагностируемого механизма) путем последовательного введения в диагностическую матрицу доз информации, несомой диагностическими параметрами, достигшими нормативной величины. Для практической постановки диагноза матрицу выполняют в виде электронного прибора, к которому подводятся электрические сигналы, соответствующие измеряемым диагностическим параметрам. При достаточной силе эти сигналы проходят через пороговое устройство (тригер) в свою электрическую цепь. По цепи сигнал направляется в элемент совпадения контрольной лампы X_1X_2 и т. д., соответствующей той неисправности, при которой возможно существование данного диагностического параметра. Если лампа не загорится, то это будет означать, что доза информации, полученная от данного диагностического параметра, недостаточна для локализации имеющейся неисправности и что для постановки диагноза требуется ввод дополнительной информации от других диагностических параметров. Так, например, сигнал неисправности X_1 поступит только после ввода сигналов от двух параметров S_1 и S_4 , сигнал неисправности X_2 – после ввода S_1 и S_3 и т. д. Следовательно, алгоритм функционирования данного логического устройства: $X_1 = S_2S_4$; $X_2 = S_1S_3$; $X_3 = S_1S_2S_4$; $X_4 = S_2S_3$; $X_5 = S_1S_3S_4$.

Подобные устройства позволяют локализовать неисправности и выводить информацию по соответствующим каналам в центральный пункт управления или на табло оператора. При необходимости ввода скорректированных диагностических показателей производится регулировка пороговых устройств. Наличие переключателей позволяет перестраивать диагностическую матрицу на другие диагностические параметры. Логическая матрица указанного вида может быть основой синтеза логических автоматов для определения технического состояния объекта диагностирования путем автоматической локализации неисправностей. В случаях, когда локализация неисправностей при помощи диагностической матрицы затруднительна, например, из-за небольшого числа измеряемых диагностических параметров и сильного пересечения классов состояния, для постановки диагноза могут быть использованы теория и технические средства распознавания образов.

Суть постановки диагноза при помощи теории распознавания образов заключается в следующем. Совокупности реализаций диагностических параметров для любого механизма (т. е. их величин, зафиксированных в какой-либо системе координат) представляют собой некоторые множества, обладающие характерными свойствами. Эти свойства проявляются в том, что ознакомление людей или машины (распознающего устройства) с реализациями указанных множеств дает возможность в дальнейшем распознавать принадлежность данной реализации к какому-либо из этих множеств. Множества такого типа называют образами.

Совокупности различных технических состояний объекта диагностирования обозначают в том случае так называемым «алфавитом» неисправностей: $A = A_0, A_1, A_2, \dots, A_j, \dots, A_M$, где A_0 – состояние технически исправного объекта; A_j – класс состояния объекта, выраженный совокупностью реализаций конкретной неисправности; M – число классов возможных состояний объекта.

Задача распознавания неисправностей заключается в отнесении полученной при диагностировании реализации диагностического параметра, выражающего состояние диагностируемого механизма, к соответствующему классу A_j . При этом к одному классу относятся реализации, обладающие общими свойствами.

Если измерить диагностические параметры нескольких одинаковых, исправных механизмов, то реализации параметров, полученные при диагностировании, образуют соответствующую область. При этом они будут группироваться относительно некоторого центра распределения, называемого эталоном A_0 . Возникновение в этих же механизмах какой-либо определенной неисправности вызовет смещение области реализации и ее эталона $A_{1э}$ в другое место. Наличие другой неисправности снова изменит местоположение области реализаций диагностических параметров и эталона $A_{2э}$ и т.д. Если местоположение областей

характерных неисправностей механизма известно, можно определить неизвестную неисправность, зная реализацию, полученную при диагностировании, по ее соответствию, принадлежности к тому или иному классу состояний объекта диагностирования.

Следовательно, распознавание технического состояния данного механизма можно понимать как установление того факта, что образ A_{jx} похож на эталонный образ $A_{jэ}$, считая, что степень сходимости определяется расстоянием между реализацией A_{jx} и эталоном $A_{jэ}$. Возможны два способа распознавания неисправностей: по включению полученной реализации (образа) внутрь области неисправных состояний и по расстоянию между его центром распределения A_{jx} и эталоном $A_{jэ}$. В первом случае материал, на котором формируют получение эталонов (он называется обучающей последовательностью), выражается границами между областями характерных неисправностей. Во втором случае распознавание сводится к определению расстояния между A_{jx} и $A_{jэ}$:

$$\rho(A_{ix}, A_{iэ}) = \sqrt{\sum_{k=1}^N (X_{kx} - X_{kэ})^2}$$

где X_{kx} и $X_{kэ}$ – значения диагностических параметров (реализаций), предъявленных к распознаванию; N – число диагностических параметров, характеризующих алфавит неисправностей.

Представив величины диагностических параметров, например, в координатах y – время износа, x – перемещение устройства, можно получить область исправных состояний, аналогичную области 0, и области 1–5 характерных неисправностей ЛА. Подобные неисправности можно выявлять при помощи относительно недорогих электронных приборов.

Описанный метод применения теории распознавания образов для диагностирования АС может быть использован и для других механизмов. Он позволяет определять техническое состояние ЛА непосредственно в процессе эксплуатации.

Общий процесс диагностирования технического состояния КК включает: тестовое воздействие на объект, измерение диагностических параметров, обработку полученной информации и постановку диагноза согласно заданному нормативу.

Тестовое воздействие на объект диагностирования осуществляется либо в процессе работы самого ЛА на заданных нагрузочных, скоростных, тепловых режимах, либо при использовании соответствующих устройств (стендов с нагрузочными устройствами, подкатных и переносных приспособлений и др.). Тестовые воздействия должны обеспечивать получение максимальной информации о

техническом состоянии ЛА при оптимальных трудовых и материальных затратах.

Диагностические параметры измеряют при помощи датчиков. Типы и разновидности датчиков соответствуют физической сущности диагностических параметров. При измерении параметров вибрации применяют пьезодатчики, при тепловой диагностике – термистеры, при электрических измерениях – индукционные токосъемные устройства и др. Различают легкоъемные и встроенные датчики. Первые устанавливаются на объект на время диагностирования (магнитные, навесные, на зажимах, резьбовые и т. п.), а вторые являются штатной принадлежностью КС. Встроенные датчики могут быть подключены к контрольным приборам для постоянного наблюдения или к централизованным штепсельным разъемам.

При использовании многоканальной узкой информации может применяться несколько разнотипных датчиков, а при использовании широкой – один датчик. На пути к измерительному прибору информация, полученная при помощи датчиков, соответствующим образом обрабатывается. Обработка заключается в усилении принятого сигнала, снятии помех, анализе и фильтрации сигнала по величине и по фазе.

Постановка диагноза состоит в сравнении полученного одного или нескольких прошедших обработку диагностических параметров с заданными нормативами. В простейшем случае при использовании единичного диагностического параметра процедура диагностирования на этом заканчивается.

Превышение S_y означает потребность в техническом воздействии установленного объема, а отсутствие превышения – возможность эксплуатации до очередного контроля.

При использовании для диагноза большого числа параметров применяют методы синтеза и анализа обработки снятой информации. Процесс диагностирования путем синтеза дифференцированной информации, полученной при помощи нескольких датчиков, и путем анализа обобщенной информации, зафиксированной одним датчиком, показаны на принципиальной схеме.

Сущность процесса диагностирования сложного объекта путем синтеза дифференцированной информации заключается в следующем. Диагностируемый механизм, как правило, подвергается тестовому воздействию. При этом датчики D_1, D_2, \dots, D_n , фиксируют величины структурных параметров X_1, X_2, \dots, X_n , каждого из элементов объекта $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_n$. Значения структурных параметров, выраженные электрическими сигналами S_1, S_2, \dots, S_n , поступают в блок усиления и после обработки в пороговое устройство. Последнее пропускает сигналы, превышающие допустимые значения S_y . Эти сигналы S'_1, S'_2, \dots, S'_m поступают в логическое устройство (диагностическую матрицу). Матрица синтезирует информацию, полученную от нескольких датчиков, и выдает

диагноз. Диагноз может быть уточнен путем дифференцирования потребного воздействия на конкретные виды: предупредительное или ремонт [16].

Процесс диагностирования путем анализа обобщенной информации отличается от описанного тем, что изменение структурных параметров X_1, X_2, \dots, X_n группы элементов объекта фиксируют интегрально при помощи одного датчика (например, пьезодатчика параметров вибрации). После усиления сигнал, заключающий в себе обобщенную информацию о техническом состоянии объекта, необходимо анализировать, выделяя наиболее характерные и полезные составляющие. Затем эти составляющие фильтруют по величине при помощи порогового устройства и ставят диагноз. При диагностировании несложных объектов описанный процесс упрощают путем исключения отдельных этапов.

Список использованной литературы:

1. Павлов И.В. Статистические методы оценки надежности сложных систем. Москва, Радиосвязь, 1982, 168 с.
2. Сидняев Н.И. Теория вероятностей и математическая статистика. Москва, Юрайт, 2011, 310 с.
3. Геча В.Я., Барбул Р.Н., Сидняев Н.И., Бутенко Ю.И. Методология оценки надежности космических аппаратов при проектной и конструкторской проработке // Надежность. 2019. № 2. С.3-8.
4. Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
5. Сидняев, Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: учебное пособие / Н.И. Сидняев. – М.: Издательство Юрайт, ИД Юрайт, 2011. – 399 с.
6. Морозов Д.В., Чермошенцев С.Ф. Методика повышения надежности функционирования системы управления беспилотного летательного аппарата в полете при возникновении отказа в бортовой контрольно–проверочной аппаратуре // Надежность. – 2019; – №19(1). – С.30–35.
7. Сидняев, Н.И. Модели и методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники / Н.И. Сидняев, Г.С. Садыхов, В.П. Савченко – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. –382 с.
8. Morris, S.F. Use and application of MIL–HDBK–217 / S.F. Morris // Solid Slate Technology. – 1990. – Vol. 33. – No. 6. – Pp. 65–69.
9. Сидняев, Н.И. Математическое моделирование оценки надежности объектов сложных технических систем / Н.И. Сидняев. // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2003. – № 4. – С.24–31.
10. Brennom, T.R. Should us MIL–HDBK–217 be 8888 / T.R. Brennom // IEEE Trans. Reliab. – 1988. – Vol. 37. – No. 5. – Pp. 474–475.

11. Сидняев, Н.И. Обзор и исследование физики отказов для оценки показателей надежности радиоэлектронных приборов современных РЛС / Н.И. Сидняев // Физические основы приборостроения. – 2017. – Т. 6. – № 2(23). – С. 4–52.
12. Барлоу, Р. Математическая теория надежности /Р. Барлоу, Ф. Прошан. – М.: Советское радио, 1969. – 488 с.
13. Лаврищева Е. М., Зеленов С. В., Пакулин Н. В. Методы оценки надежности программных и технических систем // Труды института системного программирования РАН. – 2019. – Т. 31, №. 5. – С. 95–108
14. Сидняев, Н.И. Факторы космической погоды, влияющие на бортовые элементы низкоорбитальных космических аппаратов / Н.И. Сидняев, Л.А. Макриденко, В.Я. Геча, В.Н. Онуфриев / Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Труды Четвертой международной научно–технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. – С. 90–10.
15. Похабов, Ю.П. Что понимать под расчетом надежности уникальных высокоответственных систем применительно к механизмам одноразового срабатывания космических аппаратов // Надежность. – 2018; – №4. – С.28–35.
16. Антонов, С.Г., Климов, С.М. Методика оценки рисков нарушения устойчивости функционирования программно–аппаратных комплексов в условиях информационно–технических воздействий // Надежность. – 2017. – №17(1). – С.32–39.

УДК 621.822.61

Оценка уточненной расчетной долговечности подшипников качения по методике SKF

П.М. Гришкевич, В.И. Умнов

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г.Иркутск, Российская Федерация

В статье рассматривается методика оценки долговечности подшипников качения с применением поправочных коэффициентов. Путем сравнения расчетов уточненной долговечности по методу SKF и номинальной по ГОСТ 18855–2013. Показаны преимущества метода SKF: простота применения в сравнении с уточненным методом стандарта и более высокая точность.

Ключевые слова: SKF, подшипники качения, долговечность, поправочный коэффициент

Одним из основных способов передачи движения в летательном аппарате является вращение. Для передачи вращательного движения применяются различные валы, использование которых подразумевает применение подшипников качения, имеющих определенные условия применения, такие как смазка, нагрузка, ресурс.

Авиационные подшипники, как правило, имеют долговечность выше рассчитанной по стандартным методикам. Это объясняется рядом причин: более высокая точность изготовления, более высокое качество применяемых подшипниковых материалов, лучшие условия организации смазывания подшипников и др. [1]

На основании данных факторов проведены различные исследования, описанные в таких работах, как [1-6], в том числе работы о методе расчета SKF [7-8]. Так же в 2013 году внесены поправки в ГОСТ 18855, которые добавляют специальные коэффициенты модифицированного расчета долговечности.

Многочисленный мировой опыт эксплуатации и автоматизация производства привели к появлению ряда программно-вычислительных комплексов компании SKF для проектирования и анализа прочности подшипников и подшипниковых узлов. Программный комплекс SKF SimPro Quick позволяет дать расчетную оценку долговечности подшипников качения с помощью собственной методики ее расчета.

При расчете методом фирмы SKF на основе стандарта ISO 281 вводятся дополнительные коэффициенты для уточнения базовой методики расчета ресурса:

$$L_{nm} = a_1 \cdot a_{SKF} \cdot L_{10} = a_1 \cdot a_{SKF} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^m,$$

где L_{nm} – номинальный ресурс SKF при надежности (100-n)%, 10^6 оборотов,

a_1 – поправочный коэффициент надежности (таблица 1);

a_{SKF} - коэффициент ресурса SKF (рис. 1);

L_{10} – номинальный ресурс при надежности 90%, 10^6 оборотов;

C – номинальная динамическая грузоподъемность, кН;

P – эквивалентная динамическая нагрузка на подшипник, кН;

m – показатель степени (для шарикоподшипников $m = 3$, для роликоподшипников $m = 10/3$).

Указанный коэффициент SKF является функцией отношения предела усталостной прочности P_u к действующей нагрузке P и учитывает фактические условия смазывания и уровня загрязнения через коэффициент вязкости k и коэффициент уровня загрязнения η_c . Для расчета коэффициента SKF могут применяться программные комплексы SKF SimPro Quick и SKF SimPro Expert, которые учитывают так же и контактные напряжения в телах качения.

Таблица 1.

Надежность, %	Вероятность отказа n, %	Номинальный ресурс SKF L_{nm} , 10^6 оборотов	Значение коэффициента a_1
90	10	L_{10m}	1
95	5	L_{5m}	0,64
96	4	L_{4m}	0,55
97	3	L_{3m}	0,47
98	2	L_{2m}	0,37
99	1	L_{1m}	0,25

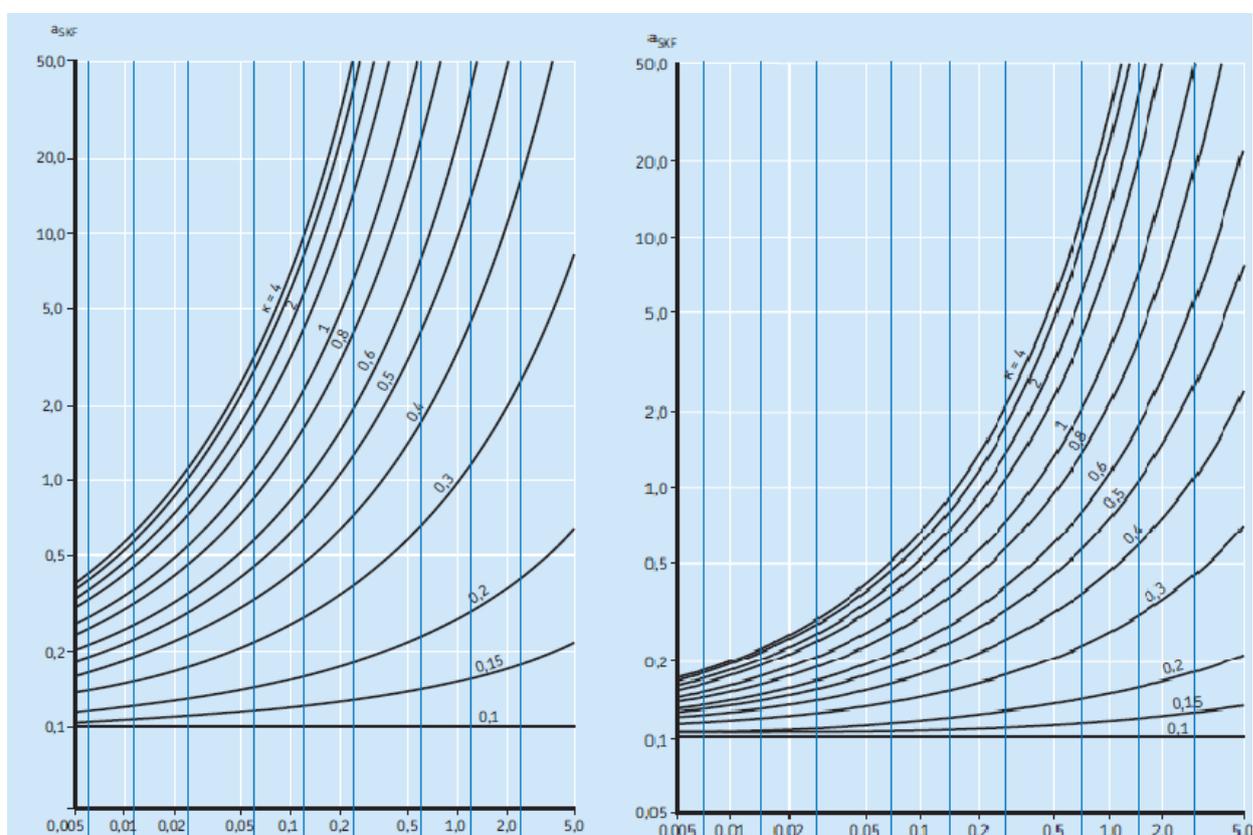


Рис.1. Диаграмма зависимости коэффициента a_{SKF} для радиальных шарико- (слева) и роликоподшипников (справа)

Для определения коэффициента вязкости смазки используется формула:

$$k = \frac{\nu}{\nu_1},$$

где ν – фактическая вязкость смазочного материала, $\text{мм}^2/\text{с}$;

ν_1 – номинальная вязкость смазочного материала в зависимости от среднего диаметра подшипника и частоты вращения (рис. 2), $\text{мм}^2/\text{с}$.

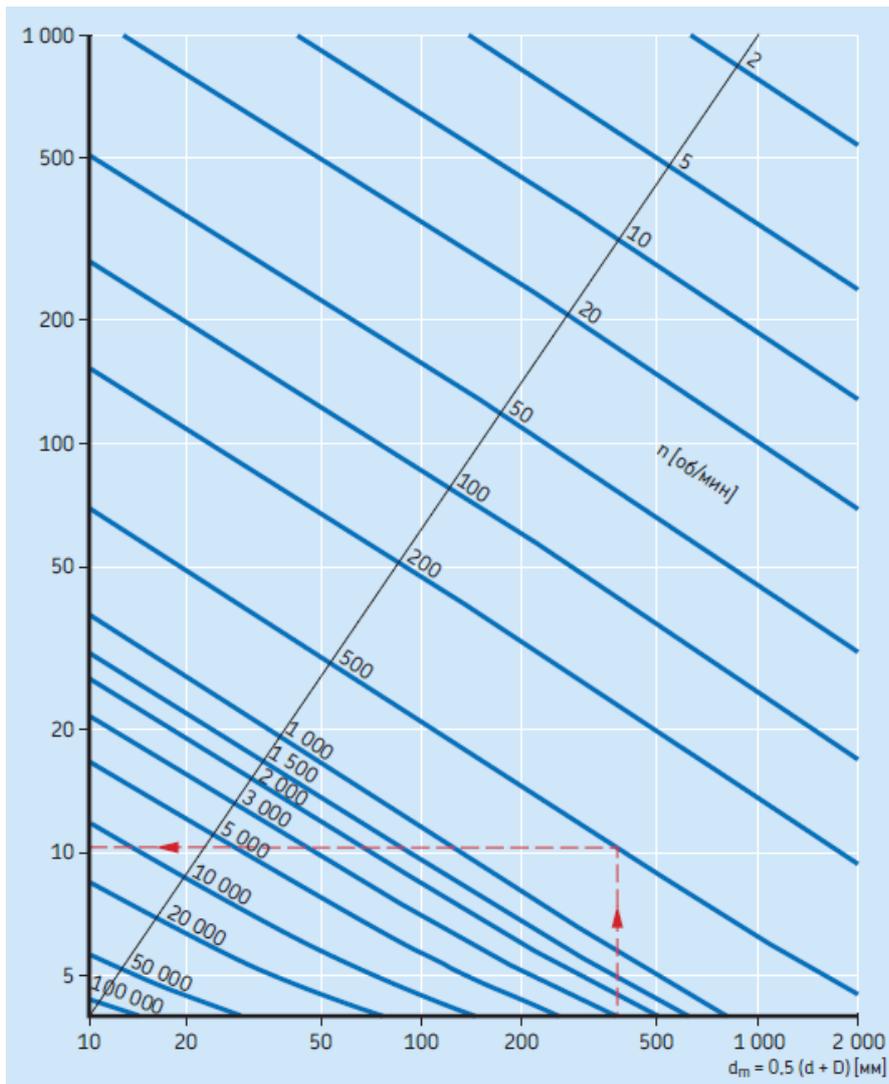


Рис.2. График зависимости номинальной вязкости масла от скорости вращения и среднего диаметра подшипника

При использовании систем смазывания циркуляцией масла, масляной ванной или пластичной смазкой, коэффициент загрязненности определяют по эмпирической зависимости:

$$\eta_c = \min(c_1 \cdot k^{0,68} \cdot d_m^{0,55}; 1) \cdot \left[1 - \frac{c_2}{3\sqrt{d_m}} \right],$$

где c_1 и c_2 – константы, характеризующие чистоту масла в соответствии с ISO 4406;

d_m – величина среднего диаметра подшипника.

В ГОСТ 18855–2013 так же предусмотрены коэффициенты модификации. Причем коэффициенты метода SKF, а именно a_1 (поправочный коэффициент надежности), k (коэффициент вязкости масла) η_c (коэффициент загрязнения) аналогичны коэффициентам a_1 , k , e_c ГОСТа соответственно. Для них даны эмпирические формулы определения величин (ГОСТ 1855–2013, формулы (27–30), приложения А, Б).

В то же время, коэффициент a_{SKF} является аналогом коэффициента a_{ISO} , для которого определены эмпирические зависимости. Для радиальных и радиально-упорных подшипников:

$$a_{ISO} = 0,1 \left[1 - \left(2,5671 - \frac{2,2649}{k^{0,054381}} \right)^{0,83} \left(\frac{\eta_c \cdot P_u}{P} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-9,3} \quad \text{для } 0,1 \leq k < 0,4$$

$$a_{ISO} = 0,1 \left[1 - \left(2,5671 - \frac{1,9987}{k^{0,19087}} \right)^{0,83} \left(\frac{\eta_c \cdot P_u}{P} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-9,3} \quad \text{для } 0,4 \leq k < 1,$$

$$a_{ISO} = 0,1 \left[1 - \left(2,5671 - \frac{1,9987}{k^{0,071739}} \right)^{0,83} \left(\frac{\eta_c \cdot P_u}{P} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-9,3} \quad \text{для } 1 \leq k < 4,$$

Коэффициент ISO учитывает, так же, как и коэффициент SKF, уровень загрязнения, действующую нагрузку и коэффициент смазки, но пользоваться им достаточно проблематично, так как необходимы громоздкие расчеты. Применение коэффициента модификации SKF намного проще, так как основывается на уже известных значениях предела усталостной прочности, коэффициентов загрязнения и качества смазки. Такой подход значительно экономит время расчета и упрощает его, уменьшая вероятность ошибки. Применение ПО SKF SimPRO Quick и SKF SinPRO Expert позволяют свести подбор коэффициентов для данных смазки, подшипников и условий эксплуатации, так как они автоматически выбираются программой в соответствии с расчетными данными.

При условии изменяющихся условий работы подшипника за цикл, ресурс подшипника определяется как:

$$L_{10m} = \frac{1}{\frac{U_1}{L_{10m1}} + \frac{U_2}{L_{10m2}} + \dots},$$

где $U_i = \frac{N_i}{N}$ – отношение числа оборотов i -того режима к количеству

оборотов для завершениях всех переменных циклических нагрузок;

L_{10mi} – номинальный ресурс с надежностью 90% при постоянных i -ых условиях.

По примеру из [9] рассчитана номинальная долговечность и долговечность SKF однорядных шарикоподшипников фирмы SKF. Так как эквивалентная нагрузка для этих методов определяется одинаково, ее целесообразно принять одинаковой $P = F_r = 10 \text{ кН}$. Применяется смазка маслом с кинематической вязкостью $\nu = 20 \text{ мм}^2/\text{с}$ при нормальной температуре эксплуатации. Вращение происходит с частотой $n = 3000 \text{ об/мин}$. Результаты сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты.

Подшипник	d, мм	D, мм	d _m , мм	C, кН	P _ц , кН	Номинальный ресурс L ₁₀ , 10 ⁶ оборотов по ГОСТ 18855-2013	Номинальный ресурс SKF L _{10m} , 10 ⁶ оборотов	$\frac{L_{10m}}{L_{10}}$
6404	20	72	46	30,7	0,64	28,93	51,495	1,78
6406	30	90	60	43,6	1	82,88	215,488	2,6
6215	75	130	102,5	68,9	2,04	327,08	3205,384	9,8

Вывод по работе: существующая отечественная система оценки долговечности подшипников качения не дает точных результатов для авиационной промышленности, занижая значения расчетного ресурса. Эту проблему возможно решить, вводя ряд поправок на условия эксплуатации и повышенную степень точности при изготовлении авиационных подшипников. На примере методики оценки долговечности подшипников фирмой SKF видно, что с ростом предела усталостной прочности и среднего диаметра подшипника при равных прочих условиях растет и разница между номинальной долговечностью, посчитанной в соответствии с ГОСТ 18855–2013 и по методу SKF. Так, при расчете подшипника SKF 6215 рассчитанный номинальный ресурс ниже уточненного расчётного ресурса SKF в 9,8 раз. Метод расчет SKF имеет преимущество точности определения расчетной долговечности в сравнении с номинальной долговечностью и простоту в сравнении с уточненным методом отечественного стандарта, так как основные расчетные значения, зависящие от подшипника, такие как предел усталостной прочности, уже рассчитаны. Кроме того, расчет методом SKF упрощается многократно при использовании программного обеспечения за счет его автоматизации процесса.

Список использованной литературы

1. Жильников Е.П. Метод расчетной оценки долговечности подшипников качения авиационных изделий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Том.13, №4, С. 185-188.
2. Силаев, Б. М., Даниленко П.А. Метод расчета высокоскоростной опоры качения двигателей летательных аппаратов с учетом изнашивания // Трение и износ. 2015. Том 36, №3. С. 453-460.
3. Жильников, Е. П., Макачук В.В. Расчет долговечности авиационных подшипников качения по базовым контактным

напряжениям. // Міжвузівський збірник "НАУКОВІ НОТАТКИ". Луцьк, 2011. № 32. С. 138-142.

4. Анцупов А.В., Анцупов А.В., Анцупов В.П., Слободянский М.Г. Проектная аналитическая оценка ресурса подшипников качения по критерию контактной выносливости // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Том 22. №4 .С. 10-20.

5. Ли Р.И. Расчет долговечности подшипников качения // КЛЕИ. ГЕРМЕТИКИ. ТЕХНОЛОГИИ. 2005. №6. С. 21-23.

6. Сотников А.Л., Родионов Н.А., Парфенюк А.С. Расчет долговечности подшипников качения механизма качания кристаллизатора МНЛЗ // Металлургические процессы и оборудование. 2014. №1. С. 71-78.

7. Катаев С.А., Кадомцев К.И. К вопросу выбора расчетных моделей для определения долговечности подшипников // Транспортное дело России. 2019. №1. С. 166-167.

8. Мартинетти Маурицио, Розенгрэн Филип, Экхольм Нильс. Подход SKF к оценке возможности увеличения межремонтного интервала железнодорожных буксовых подшипников // Вестник института проблем естественных монополий: техника железных дорог. 2019. №3. С. 62-66.

9. Подшипники качения. Изд. SKF 2017. 1362 с.

10. Гладкий И.Л., Кирьянов М.В. О необходимости совершенствования отечественной методики расчета ресурса авиационных подшипников и путях решения этой проблемы // Проблемы и перспективы развития двигателестроения, материалы докладов международной научно-технической конференции, (г. Самара, 22-24 июня 2016 г.). Самара, 2016, С. 150-152.

УДК 629.7.083

Анализ системы управления обеспечением авиационной техники запасными частями

А.Б. Белхорув, Е.В. Федоров, А.В. Климович

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54а

В данной статье проводится анализ существующей системы управления обеспечением авиационной техники запасными частями и обосновывается мысль о том, что создание и развитие информационных технологий обеспечения эксплуатации и ремонта авиационной техники на базе интегрированной логистической поддержки способствуют повышению надежности эксплуатации, регулярности и безопасности

полетов, существенному снижению затрат, связанных с эксплуатацией воздушных судов.

Ключевые слова: *управление поставками запасных частей, жизненный цикл изделий, интегрированная логистическая поддержка.*

В целях поддержания высокой боевой готовности и создания необходимых условий для базирования авиации и эффективного решения поставленных задач организуется тыловое обеспечение авиационных частей. Материальное обеспечение как вид тылового обеспечения заключается в планировании, истребовании, накоплении, содержании, распределении материальных средств и обеспечении ими потребностей авиационных частей. Одним из основных элементов поддержания высокой боевой готовности авиации являются поставки запасных частей (ЗЧ) для авиационной техники (АТ), необходимых комплектующих изделий взамен выработавших свой ресурс или вышедших из строя.

Основными мероприятиями по снабжению запасными частями авиационных частей и подразделений являются [1]:

своевременный расчет потребности в ЗЧ, их истребование, поставка, накопление, хранение и распределение между частями и ремонтными подразделениями;

использование внутренних источников для снабжения авиационных частей ЗЧ, в том числе сбор и использование годных агрегатов, узлов и деталей со списанных образцов АТ;

закупка ЗЧ для замены агрегатов, не подлежащих ремонту;

отправка неисправных агрегатов, не подлежащих войсковому ремонту, в авиационные ремонтные заводы (АвРЗ) и предприятия, осуществляющие их ремонт;

планирование и организация ремонта неисправных агрегатов;

учет и контроль правильного использования, расходования и списания ЗЧ;

разработка нормативных документов по вопросам снабжения ЗЧ;

информационное обеспечение процесса движения заявок и ЗЧ на всех этапах ликвидации простоя АТ, от подачи заявок по простоям до поступления ЗЧ в подразделения инженерно-авиационной службы (ИАС).

Весь процесс поставок ЗЧ представляет собой совокупность информационных и материальных потоков, управление которыми осуществляется различными должностными лицами различных организаций (рисунок 1).

В общем случае в процессе поставок ЗЧ задействованы должностные лица ИАС авиационных частей, обеспечивающих частей, должностные лица ИАС и тыла соединений и объединений, тыла Военно-воздушных сил (ВВС), заказывающего Управления ВВС, военные представители на предприятиях промышленности и другие.

Старшие инженеры авиационных частей на основании данных фактического расхода запасных частей и плана замены агрегатов по выработке ресурса составляют расчеты потребности в запасных частях и расходных материалах на эксплуатацию АТ в предстоящем году (периоде). Расчет потребности в ЗЧ осуществляется по нормам расхода или на основании статистических данных о фактическом расходе за предшествующий период. Расчет отправляется в авиационно-техническую службу (АТС) авиационной воинской части для организации поставки ЗЧ, а также в ИАС объединения для проведения контроля потребности в ЗЧ за объединение в целом.

Основными документами на истребование запасных частей и материалов являются отчеты-заявки, которые составляются АТС совместно с ИАС авиационных частей. ИАС авиационных частей при составлении отчетов-заявок (ведомостей) определяет номенклатуру и количество авиационных двигателей, агрегатов, узлов и деталей в соответствии с ожидаемой выработкой ресурса и заменой по отказам (согласно действующим нормам расхода ЗЧ и на основании расчетов).

Основным документом на истребование ЗЧ для восстановления исправности АТ, простаивающей из-за их отсутствия, является заявка «По простоям», которая составляется в ИАС авиационной части и направляется в АТС части [2].

На сегодняшний день такие традиционные способы организации документооборота и выполнения поставок ЗЧ для АТ перестали удовлетворять современным требованиям, предъявляемым к системе управления поставками ЗЧ, о чем свидетельствуют значительные простои АТ в неисправном состоянии.

Управление поставками ЗЧ в авиации Вооруженных сил РФ имеет свои специфические стороны и недостатки:

во-первых, существующая сегодня система поставок ЗЧ для восстановления исправности АТ отличается низкой оперативностью, многократным дублированием информации (неоднократно заполняются различные по форме документы с указанием необходимых данных о востребованном изделии) и «бумажной» технологией управления, что порождает другой существенный недостаток – необходимость иметь в запасе большее количество ЗЧ. В совокупности это приводит к повышению стоимости всей системы поставок и нерациональному использованию имеющихся запасов.

во-вторых, отсутствует оптимизация поставок ЗЧ с точки зрения снижения стоимости доставки. Нет «прямых» схем поиска и доставки ЗЧ из-за наличия иерархической схемы поиска и доставки ЗЧ (от склада части к АТС соединения, затем к уровням объединения и центрам материально-технического обеспечения), которая не дает возможности доставки ЗЧ со складов других частей, что может быть осуществлено дешевле и быстрее.

в-третьих, объемы технической документации измеряются тысячами и десятками тысяч листов. При использовании бумажной документации возникают значительные трудности при поиске необходимых сведений, внесении изменений в конструкцию и технологии изготовления изделий. Возникает множество ошибок, на устранение которых затрачивается много времени. В результате резко снижается эффективность процессов разработки, производства, эксплуатации, обслуживания и ремонта авиационной техники. Возникают трудности во взаимодействии заказчиков и производителей как при подготовке, так и при реализации контрактов на поставки ЗЧ.

в-четвертых, в военной авиации важнейшее значение имеет фактор боеготовности АТ, а из этого следует (при наличии финансовых ограничений), что поставка (распределение) ЗЧ осуществляется исходя из выполняемых задач конкретными авиационными частями и подразделениями.

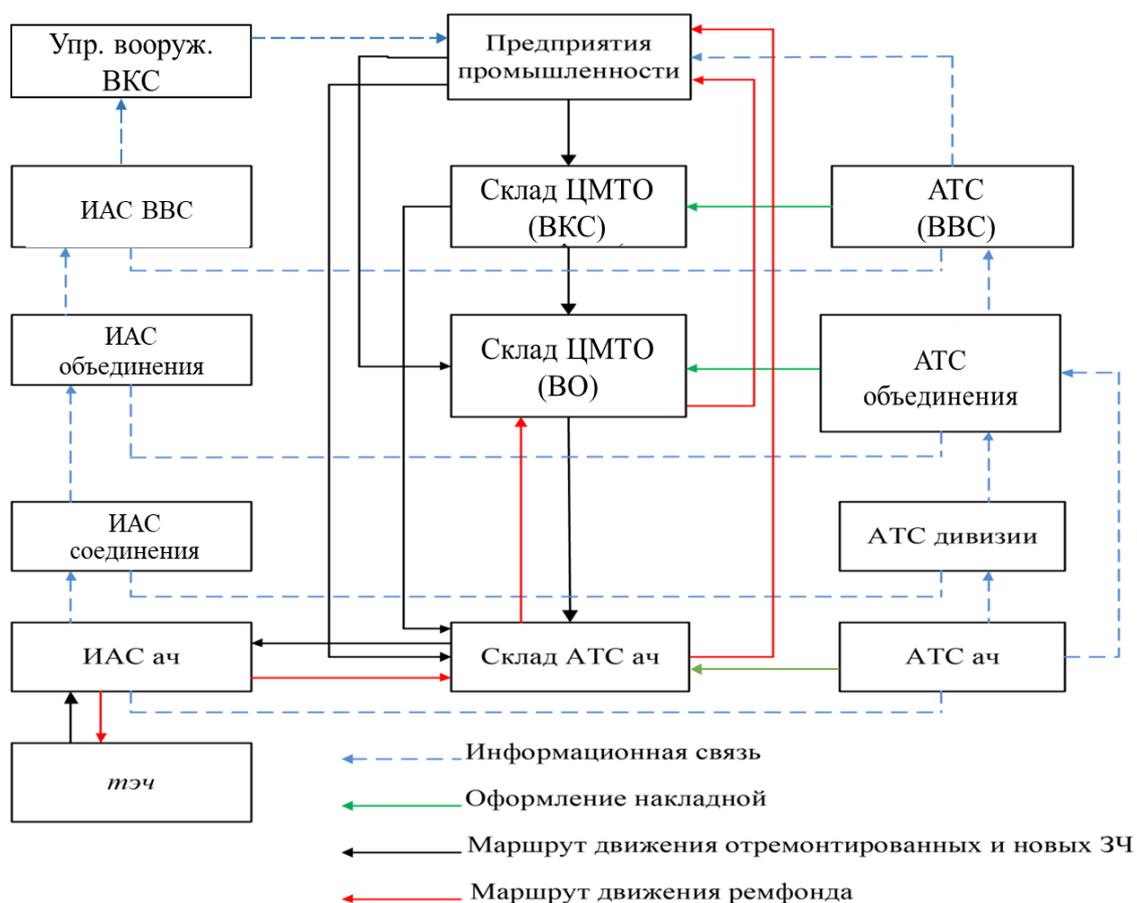


Рис. 1. Структурно-функциональная схема системы управления обеспечением эксплуатации и ремонта АТ запасными частями

Следовательно, для бесперебойного обеспечения авиационных частей запасными частями, а также в целях снижения стоимости всей системы поставок ЗЧ необходимо осуществлять обоснованное

планирование заказа ЗЧ и своевременное формирование их запасов за счет применения передовых мировых и отечественных достижений в данной области, в том числе в области информационных технологий.

Анализ опыта решения задач планирования поставок потребных ЗЧ в армиях зарубежных государств говорит о том, что данные процедуры реализуются с использованием новых информационных технологий в интегрированных системах, поддерживающих жизненный цикл (ЖЦ) изделий вооружения и военной техники (ВВТ) [3].

Работы по созданию интегрированных систем, поддерживающих ЖЦ ВВТ, впервые были начаты в 80-х годах XX в. в оборонном комплексе США и позднее поддержаны большинством развитых стран, в первую очередь стран, входящих в блок НАТО. Стало ясно, что устоять в конкурентной борьбе смогут только те предприятия, которые будут применять в своей деятельности современные информационные технологии. Именно информационные технологии наряду с прогрессивными технологиями материального производства позволяют существенно повысить производительность труда и качество выпускаемой продукции при значительном сокращении сроков постановки на производство изделий, отвечающих запросам и ожиданиям потребителей [4]. Применение информационных технологий было настолько эффективно, что их стали применять не только военные ведомства, но и в промышленности, строительстве, транспорте и других отраслях экономики, расширяясь и охватывая все этапы жизненного цикла продукта – от маркетинга до утилизации. Новая концепция получила обозначение Continuous Acquisition and Lifecycle Support (CALS) – совокупность принципов и технологий информационной поддержки жизненного цикла продукции на всех его стадиях, основанная на использовании единого информационного пространства, обеспечивающая взаимодействие всех участников этого цикла. Реализация этой концепции направлена на сокращение затрат, связанных с организацией информационного взаимодействия государственных учреждений с частными фирмами в процессах формализации требований, заказа, поставок и эксплуатации ВВТ [5].

В основе концепции CALS лежит использование единого информационного пространства (интегрированной информационной среды), обеспечивающего унифицированные способы информационного взаимодействия всех участников: заказчиков, поставщиков (производителей) ВВТ, эксплуатационного и ремонтного персонала.

Интегрированная информационная среда (ИИС) представляет собой совокупность распределенных баз данных, содержащих сведения о продукции, производственной среде, ресурсах и процессах предприятия, обеспечивающая корректность, актуальность, сохранность и доступность данных субъектов производственно-хозяйственной деятельности, участвующих в осуществлении жизненного цикла продукции [6].

В связи с возрастающими масштабами использования концепции CALS в промышленности России появилась русскоязычная формулировка понятия CALS: «Интегрированная информационная поддержка изделий» (ИПИ).

Эта концепция воплотилась в новом классе информационных технологий (CALS-технологий), поддерживаемых международными стандартами: базовых управленческих технологий и технологий управления данными об изделии, процессах, ресурсах, используемые при реализации управленческих технологий. Главный принцип CALS: информация, однажды возникшая на каком-либо этапе ЖЦ, сохраняется в интегрированной информационной среде и становится доступной всем участникам этого и других этапов (в соответствии с имеющимися у них правами доступа к данной информации). Это позволяет избежать дублирования, перекодировки, несанкционированного изменения логистических данных, избежать ошибок и неточностей [5].

В связи с большими объемами ожидаемой экономии и дополнительных прибылей от внедрения современных информационных технологий в эту сферу привлекаются значительные инвестиции, измеряемые миллионами долларов.

По опыту стран НАТО, применение CALS-технологий является обязательным условием получения военного заказа на разработку и производство новейших видов ВВТ. Введение указанных обязательных требований позволяет значительно повысить качество выпускаемой продукции, на 20–30 % сократить затраты на разработку и производство сложной техники, на 20–25 % сократить стоимость ее эксплуатации и на 22 % сократить сроки закупки запасных частей и материалов [3].

Сокращение затрат на поддержку изделия на постпроизводственных стадиях ЖЦ изделий – одна из целей внедрения концепции и стратегии CALS. Комплекс управленческих мероприятий, направленных на сокращение затрат, возникающих на этих стадиях ЖЦ изделий и связанных с поддержанием их в работоспособном состоянии, объединяется понятием «интегрированная логистическая поддержка» (ИЛП) – Integrated Logistic Support.

Интегрированная логистическая поддержка – совокупность видов инженерной деятельности, реализуемых посредством управленческих, инженерных и информационных технологий, ориентированных на обеспечение высокого уровня готовности изделий (в том числе показателей, определяющих готовность – безотказности, долговечности, ремонтпригодности, эксплуатационной и ремонтной технологичности и др.) при одновременном снижении затрат, связанных с их эксплуатацией и обслуживанием (рисунок 2) [7].

В современном понимании, ИЛП эксплуатации и ремонта авиатехники должна включать в себя интегрированное управление такими процессами, как [8]:

мониторинг (контроль) состояния каждого изделия;
планирование технического обслуживания и ремонта;
снабжение ЗЧ, вспомогательным оборудованием для технического обслуживания и ремонта;

обучение эксплуатационного и ремонтного персонала, и т.п.

Технологической основой ИЛП являются:

системы автоматизированного учета складских запасов ЗЧ (с использованием унифицированной электронной маркировки запчастей);

системы автоматизированного оформления заявок на поставку ЗЧ (их функции реализуются в рамках систем SCM, Supply Chain Management – управление цепочкой поставок);

системы информационного сопровождения эксплуатации авиационной техники.

Поскольку США были инициатором создания и развития идеологии и методологии CALS, то естественно, что именно в этой стране к настоящему времени накоплен наибольший опыт практического использования технологии ИЛП. Ниже приводятся некоторые достигнутые результаты при применении ИЛП к процессам и операциям эксплуатации самолетов [9]:

компания American Airlines – повышение уровня автоматизации и сокращение количества бумажных документов, снижение затрат на эксплуатацию самолетов;

компания Rockwell International – внедрение программных решений ИЛП, обеспечивающих обслуживание бомбардировщика B-1B;

компания Northrop Grumman – формирование нового порядка заказа ЗЧ для бомбардировщика B-2A, удовлетворяющего требованиям ИЛП;

компания Pratt&Whitney – внедрение электронного обмена данными, при осуществлении свыше 90 % поставок ЗЧ и др.

Таким образом, в соответствии с понятиями, регламентированными стандартом [10] для АТ зарубежного производства, проводится ИЛП ее эксплуатации, которая включает в себя:

определение требований к готовности изделия, определение допустимых затрат и ресурсов для поддержания эксплуатации, создание баз данных для отслеживания соответствующих параметров в ходе ЖЦ изделия;

создание электронной технической документации для процессов закупки, поставки, ввода в действие, эксплуатации, сервисного обслуживания, ремонта и вывода из эксплуатации;

создание и применение компьютерных систем планирования потребностей в средствах МТО.



Рис. 2. Схема интегрированной логистической поддержки наукоемкой продукции

Проблема внедрения интегрированных логистических систем на предприятиях и в организациях России приобрела особую актуальность в последние годы в связи с возрастающим стремлением отечественных предприятий (в особенности предприятий оборонного комплекса) выйти на международные рынки.

Современный рынок вооружения предъявляет жесткие требования к изделиям ВВТ в части их поддержки на послепродажных этапах жизненного цикла. Анализ требований иностранных заказчиков к интегрированной логистической поддержке [11] показывает, что они базируются на использовании международной нормативной базы, включающей стандарты министерства обороны США, министерства обороны Великобритании, а также НАТО.

Наиболее востребованными элементами ИЛП изделий, которые в том или ином виде включаются в контракты на поставку ВВТ, являются:

разработка концепции эксплуатации ВВТ с учетом оценки стоимости ЖЦ изделий ВВТ;

проведение анализа логистической поддержки;

планирование и организация процесса эксплуатации ВВТ;

организация закупки и поставки имущества, в том числе ЗЧ;

подготовка электронной технической документации;

электронный обмен данными в интересах поддержания ЖЦ изделий ВВТ;

мониторинг рабочих характеристик изделий в течение эксплуатации и состояния запасов запасных частей и др.

В последние годы CALS активно развивается в промышленности России, однако отечественные предприятия в части ИЛП изделий ВВТ сегодня имеют серьезное отставание от передовых стран Запада, работы по внедрению ИПИ-технологий, в частности ИЛП, находятся в начальной стадии и проводятся медленно без должной координации.

Тем не менее российскими предприятиями оборонно-промышленного комплекса накоплен уже достаточно положительный опыт по внедрению ИПИ-технологий [11]. Так, Минпромторгом России совместно с российскими агентствами по оборонным отраслям промышленности организована промышленная апробация отечественных разработок в рамках пилотных проектов внедрения ИПИ-технологий на этапах разработки и эксплуатации конкретных видов наукоемкой продукции, в том числе: самолета Ту-214; танка Т-14 «Армата»; продукции ОАО «Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение», продукции ОАО «Казанский вертолетный завод», ОАО «Корпорация «Иркут», ПАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение» и ГУП «Казанское авиационное производственное объединение»; продукции ФГУП «ММПШ Салют» и ЗАО «Завод экспериментального машиностроения» РКК «Энергия». На данных предприятиях проведены работы по внедрению программных средств и технологий, являющихся системообразующими для последующего развития. Это в первую очередь средства и технологии управления данными об изделии – PDM-системы (Product Data Management). Также внедряются средства и технологии, направленные на удовлетворение первоочередных требований иностранных заказчиков при выполнении экспортных контрактов. К ним относятся средства автоматизированной разработки электронной сопроводительной (эксплуатационной и ремонтной) технической документации (ЭТД), отвечающей требованиям международных стандартов и спецификаций. Например, внедрение программного комплекса подготовки интерактивных электронных технических руководств (ИЭТР) осуществлено в ОАО «Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение» и его предприятиях-поставщиках [12].

Таким образом, на основании проведенного анализа мирового и отечественного опыта в решении задач планирования и поставок потребных материальных ресурсов, можно сделать вывод о том, что система управления обеспечением АТ запасными частями должна содержать в себе передовые мировые и отечественные достижения в области управления, в том числе в области информационных технологий. Задача определения потребности в запасных частях на определенный период эксплуатации АТ должна также решаться в рамках ИЛП эксплуатации АТ, что обеспечит высокую оперативность и эффективность поставок авиационно-технического имущества, реализует

логистические функции в сфере формирования заказа, материально-технического обеспечения, эксплуатации и ремонта авиационной техники.

Список использованной литературы:

1. Руководство по обеспечению запасными частями авиационной техники, простаивающей в неисправном состоянии из-за их отсутствия: приложение к приказу ГК ВВС от 2004 года № 216. 36 с.

2. Федеральные авиационные правила инженерно-авиационного обеспечения государственной авиации (ФАП ИАО ГА). Книга первая. М.: 2005. 252 с.

3. URL: <http://old.cals.ru/conferences/CALS/materials/index.html> (дата обращения 05.06.2020 г.).

4. Судов Е.В., Левин А.И. Концепция развития CALS – технологий в промышленности России. М.: НИЦ CALS – технологий «Прикладная логистика», 2002. 102 с.

5. Некрасов А.Г. Интегрированная логистическая поддержка поставок ресурсов и запчастей (критерий безопасности cals/ипи-технологий) URL:<http://www.integprog.ru/press-centre/publications/63-pub-ilpres.html> (дата обращения: 04.06.2020 г.).

6. ГОСТ Р 52611-2006. Системы промышленной автоматизации и их интеграция. Средства информационной поддержки жизненного цикла продукции. Безопасность информации. Основные положения и общие требования. М.: Стандартиформ, 2007. 8 с.

7. ГОСТ Р 53394–2009 Интегрированная логистическая поддержка. (Основные термины и определения). М.: Изд-во стандартов, 2010. 28 с.

8. Клочков В.В. CALS – технологии в авиационной промышленности: организационно-экономические аспекты. М.: Научное издание, 2008. 122 с.

9. Судов Е.В. Интегрированная информационная поддержка жизненного цикла машиностроительной продукции. Принципы. Технологии. Методы. Модели. М.: Издательский дом «МВМ», 2003. 264 с.

10. Defence Standard 00-60. Integrated Logistic Support. 14 с.

11. Борисов В.Б. Опыт практической работы по каталогизации продукции ОАО «Корпорация «Иркут» в соответствии с международными стандартами // Материалы XI международной научно-технической конференции «Каталогизация продукции – новый этап развития». М.: Альманах «Россия: союз технологий», 2012. С. 132 – 133. 258 с.

12. Информационное обеспечение, поддержка и сопровождение жизненного цикла изделия: справочно-учебное пособие; под ред. В.В. Бакаева. М.: Машиностроение, 2005. 624 с.

Инженерное управление проектированием бортовой кабельной сети летательных аппаратов

А.Ю. Мясников

Самарский филиал конструкторского бюро публичного акционерного общества «Туполев», г. Самара, ул. Земеца, 32, лит.273

В статье рассматриваются вопросы инженерного управления в процессах проектирования компонентов бортовой кабельной сети летательного аппарата (БКС ЛА). Рассмотренная прагматика и семантика задачи проектирования компонентов БКС ЛА позволила сформировать общий подход к решению задачи синтеза основных компонентов БКС ЛА на основе точного формализма действий проектировщика. В проведенном исследовании выявлено отсутствие теоретического базиса постановки задачи проектирования в замкнутой форме в САД/САЕ/САМ системах. Предложен метод решения задачи управления проектированием БКС ЛА в рамках точного формализма исчисления высказываний, описывающего процесс проектирования как синтез образа в рамках теории У. Гренандера. Эффективность фрагментов постановки и решения задач проектирования апробирована при проектировании конкретных жгутов бортовых систем.

Ключевые слова: *Бортовой комплекс оборудования, бортовая кабельная сеть, жгут, проектирование, алгоритмизация, предикаты.*

В отечественном и зарубежном авиастроении значительную роль в успехе выполнения требований технического задания на летательный аппарат (ЛА) играет бортовой комплекс оборудования (БКО), обеспечивающий не только выполнение полета ЛА, но и выполнение им целевых функций в соответствии с назначением ЛА. В условиях всевозрастающей автоматизации процессов управления вновь создаваемых ЛА наблюдается значительный рост числа бортовых систем (БС) БКО. Одной из составляющих БКО является бортовая кабельная сеть (БКС) представляющая собой совокупность жгутов электрических проводов, изображение которых представляется на схемах электрических принципиальных и соединений [1], и таблицах соединений как набор проводов, соединяющих элементы БС.

С системной точки зрения жгуты, обеспечивающие материальное соединений большого числа удаленных друг от друга элементов БС – блоков, являются самостоятельным и значимым техническим средством, как и сама БС.

Предметом рассмотрения в данной статье является деятельность в сфере проектирования жгутов БКС ЛА, как некоторой абстракции, существенно связанной с созданием конкретных объектов на базе основной деятельности проектировщиков жгутов БКС ЛА.

Общая постановка задачи управлением проектирования БКС ЛА.

Особенностью современного решения задач проектирования является использование достижений CALS технологий [2], русским аналогом которой является ИПИ-технологии [3], и создаваемых на их основе конструкторских и технологических CAD/CAE/CAM [4] систем, интегрирующихся в единый комплекс, который в отечественной технической литературе получил название ИАУС – интегрированная автоматизированная система управления, а в англоязычной литературе – CIM (Computer Integrated Manufacturing).

Следует отметить, что основной проблемой использования различных CAD/CAE/CAM систем является отсутствие теоретического базиса постановки задач в замкнутой форме, отсутствие которого не позволяет разработать принципы и методы синтеза моделей целостной сложной деятельности проектировщика – потребителя теоретического базиса для замыкания CAD/CAM/CAE систем. Особенно остро эта проблема стоит в области проектирования БКО ЛА и, в частности, жгутов БКС ЛА.

Задача инженерного управления процессами проектирования компонентов БКС ЛА – жгутов электрических проводов в общей форме может быть сформулирована следующим образом.

Найти конечное число операторов, характеризующих поведение – способ выбора и комбинирования управляющих воздействий на объект для его перевода из начального состояния в конечное состояние.

Начальным состоянием объекта является набор схем электрических принципиальных ЭЗ на различные БС из состава БКО ЛА. Конечным состоянием объекта является представление компонентов БКС внедряемых в БКО ЛА через набор простых жгутов, объединяемых в дальнейшем в сложные жгуты [5], удовлетворяющие комплексу требований и стандартов [6-9].

Управляющими воздействиями служат преобразования объекта, осуществляемые в рамках преобразований подобия, не влияющими на функционал и принцип работы БС. Управляющие воздействия составляют основу процесса проектирования, и деятельность проектанта БКС ЛА заключается в интерпретации исходных данных об информационном объекте, описанном на соответствующем языке, необходимом для описания процесса проектирования.

Всё это позволяет использовать на этапе компоновки сложного жгута аппарат логики – исчисление высказываний, а при его оценивании исчисление предикатов первого порядка [10].

Предлагаемый метод инженерного управления.

В качестве метода решения задачи управления проектированием БКС ЛА в рамках точного формализма предлагается рассмотреть эти процессы с позиций теории синтеза образов У. Гренандера [11]. В рамках этих представлений строится пространственно-временной образ действий и поведения проектировщика, реализуемой в антропотехнической (человеко-машинной системе) как процесс управления этими действиями во времени. Согласно этой теории процессы управления проектированием БКС ЛА можно представить, как набор элементарных действий (образующих), выполняемых определенными способами.

В концепции синтеза образов, в нашем случае, образующими могут быть выбраны повествовательные предложения, представляющие описание простых действий, объединяемых в сложные предложения, описывающие результат действий, приводящих к получению полного набора информации об объекте проектирования путем комбинации исходных действий.

Образующие формируются путем связывания предложений с помощью синтаксических связей [12]. Правила операций над образующими в рамках исчисления высказываний являются действиями, приводящими к регулярным структурам, создаваемым в результате комбинирования действий проектировщика – его поведения. Конфигурации формируют действия, последовательное выполнение которых создаёт модель изображений, а деформации этих изображений приводят к конечному состоянию процесса проектирования.

Одними из конечных, технологически завершённых компонентов БКС ЛА являются сложные жгуты, которые в рамках синтаксического или структурного подхода представляют собой иерархическую (древовидную) структуру [13]. Образ сложного жгута образуется соединением из подобразов групп простых жгутов, целесообразных к компоновке в один сложный жгут. Подобразы групп простых жгутов можно описать еще более простыми подобразами – непосредственно простыми жгутами, рассматриваемые как неприводимые элементы.

С точки зрения логики проектирования ряд простых предложений, объединенных в сложное предложение удобно представляется в виде графа отношений изображения (модели) объекта W , в данном случае плоскостной развертки сложного жгута (рис.1)

Представленный метод управления деятельностью проектирования компонентов БКС ЛА основан на том же принципе, что использовался в работах [14, 15] для представления модели проектируемых компонентов БКС ЛА.

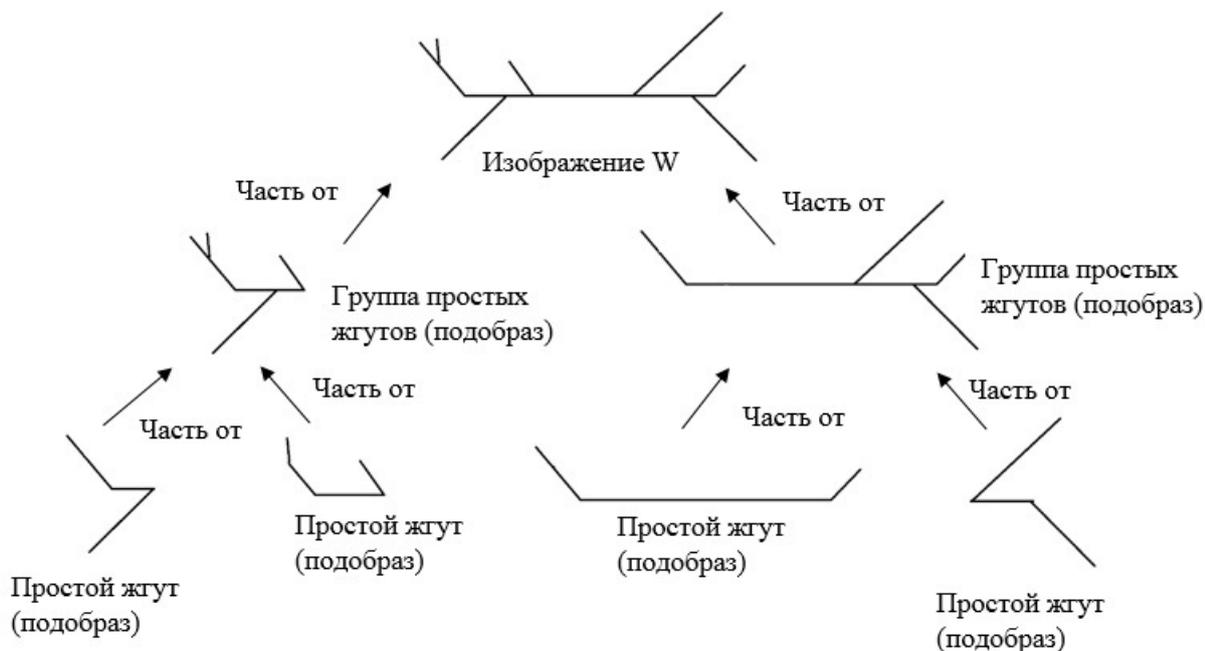


Рис.1. Граф отношений изображения W плоскостной развертки сложного жгута.

Пример метода инженерного управления проектированием.

В качестве примера рассматривается управление процессом проектирования схемы электрической соединений Э4 БКС ЛА, на основе которой составляются таблицы соединений простых жгутов. Для проектирования схемы электрической соединений БС задана схема электрическая принципиальная Э3 и задано расположение элементов, блоков, технологических разъемов, а также распределительно-коммутационных устройств в пространстве ЛА. Необходимо выполнить ряд преобразований в рамках преобразований подобия, для пространственного представления цепей из Э3 в Э4 с привязкой к реальному размещению элементов БС на борту ЛА.

Задача проектирования схемы Э4 разбивается на ряд действий по решению подзадач, описывающих действия, как повествовательные предложения:

1. Подготовительные работы по размещению условных графических обозначений (УГО) на поле схемы Э4.

1.1. Разбиение схемы Э4 на поле, составляющее ячейки, соответствующие зонам и отсекам ЛА. Нижняя часть поля схемы Э4 обозначает левый борт ЛА, верхняя часть – правый борт. Левая часть поля схемы Э4 составляет носовую зону ЛА, правая часть – хвостовую зону ЛА.

1.2 Размещение на поле схемы Э4 элементов БС согласно их реальному размещению на ЛА.

2. Непосредственные работы по соединению всех элементов на схеме Э4 согласно связям на схеме Э3.

2.1 Перенос цепей из схемы Э3 в схему Э4 согласно исходной схеме Э3.

2.2 Объединение цепей, проходящих от одного блока устройства до другого в один простой жгут и наименование простого жгута в соответствии с обозначением порядкового номера, системы к которой он относится и зоны прохождения этого жгута.

Первый и второй этап действий может быть представлен в символической форме как сложное предложение, составленное из простых предложений. Представим поле схемы Э4 в виде разлинованной сетки и дадим условные значения ячейкам (рисунок 2).

1	2	3
4	5	6
7	8	9

Рис.2. Разбивка поля схемы Э4 на условные ячейки

Данная разбивка схемы Э4 не учитывает такие зоны как основное и хвостовое оперение. Вид и дискретность поля схемы может быть задана более точно, исходя из требований точности решения задачи.

Согласно условным значениям ячеек схемы:

- левый борт будет обозначаться как $L = 1 \wedge 2 \wedge 3$;
- ось самолета будет обозначаться как $O = 4 \wedge 5 \wedge 6$;
- правый борт будет обозначаться как $R = 7 \wedge 8 \wedge 9$;
- носовая часть будет обозначаться как $N = 1 \wedge 4 \wedge 7$;
- центральная часть будет обозначаться как $C = 2 \wedge 5 \wedge 8$;
- хвостовая часть будет обозначаться как $X = 3 \wedge 6 \wedge 9$.

Всё пространство ЛА можно представить в виде $X = (L \wedge O \wedge R) \vee (N \wedge C \wedge X)$.

Алгоритм размещения в необходимой ячейке элемента x БС ($x \in X$) из множества элементов схемы Э3 БС X принимает следующий вид:

- $\neg(x \in 1) \wedge (x \in 2) \wedge (x \in 3) \rightarrow x \in R$;
- $\neg(x \in 4) \wedge (x \in 5) \wedge (x \in 6) \rightarrow x \in O$;
- $\neg(x \in 7) \wedge (x \in 8) \wedge (x \in 9) \rightarrow x \in L$;
- $\neg(x \in 1) \wedge (x \in 4) \wedge (x \in 7) \rightarrow x \in N$;
- $\neg(x \in 2) \wedge (x \in 5) \wedge (x \in 8) \rightarrow x \in C$;
- $\neg(x \in 3) \wedge (x \in 6) \wedge (x \in 9) \rightarrow x \in X$.

Данные высказывания, состоящие из сложных предложений, формируют образ процесса управления размещением элементов из схемы Э3 на БС в схему Э4.

Второй этап действий по проектированию схемы Э4, а именно работы по соединению всех элементов на схеме Э4 согласно связям на схеме Э3 и перенос цепей из схемы Э3 в схему Э4, осуществляется по двум правилам:

1. Если цепь (имя провода) v_i принадлежит элементу x из Э3, то элементу x' из Э4 также принадлежит данная цепь (провод) v_i .

Примечание: элементы x и x' это одни и те же элементы, отличающиеся лишь в том, что для последнего на Э4 указывается местоположение в монтажном пространстве ЛА.

2. Если группа цепей (имена проводов) v_1, v_2, \dots, v_n принадлежит элементу x_1' и та же группа цепей принадлежит элементу x_2' то данные цепи объединяются в цепь V_1 с присвоением ей номера простого жгута.

Данные высказывания можно формализовать используя символьную логику:

$$1. v_i \in x_i = v_i \in x_i'$$

$$2. (v_1 \in x_1) \wedge (v_2 \in x_1) \wedge (v_1 \in x_1') \wedge (v_2 \in x_1') \rightarrow v_1, v_2 \in V_1$$

Таким образом, исчисления высказываний в символьной логике представляют корректную модель процесса проектирования БКС ЛА на примере проектирования схемы Э4, которая в рамках теории образов представляется как изображение – некоторая абстракция, перевод которой в конкретность – реальную конструкцию сложного жгута требует учета ограничений – деформаций.

Реальный процесс управления проектированием связан с различными видами деформаций предложенной модели, сформулированными в нормативно-технической документации (ОСТ, ГОСТ и РТМ) на БКС ЛА.

Теоретический базис процесса управления проектированием позволяет добавить в существующие CAD/CAE/CAM фрагменты алгоритмизации, построенные на базе основных положений символьной логики, что позволяет описать образ действий проектировщика в рамках концепции точного формализма, а на его базе охарактеризовать поведение проектировщика, учитывающее ограничения.

Список использованной литературы:

1. ГОСТ 2.701-2008. Единая система конструкторской документации. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению. М.: Стандартинформ 2009. 13 с

2. Авиационно-космическое машиностроение [Текст]: международная энциклопедия CALS-технологий / гл. ред. Братухин А. Г. - Москва : Науч.-исслед. центр автоматизированных систем конструирования (НИЦ АСК), 2015. - 608 с. : ил., цв. ил., табл.; 27 см.

3. Бакаев В.В., Судов Е.В., Гомозов В.А. и др. Информационное обеспечение, поддержка и сопровождение жизненного цикла изделия // Под ред. В.В. Бакаева. М.: Машиностроение-1, 2005. 624 с, ил.
4. Абросимов, С.Н. Основы компьютерной графики САПР изделий машиностроения (МСAD): учебное пособие / С.Н. Абросимов; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2014. – 206 с.
5. Коптев А.Н., Миненков А.А., Марьин Б.Н., Иванов Ю.Л. Монтаж, контроль и испытания электротехнического оборудования ЛА. М: Машиностроение, 1998. 296 с.
6. РТМ 1.4.1028-2003. Изготовление и контроль электрожгутов. М.: НОАО НИАТ, 2003. 193 с.
7. ОСТ 1 00239-77. Сети электрические бортовые летательных аппаратов. Требования к электрическим жгутам. М.: Стандартиформ, 1977. 13 с.
8. Биктулов С.В., Чупахин Я.Н. Разработка высокотехнологичных бортовых кабельных сетей // «Известия СНЦ РАН» том 16, № 1 (5), 2014.
9. Биктулов С.В. Разработка технологичных электрических жгутов бортовых кабельных сетей // «Известия СНЦ РАН» том 18, № 4 (3), 2016.
10. Гринченков Д.В., Куций Д.Н. Логика высказываний и булевы алгебры: учебное пособие / ЮжноРоссийский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова.- Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2016. – 82 с.
11. Гренандер У. Лекции по теории образов. Синтез образов. Том 1. Москва: МИР, 1979. – 432 с.
12. Столл, Р. Множества. Логика. Аксиоматические теории. М.: Просвещение, 1968. – 232 с.
13. Фу.К. Структурные методы распознавания образов Перевод с англ. Н.В. Завалишина [и др.] ; Под ред. М.А. Айзермана. - Москва : Мир, 1977. - 319 с. : ил.; 22 см.
14. Коптев А.Н., Мясников А.Ю. Теоретические основы проектирования простых жгутов бортовой кабельной сети летательных аппаратов // Вестник Самарского университета. Авиационная и ракетно-космическая техника. 2019. Т.18, №4. С. 76-86.
15. Коптев А.Н., Мясников А.Ю. Концептуальные основы проектирования сложных жгутов бортовой кабельной сети летательных аппаратов // Вестник Самарского университета. Авиационная и ракетно-космическая техника. 2020. Т.19, №2. С. 19-30.

Инженерное управление функциональным состоянием бортовых систем передачи информации

Ю.В. Мясникова

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34.

В статье рассматривается вопрос теории и практики оценивания функциональных состояний объектов производства и процессов оценки, на базе которых строится их оценивание, образов структуры связи этих состояний в целостной комбинаторной функции. Приведен метод формализации объектов и декомпозиции сложных схем на модули для целей оценивания состояния объектов бортового комплекса оборудования

Ключевые слова: *бортовой комплекс оборудования, функциональное состояние, оценивание, электрические сети.*

Бортовой комплекс оборудования (БКО) современных воздушных судов, состоящий из большого числа электрических и электрифицированных систем, представляет собой подсистему, одним из важнейших элементов которой является бортовая кабельная сеть, построенная как физический объект, реализующий функциональные вопросы интеграции БКО. В бортовой сети закладываются существенные свойства для поддержания функциональных свойств при данном наборе электротехнических материалов, как основания для создания бортовой сети, обладающей заданными функциональными свойствами. Для осуществления своих функций бортовая сеть переходит в различные состояния, называемыми функциональными. Контроль этих состояний пронизывает все процессы создания и жизненного цикла систем, обладающих заданными функциональными свойствами.

Технологические процессы контроля, диагностики и испытаний при производстве летательных аппаратов, их систем и агрегатов, включая технологию и средства функционального контроля и испытаний БКО летательных аппаратов (ЛА) являются важным фактором повышения надежности и эффективности систем управления качеством. Решение задачи совершенствования высокоавтоматизированных методов, а также самих технических средств и программного обеспечения для контроля, испытаний и измерения физических параметров объектов БКО ЛА становится определяющим фактором в обеспечении эффективного

управления качеством бортового электротехнического оборудования [1, 2, 3, 4].

Основными направлениями в решении этой задачи являются повышение эффективности систем управления качеством на основе совершенствования методов функционального контроля при производстве бортовых электрических систем ЛА, разработка новых методов и средств испытаний и измерения физических параметров и реализации функционального контроля объектов БКО, использование достижений в области искусственного интеллекта, а именно распознавание образов (состояния), как теоретической базы развития всех составляющих системы управления качеством [2].

Задача формального описания и обработки объектов БКО ЛА.

Решение проблемы повышения качества объектов БКО базируется на теоретических разработках основополагающих принципов оценивания качества, как процедуры принятия решений, которая базируется на оценках параметров отдельных компонентов агрегатов и систем.

Для исследования структуры объектов БКО ЛА строятся модели с использованием четырех принципов теории образов У. Гренандера [5]:

1) модели строятся из выделенных компонент – формальных образующих этих объектов A ;

2) формальные соединения образующих между собой осуществляются по определенным правилам R ;

3) регулярные конфигурации $b(R)$, получаемые в результате формальных соединений образующих, являются абстрактными моделями агрегатов и систем БКО ЛА, т.е. формальным описанием объекта исследования;

4) процесс преобразования описывает отклонения от идеального состояния, переводя абстрактные модели в реальные с помощью регулярного механизма деформации,

На базе теории образов и этих принципов любой объект БКО есть множество модулей A , состоящее из непересекающихся классов A^α , $A^\alpha \subset A$, где α – общий индекс, индекс класса модулей

$$A = \bigcup A^\alpha, A^\alpha - \text{непересекающиеся классы.} \quad (1)$$

Синтаксический подход к распознаванию образов позволяет описать большое множество объектов и систем БКО путем использования небольшого множества образующих, из которых построены их конфигурации (цепи).

Задача распознавания функционального состояния объекта БКО состоит в структурном сравнении образа этого объекта X , построенного на базе оценок состояний множества цепей, с «эталоном» - преобразом объекта Y , построенным заранее. Алгоритм сравнения отрабатывается программой с необходимым, желательно минимальным алгоритмическим

количеством информации. Программа контроля должна строиться на основе лингвистических и знаковых структур, тогда она выполняет функции моделирования результата процесса, что приводит либо к построению образа объекта X , либо построению процесса сравнения с пробразом объекта Y (эталона), представленных системой упорядоченных пар $\langle X, \leq \rangle, \langle Y, \geq \rangle$, каждая из которых является функцией $f(x)$ или $f(y)$ для цепи из X - x и Y - y соответственно. Функция f введена для операций оценивания, f определена на множестве X , со значениями в множестве Y , или в символическом виде:

$$f: X \rightarrow Y. \quad (2)$$

Для оценивания соответствия образа X (множества цепей) образу Y используется понятие взаимно-однозначной функции:

$$f(x) = f(y) \text{ влечет } x = y. \quad (3)$$

Ввиду полной симметричности, возникающей при взаимно-прозрачном отображении множества X на Y , в случае (3) X и Y находятся во взаимно-однозначном соответствии, либо наоборот, если

$$f(x) \neq f(y) \text{ влечет } x \neq y. \quad (4)$$

Эта процедура определяет соответствие образа, состоящего из множества цепей, эталону.

Математическим эквивалентом объекта БКО является сложное пространство-структура, состоящее из монтажных точек m_i и отрезков L_i , соединяющих их. Физические свойства компонентов включены в отображения: каждая точка m_i подмножества \mathcal{M}_q является узлом соединения или монтажной точкой, множество которых определяет монтажное пространство объекта; отрезки L_i подмножества \mathcal{L}_q являются образами электрических проводников.

Цепь выглядит как запись формальной линейной суммы

$$C^1 = m_1 L_1^1 + m_2 L_2^1 + \dots + m_\alpha L_\alpha^1, \quad (6)$$

где C – цепь, граница которой определяется как:

$$\partial C^1 = \sum_{k=1}^{\alpha} m_k \partial L_k^1. \quad (7)$$

С формальных позиций объект или система БКО представляет

множество цепей и является топологической структурой (геометрическим комплексом K):

$$C^1(K) = \sum \left\{ \sum_{k=1}^{\alpha} m_k \partial L_k^1 \right\}. \quad (8)$$

Предложенная модель позволяет сформировать описание структурных признаков объектов БКО, их характеристик и особенностей строения. Основой модели являются упорядоченные множества, цепи, геометрические комплексы, как множество графов, описываемых заданным набором ветвей. Представление реальных объектов сетью из ориентированных графов, построенных по принципиальной схеме, обеспечивает решение задачи декомпозиции – разбиения объекта на сильные компоненты в рамках структурного подхода к построению образов объектов или систем БКО, что существенно упрощает синтез программ контроля и испытаний.

Декомпозиция сложного объекта БКО в целях оценивания состояния.

Исходной информацией является набор технической документации к объекту или системе БКО ЛА (электрические схемы Э1, Э2, Э3, Э4). Документация подвергается предварительной обработке, в процессе которой происходит формальное представление объекта или системы БКО как регулярной структуры, построение структурной модели с использованием регулярных выражений на языке недетерминированных конечных автоматов. Такое описание позволяет представлять объект в различных состояниях с помощью регулярных выражений, используемых для сравнения выходных сигналов объектов с их эталонами, чтобы выявить наличие или отсутствие эквивалентности. Используемая последовательность процедур представляет собой алгоритм, который позволяет осуществить переход от ручного контроля к автоматизированному способу оценивания функционального состояния агрегатов и систем БКО, что в итоге снижает трудоемкость, временные и денежные затраты при производстве БКО ЛА.

Для описания образа электротехнического объекта используем его представление графом, а для реализации алгоритмов нахождения модулей – матричное представление. Использование графового представления и матриц дает преимущество для адекватного описания конкретного объекта, состоящего из множества элементов и связей между ними [6, 7]. Разбиение на функциональные модули производится на основе построенного графа объекта (модели) путем поэлементного умножения матрицы связей между элементами $R(x_i)$ и матрицы контрдостижимостей элементов $Q(x_i)$ $R \otimes Q$ с преобразованием посредством транспонирования строк и столбцов в блочно-диагональную матрицу, подматрицы которой

соответствуют сильной компоненте графа – функциональному модулю объекта.

Модуль описывает конкретный набор связей между элементами объекта БКО и определен конкретным состоянием из множества возможных состояний этого модуля. Так как каждый модуль включает в себя функционально законченную часть схемы, это определяет основные требования к построению системы контроля [8, 9].

Определение функционального состояния объекта БКО.

Решение задачи распознавания состояния объектов и его компонентов базируется на структурном методе, который опирается на топологический анализ и теорию графов. Возбужденное состояние объектов и их модулей характеризуется величинами параметров точки воздействия и реакций на них. Отклики на воздействия связаны и со структурой функциональных частей объекта, и с процессами, которые в них протекают.

Сигналы на выходе объекта БКО зависят от воздействия на его вход сигналов, приходящих из системы контроля и диагностики (СКД). Состояние, т.е. образ каждой конфигурации, может быть описано образующими, входящими в множество A , признаками которых являются двоичные переменные (0 и 1). Чтобы определить возбужденное или невозбужденное состояние конфигурации (модуля) используются булевы переменные, учтенные в произвольная булевой функции φ , заданной переменными f

$$\varphi = \bigwedge_{b \in B} \left(\bigwedge_{a \in A} f^{e_{ab}} \right) \quad (9)$$

в конъюнктивной форме, показатели степени принимают значения 1, 0, -1, при этом полагают $f^1=f$, $f^{-1}=\sim f$, f^0 – не встречаются. Значения этих функций определяются специальными операторами – логическими операторами F_L . F_L относят состояния конфигурации к «норме» - 1 или «ненорме» - 0. Операторы действия являются составляющими алгоритма, их объединение будет описывать программу контроля и испытаний. Логические операторы реализуются в конечных автоматах, которыми по сути являются функциональные модули, так как для каждого регулярного выражения однозначно находится определяющий его конечный автомат с минимальным числом состояний.

Оценка функционального состояния объектов БКО представляет собой процесс распознавания образов, в котором используется алгоритм сравнения. С общих позиций задача контроля состояния объекта БКО ставится как теорема, которую необходимо доказать на основе аксиом счисления состояния, т.е. ответ о состоянии представляется в такой форме:

$$S_K = F_1(x, F_2(x, \dots, F_{n-1}(x, F_n(x, S_H)) \dots)) = F_1 F_2 \dots F_n(x, S_K).$$

(10)

Это выражение есть решение задачи контроля, поставленной в числении состояний, где S_K – множество конечных состояний конкретного объекта БКО, S_H – начальное состояние конкретного объекта, x – элемент множества цепей конкретного модуля, F – множество операторов.

Работу функциональных модулей выражается с помощью формул двужначной логики высказываний и функций высказываний. Вход в модульную сеть объекта БКО осуществляется входными модулями программы за все время контроля до данного момента t , и описывается таблицей 1, у которой столбцы соответствуют входным модулям программы, а строки – прошедшими моментами времени $t-1, t-2, \dots$ и т.д. [10].

Таблица 1. Таблица входа

	Цепь модуля			
	a_1	a_2	...	a_n
$t-1$	1	0	...	0
$t-2$	1	1	...	0
...
$t-n$	0	1	...	1

Воздействие происходит через входные связи модуля объекта. Характер этого воздействия формируется на основе преобразования подобия модуля программы контроля в СКД в электрический параметр.

Программа контроля объекта (системы) БКО охватывает класс возможных таблиц входов, описывающих входы модулей за все время.

Решение проблемы оценивания функционального состояния объектов или систем БКО ЛА в широком спектре может быть реализовано в рамках технологии виртуальных приборов National Instruments, как удобного подхода к системам измерений. На базе среды LabVIEW сконструирован язык программы контроля, реализуемой в СКД. Программа состоит из нескольких вложенных контуров: циклов, различных блоков, которые обеспечивают необходимые режимы контроля и испытаний состояния.

Основные результаты и выводы.

В работе формализовано представление сложных объектов контроля и диагностики на этапах предварительной обработки, декомпозиции, синтеза технологических операций. Разработан алгоритмический подход к решению задач синтеза множества образов для класса объектов БКО, лежащий в основе универсальной модели описательных языков. Предложен метод декомпозиции сложных объектов электротехнического оборудования летательных аппаратов, позволяющий повысить

эффективность технологии функционального контроля на основе полного описания функциональных состояний. Разработана методика проектирования программ контроля и испытаний объектов и систем БКО ЛА для распознавания их состояния, позволяющая решать эту задачу на основе предложенного аксиоматического подхода в рамках теории образов, лежащей в основе инженерного управления с применением современных средств автоматического контроля.

Список используемой литературы:

1. Коптев, А.Н. Монтаж, контроль и испытания электротехнического оборудования ЛА [Текст] / А.Н. Коптев, А.А. Миненков, Б.Н. Марьин, Ю.Л. Иванов. - М.: Машиностроение, 1998. - 296 с.

2. Александровская, Л. Н. Системный подход в обеспечении качества испытаний изделий авиакосмической техники [Текст] / Л. Н. Александровская, А. В. Кириллин. – М.: Изд. МАИ, 2017. – 160 с.

3. Коптев, А. Н. Теория и практика контроля и испытаний систем авиационной техники [Текст] / А.Н. Коптев, В.А. Прилепский. Самара, СГАУ - 2010.

4. Прилепский, В.А. Проблемы и методы решения задач контроля и испытаний бортовых кабельно-жгутовых сетей автономных объектов / Прилепский В.А., Прилепский И.В., Миненков А.А. // Известия СНЦ РАН. - 2016. - № 3. - С. 54-60.

5. Гренандер, У. Лекции по теории образов. Анализ образов. Том 2. Москва: МИР, 1981.

6. Кристофидис, Н. Теория графов. Алгоритмический подход [Текст] / Н. Кристофидис. - М.: Мир, 1978. - 432 с.

7. Марченков, С.С. Конечные автоматы [Текст] / С.С. Марченков. - М.: Физматлит, 2008. – 56 с.

8. Мясникова, Ю.В. Метод и алгоритм декомпозиции в задачах синтеза программ контроля сложных объектов электротехнического оборудования // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16. №2. С. 172-182.

9. Коваленко, Ю.В. Проблемы автоматизации проектирования программ контроля и испытаний сложных последовательностных автоматов // Сборник трудов XVIII Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. Ч. 2. . 2016. С. 100-102.

10. Мясникова, Ю.В. Методика оценки технического состояния объектов технического обслуживания перспективных авиационных комплексов / Мясникова, Ю.В., Коптев А.Н., Куртаев С.Ж. // Актуальные проблемы современной науки: сборник статей XI Международной научной конференции, Актобе: Принт-А, 2017. С. 228-231.

Система Femap with NX Nastran как инструмент для оценки достоверности результатов численного эксперимента в среде программы APM FEM в КОМПАС-3D

С. П. Марков, В.Б. Распопина

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Для оценки достоверности результатов численного эксперимента, выполненного с помощью системы APM FEM, интегрированной в CAD программу КОМПАС-3D, был решена тестовая задача. В задаче рассчитано цилиндрическое соединение с натягом. Задача решена аналитически и используя возможности программного продукта Femap with NX Nastran. Полученные при этом результаты были сопоставлены с соответствующими значениями, полученными с помощью системы APM FEM. Численные значения оказались идентичными.

Ключевые слова: CAD программа, цилиндрическое соединение с натягом, аналитическое решение, автоматизированный расчёт, радиальные напряжения, тангенциальные напряжения; численный эксперимент

Система APM FEM интегрирована в CAD программу КОМПАС-3D. Она представляет собой инструмент для подготовки и последующего конечно-элементного анализа трехмерной твердотельной модели, геометрия и материал которой формируется в среде программы КОМПАС-3D [6].

В некоторых случаях решение инженерных задач требует быстрой и достоверной оценки картины распределения напряжений и деформаций в рассчитываемой конструкции [5]. Логично предположить, что возможности программы КОМПАС-3D с встроенной в неё системой APM FEM позволяют добиться этого. Однако необходимо убедиться в корректности получаемых при этом результатов.

Для этого была рассмотрена тестовая задача. В качестве тестовой задачи выбран расчёт цилиндрического соединения с натягом. Существует методика типового расчёта цилиндрического соединения с натягом, подробно описанная в курсах «Сопротивление материалов» [1] и «Детали машин» [2].

В основе аналитического решения задачи о расчёте цилиндрического соединения с натягом лежат математический аппарат сопротивления

материалов, обусловленный методами теории упругости. В рамках такой модели наряду с расчётными формулами построены эпюры радиальных напряжений σ_r и тангенциальных напряжений σ_t (рис. 1). Охватываемая деталь в соединении полая, то есть её поперечное сечение обладает двумя размерами: внутренним диаметром d_1 и внешним диаметром d . Соответственно, сечение охватывающей детали определяется внутренним диаметром $D=d$ и внешним диаметром D_2 . Для охватывающей детали опасными являются точки, принадлежащие внутренней поверхности. Эти точки находятся в плоском напряжённом состоянии (см. рис. 1).

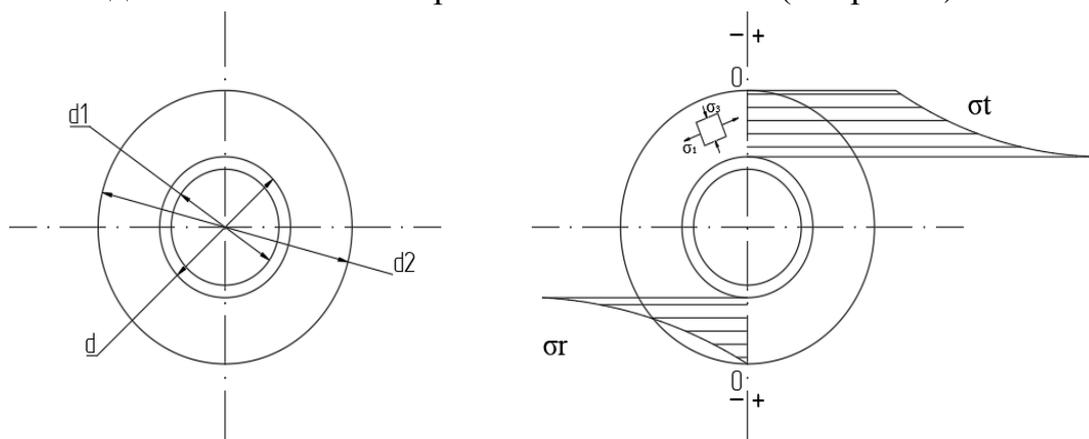


Рис. 1. Модель напряжённого состояния для типового цилиндрического соединения с натягом

В качестве рассчитываемого цилиндрического соединения с натягом взято соединение, геометрические параметры которого представлены на рис. 2.

Для определения контактного (посадочного) давления в соединении было выполнено два решения.

Исходные данные:

Обхватываемая деталь 13X15H4AM3Ш: $\sigma_{0,2}=920\text{МПа}$; $E_d=1,9 \cdot 10^5\text{МПа}$; $\mu_d=0,25$

Обхватывающая: $\sigma_T=450\text{МПа}$; $E_D=0,72 \cdot 10^5\text{МПа}$; $\mu_D=0,33$; $\sigma_B=600-620\text{МПа}$

Диаметры: $D_{\min}=34\text{мм}$; $D_{\max}=34,039\text{мм}$; $d_{\min}=34,06\text{мм}$; $d_{\max}=34,099\text{мм}$

Максимальный натяг: $N_{\max} = 0,099\text{ мм}$

Контактное давление (решение 1 (формула Ляме)):

$$p = \frac{N}{d \cdot \left(\frac{C_D}{E_D} + \frac{C_d}{E_d} \right)} = \frac{99 \cdot 10^{-6}}{34 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{2,0525}{0,72 \cdot 10^5} + \frac{4,965}{1,9 \cdot 10^5} \right)} = 53291424 \text{ Па} \approx 53,3 \text{ МПа.}$$

Контактное давление (решение 2):

$$p_c = \frac{\frac{\delta}{2}}{\frac{r_c}{E_1} \cdot \left(\frac{1 + k_1^2}{1 - k_1^2} - \mu_1 \right) + \frac{r_c}{E_2} \cdot \left(\frac{1 + k_2^2}{1 - k_2^2} + \mu_2 \right)}$$

$$= \frac{\frac{0,099}{2}}{\frac{17}{190\,000} \cdot \left(\frac{1 + 0,824^2}{1 - 0,824^2} - 0,25 \right) + \frac{17}{72\,000} \cdot \left(\frac{1 + 0,515^2}{1 - 0,515^2} + 0,33 \right)}$$

$$= 53,29 \text{ МПа}$$

$$p_c = \frac{\frac{\delta}{2}}{\frac{r_c}{E_1} \cdot \left(\frac{1 + k_1^2}{1 - k_1^2} - \mu_1 \right) + \frac{r_c}{E_2} \cdot \left(\frac{1 + k_2^2}{1 - k_2^2} + \mu_2 \right)}$$

$$= \frac{\frac{0,099}{2}}{\frac{17}{190\,000} \cdot \left(\frac{1 + 0,824^2}{1 - 0,824^2} - 0,25 \right) + \frac{17}{72\,000} \cdot \left(\frac{1 + 0,515^2}{1 - 0,515^2} + 0,33 \right)}$$

$$= 53,29 \text{ МПа}$$

Напряжения в охватывающей детали:

Внутренний слой: $r = r_c$

$$\sigma_r = \frac{r_c^2}{r_2^2 - r_c^2} \left(1 - \frac{r_2^2}{r^2} \right) p_c = -53,29 \text{ МПа};$$

$$\sigma_\theta = \frac{r_c^2}{r_2^2 - r_c^2} \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2} \right) p_c = 91,79 \text{ МПа}.$$

Внешний слой: $r = r_2$

$$\sigma_r = \frac{r_c^2}{r_2^2 - r_c^2} \left(1 - \frac{r_2^2}{r^2} \right) p_c = 0;$$

$$\sigma_\theta = \frac{r_c^2}{r_2^2 - r_c^2} \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2} \right) p_c = 38,5 \text{ МПа}.$$

Напряжения в охватываемой детали:

$$\sigma_r = -p_c = -53,29 \text{ МПа};$$

$$\sigma_\theta = -p_c = -53,29 \text{ МПа}.$$

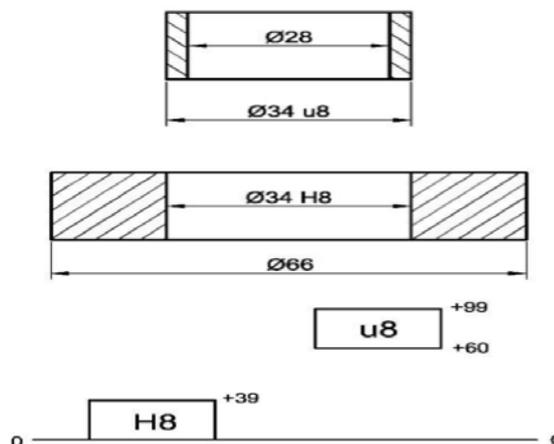


Рис. 2. Параметры цилиндрического соединения с натягом

Аналитическое решение дало результат, соответствующий и качественно, и количественно, теоретической модели напряжённого состояния для деталей соединения с натягом, рис. 3.

Для этого же соединения была сформирована конечно-элементная модель, используя соответствующие возможности программного продукта Femap with NX Nastran [3].

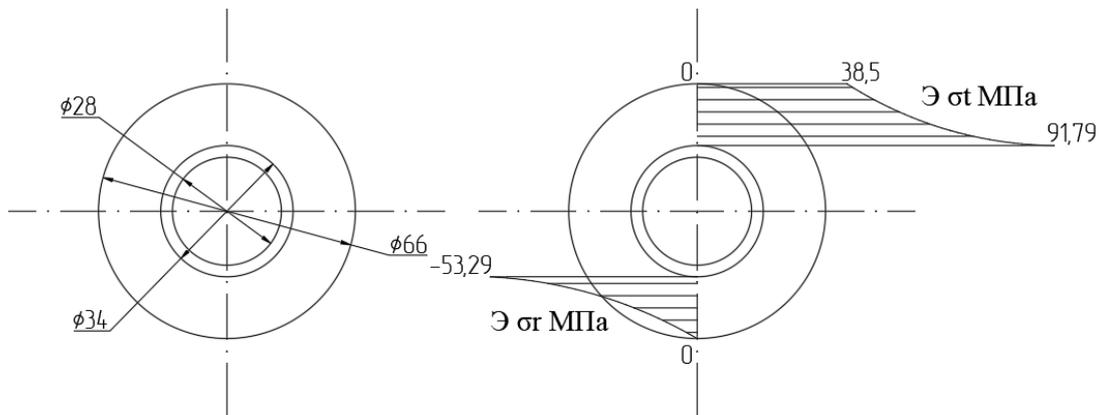


Рис. 3. Результаты аналитического расчёта тестового примера

Для работы над конечно-элементной моделью удобен формат представления исходных данных, показанный на рис. 4.

Модель выполнена в виде сектора 60° , для оптимизации её параметров (рис. 5).

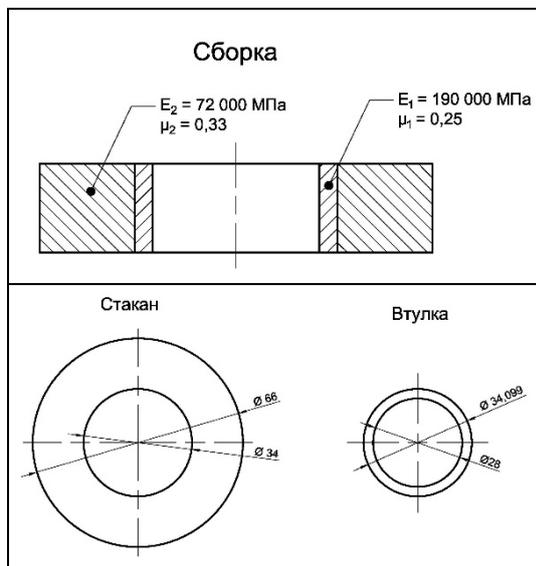


Рис. 4. Исходные данные для конечно-элементного моделирования

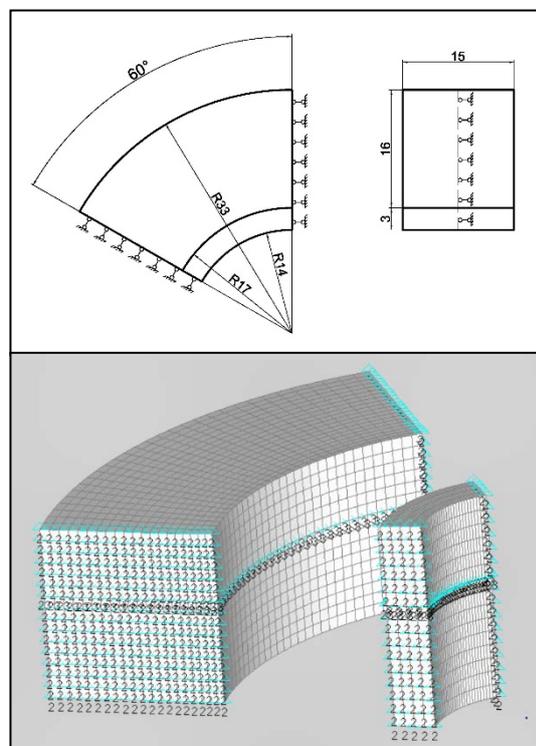


Рис. 5. Граничные условия модели цилиндрического соединения с натягом

На модель накладываются следующие граничные условия (см. рис. 5):

1) ограничения в тангенциальном направлении на двух боковых стенках, для того, чтобы модель 60° была эквивалентна полной модели (360°);

2) ограничение в осевом направлении для центрального (или близкого к нему) слоя, для того, чтобы зафиксировать модель в пространстве.

В радиальном направлении ограничений нет.

Контактное давление в полученной модели $p \approx 53,2$ МПа (рис. 6), что практически совпадает с давлением, полученном аналитическим путем $p \approx 53,2$ МПа. Есть незначительная область внутренней поверхности соединения, по которой наблюдается отклонения от аналитической модели. Это отклонение, прогнозируемо, обусловлено особенностью геометрии конечно-элементной модели соединения.

Анализ полей распределения радиальных напряжений (рис. 7, а) и касательных напряжений (рис. 7, б) показывает полное совпадение значений этих напряжений на поверхностях со значениями соответствующих напряжений, полученными аналитически.

В соответствии с аналитической моделью внутренние точки объёма охватывающей детали находятся в плоском напряжённом состоянии (см. рис. 7). Результаты конечно-элементного анализа эту модель подтверждают (рис. 8). Карта распределения напряжений σ_z по высоте демонстрирует их неизменность и цветовое решение соответствует численному значению, стремящемуся к нулю.

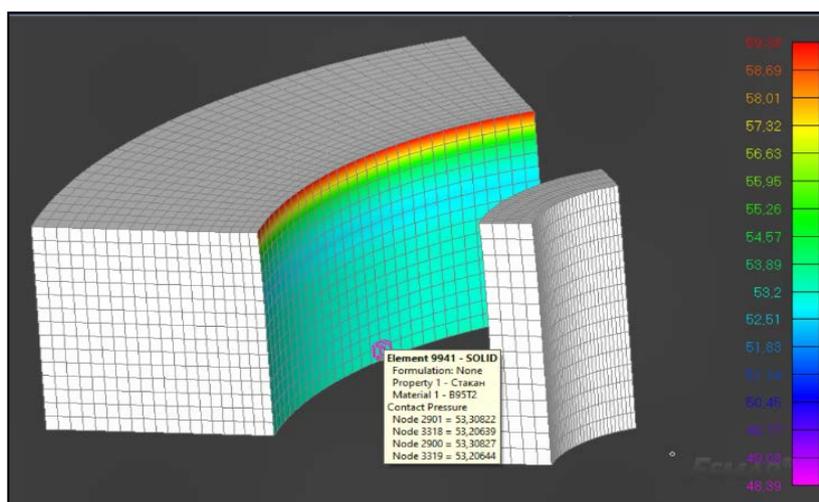


Рис. 6. Контактное давление в соединении

По понятным причинам карта распределения напряжений по контактной поверхности у этой детали отличается. Уже хотя бы потому что конечно-элементная модель точнее отображает физику процесса [4], и, соответственно, отображает влияние трения на точки поверхности

контакта в направлении высоты. Этот фактор отсутствует в аналитической модели.

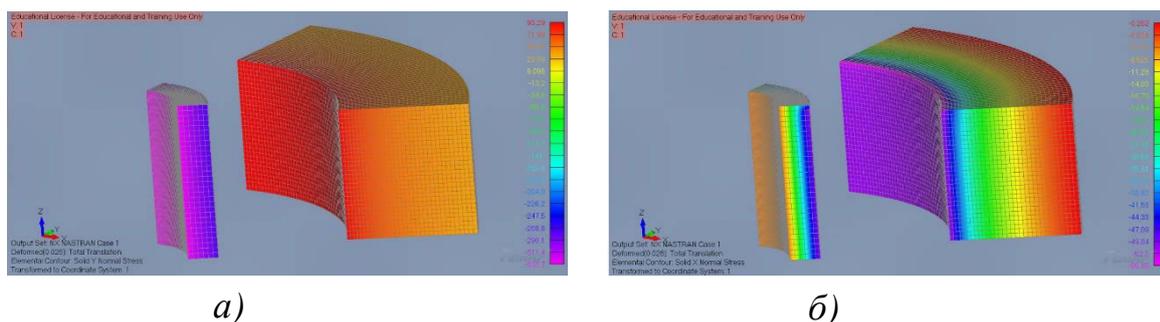


Рис. 7. Поля напряжений охватывающей детали: *a* – поле тангенциальных напряжений; *б* – поле радиальных напряжений

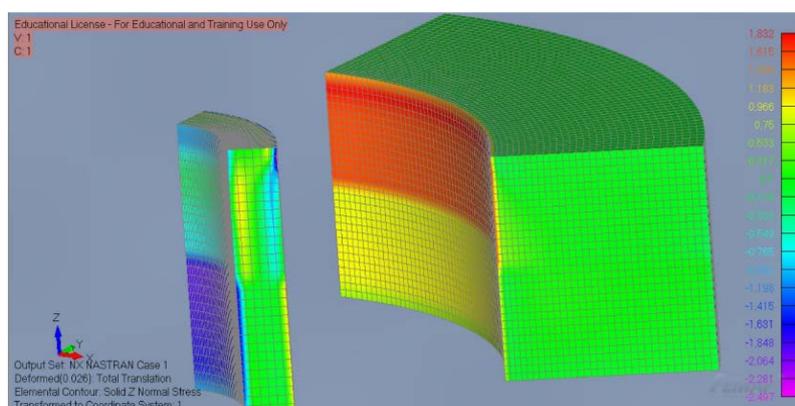


Рис. 8. Поля распределения напряжений σ_z

Необходимо заметить, что инструментарий системы Femap with NX Nastran позволяет получить на столько достоверную модель объекта исследования, что значения параметров состояния при этом будут соответствовать значениям физически реального прототипа..

Для качественной оценки напряжённого состояния детали достаточно выполнить конечно-элементный экспресс анализ. Органично для этого подходит система APM FEM, интегрированная в программный CAD комплекс КОМПАС-3D. Инструментарий APM FEM ориентирован на подготовку и последующий конечно-элементный анализ трехмерной твердотельной модели как детали, так и сборки.

Чтобы не сомневаться в корректности моделей и соответствующих результатов, полученных в этой среде, был выполнен анализ охватывающей детали соединения с натягом из тестовой задачи для сравнения с результатами, полученными аналитически и в программе Femap with NX Nastran. В силу особенностей инструментария программы APM FEM силовое воздействие на контактную поверхность детали было схематизировано в виде распределённой по поверхности контакта нагрузки, равной контактному давлению, вычисленному аналитически с помощью формулы Ляме.

На модель Kompas3D накладываются следующие граничные условия:

1) ограничения в тангенциальном направлении на двух боковых стенках, для того, чтобы модель 90° была эквивалентна полной модели 360° ;

2) ограничение в осевом направлении внутреннего слоя втулки для того, чтобы зафиксировать модель в пространстве;

3) граничное условие для совпадающих поверхностей стакана и втулки "жесткий контакт" для моделирования натяга (данный тип контакта будет передавать от одной детали к другой и нормальные, и касательные усилия);

4) в радиальном направлении ограничений нет.

Граничные условия модели Kompas3D представлены на рисунке 9.

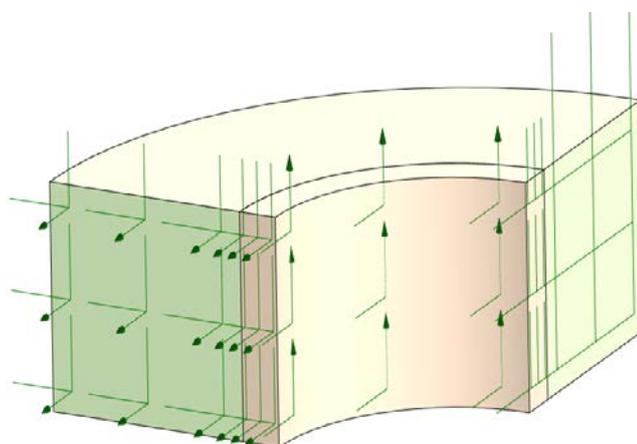


Рис. 9. Модель граничных условий в среде Kompas3D

Для чистоты эксперимента в качестве сопоставляемого параметра состояния прочности выбрано эквивалентное напряжение, определённое по теории прочности Мизеса (рис. 10).

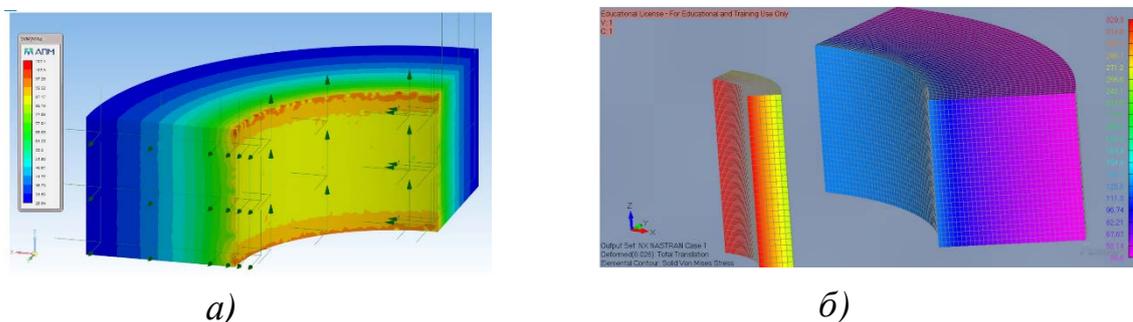


Рис. 10. Поля распределения эквивалентных напряжений:
a – напряжения в программном комплексе КОМПАС-3D
б – напряжения в программе Femap with NX Nastran

Сопоставление полученных полей напряжений показывает, что качественно и количественно картины распределения эквивалентных

напряжений, построенные в обеих программах, совпадают. Поскольку корректность модели, построенной в среде программы Femap with NX Nastran, была обоснована выше, то логично предположить, что модель, сформированная и просчитанная в системе КОМПАС-3D так же достоверно для общего понимания картины описывает параметры состояния прочности.

Следовательно, возможностей системы КОМПАС-3D для качественного конечно-элементного экспресс анализа параметров состояния прочности стакана, обусловленных конструктивными характеристиками узла, вполне достаточно.

Список использованной литературы:

1. Биргер И. А., Мавлютов Р. Р. Сопротивление материалов. М.: Изд. МАИ, 1994, 512 с.
2. Гузенков П. Г. Детали машин. М.: Высш. шк., 1986, 395 с.
3. Рычков С. П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. М: ДМК Пресс, 2013, 784 с.
4. Использование программ инженерного анализа при изучении курса сопротивления материалов / Дружинина Т.Я., Распопина В.Б. / Вестник Иркутского государственного технического университета. - 2005. - №01 (21). - С. 87-91.
5. Оценка параметров прочности шатуна ДВС в автоматизированной среде модуля APM Structure 3D системы APM WinMachine / Распопина В.Б., Бодров Е.А., Ковалёв А.А. / Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2011. - №01 (1). – С. 125-137
6. Конечно-элементный анализ в САПР Компас-3Dv.13 [электронный ресурс] – URL: <https://cadregion.ru/kompas-3d/konechno-elementnyj-analiz-trekhmernoj-tverdotelnoj-modeli-detali-ili-sborki-v-sapr-kompas-3d-v-13.html> (дата обращения 02.05.2020)

УДК 621.81.(075.8)

Качественная оценка напряжённого состояния детали авиационного узла с помощью системы APM FEM в КОМПАС-3D

Л. И. Шеметов, А. О. Гаврилова, Д. А. Фролов

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Сформирована CAD-CAE модель детали авиационного узла с целью выявления возможных причин её разрушения. Для построения 3Dмодели была использована система Siemens NX 10. Для осуществления

качественной оценки напряжённого состояния детали был произведён конечно-элементный экспресс анализ с помощью системы АРМ FEM, интегрированной в программный САД комплекс КОМПАС-3D. Полученная картина распределения напряжений по объёму детали позволяет уловить зависимость образования концентрации напряжений от силового воздействия на неё.

Ключевые слова: САД-САЕ модель, конечно-элементный экспресс анализ, цилиндрическое соединение с натягом, момент от закручивания болта, эквивалентные напряжения, карта напряжений.

Конструкция самолёта представляет собой весьма сложную структуру, взаимное влияние между элементами которой неоднозначно и меняется в зависимости от изменения режима работы конструкции. Следовательно, случаев нагружения одной и той же детали несколько, источников силового воздействия несколько и они меняются в зависимости от режима функционирования самолёта. Поэтому анализ прочности отдельных деталей конструкции самолёта представляет собой сложную задачу.

Настоящая работа посвящена выявлению возможных причин разрушения авиационной детали, вызванных механическим воздействием на неё в процессе эксплуатации самолёта. Речь идёт о детали узла крепления пилона для подвесного топливного бака. Узел интегрирован в лонжерон консоли крыла (рис. 1).

Деталь узла в работе принято называть «стаканом». Она представлена в разрезе на рис. 2. Ввиду особенностей геометрии горловины стакана рассмотрим подробно прочностные характеристики этой части стакана.

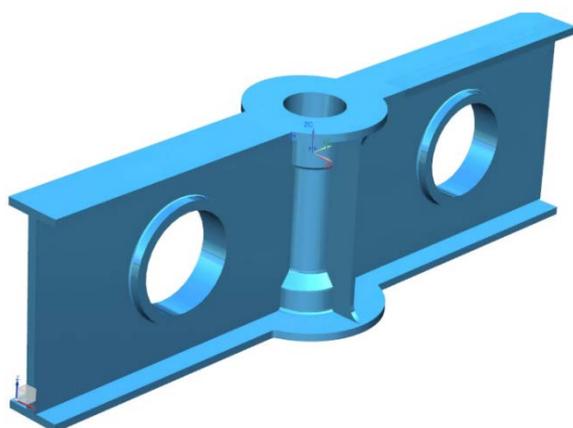


Рис. 1. Фрагмент лонжерона крыла с узлом крепления подвески

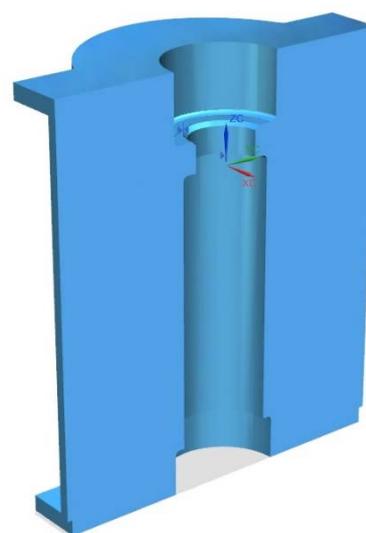


Рис. 2. Стакан в разрезе

Можно предположить, что причины, приводящие к нарушению целостности детали могут иметь разную природу. В частности, это может быть:

- нарушение технологии изготовления;
- несоблюдение заданных геометрических параметров детали при изготовлении;
- не все факторы, обуславливающие внешние нагрузки на деталь, учтены;
- т.д.

Поскольку явной причиной изменения параметров напряжённо-деформированного состояния стакана является механическое воздействие на него, была поставлена задача, определить все возможные причины внешних нагрузок на стакан и схематизировать их.

Природу силового воздействия на стакан можно разделить на две составляющие. Первая составляющая, обусловлена конструктивными характеристиками узла: цилиндрическое соединение с натягом втулки и горловины стакана и затяжка болта по высоте стакана (рис. 3, *а*). То есть в виду заданной взаимосвязанности деталей узла даже в состоянии покоя конструкции самолёта на стакан оказывается силовое воздействие со стороны сопряжённых с ним деталей узла (рис. 3, *б*).

Вторая составляющая силового воздействия на стакан обусловлена функционалом узла. А именно, стакан воспринимает нагрузки, действующие на узел от подвешенного груза (рис. 4, *а*), а в случае изгиба консоли крыла от деформации верхнего пояса лонжерона (рис. 4, *б*).

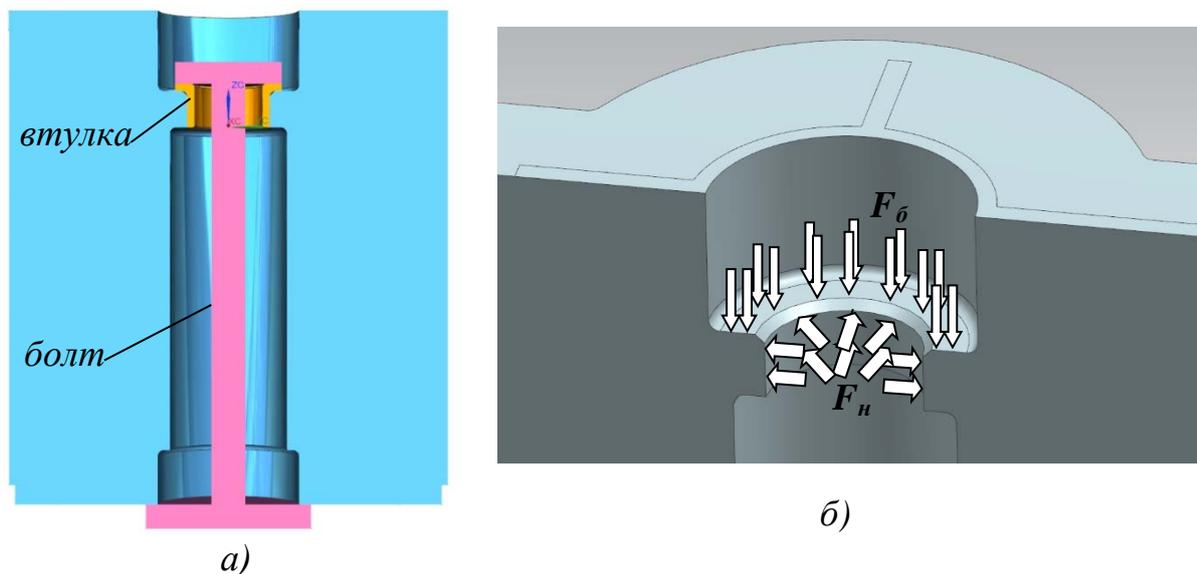


Рис. 3. Структура узла подвески: *а* – схематизация составляющих узла; *б* – силовое воздействие на горловину стакана от составляющих узла

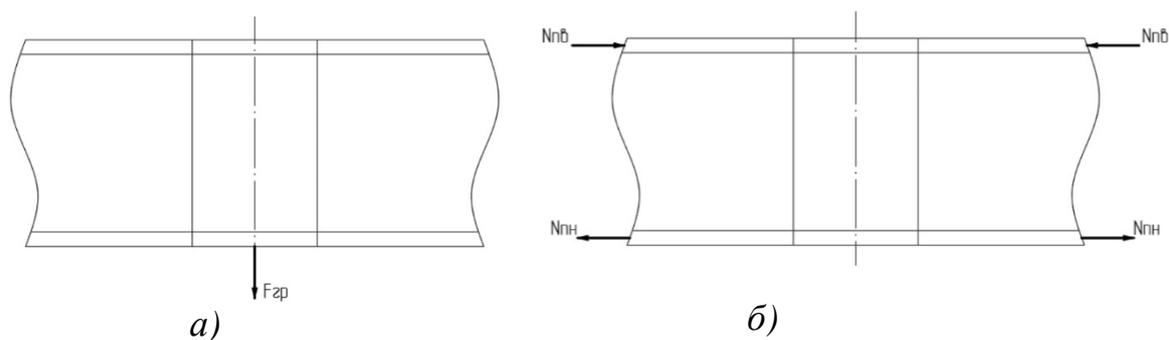


Рис. 4. Схематизация силового воздействия на узел: *а* – от изгиба лонжерона; *б* – от воздействия груза

После того как были выявлены силовые факторы воздействия на деталь и их природа, следует оценить качественно параметры напряжённого состояния в области горловины стакана, их распределение по объёму рассматриваемой части стакана. Поскольку силовые факторы многочисленны и имеют разную природу на начальном этапе рассмотрим силовые факторы, вызванные конструктивными характеристиками узла (см. рис. 3). Это влияние впрессованной втулки в горловину стакана и момент затяжки болта.

Для качественной оценки напряжённого состояния детали достаточно выполнить конечно-элементный экспресс анализ [2, 3]. Органично для этого подходит система *APM FEM*, интегрированная в программный CAD комплекс КОМПАС-3D. Инструментарий *APM FEM* ориентирован на подготовку и последующий конечно-элементный анализ трехмерной твердотельной модели как детали, так и сборки [4].

Корректность модели, построенной в среде программы *APM FEM*, была доказана при сопоставлении результатов моделирования тестовой задачи в этой среде с результатами расчёта в программе Femap with NX Nastran и аналитическим решением. Расхождение не превышало 15%. Модель, сформированная и просчитанная в системе КОМПАС-3D достоверно для общего понимания картины описывает параметры состояния прочности.

Иными словами, возможностей системы КОМПАС-3D для качественного конечно-элементного экспресс анализа параметров состояния прочности стакана, обусловленных конструктивными характеристиками узла, вполне достаточно. Этот анализ позволит достигнуть понимания и оценить распределение интенсивностей внутренних сил по объёму стакана, особенно в исследуемой части.

На первом этапе построена трехмерная модель стакана. Поскольку особенности геометрии влияют на параметры напряженного состояния, мы решили учесть все детали конструкции прототипа.

В данном случае преследуется цель исследования качественной, а не количественной картины, определяющей опасные сечения стакана. Для этого необходимо проанализировать параметры напряженного состояния,

обусловленные действием сил контактного взаимодействия от посадки с натягом (рис. 6, *а*), силы затягивания болта (рис. 6, *б*). Значение давления от натяга найдено с помощью формулы Ляме при заданной посадке деталей.

Для этих случаев нагружения рационально выделить участок стакана, ограниченный двумя горизонтальными плоскостями. Условия закрепления обозначили в местах условного разреза стакана, т.е. по нижнему и верхнему горизонтальным сечениям. (см. рис. 6).

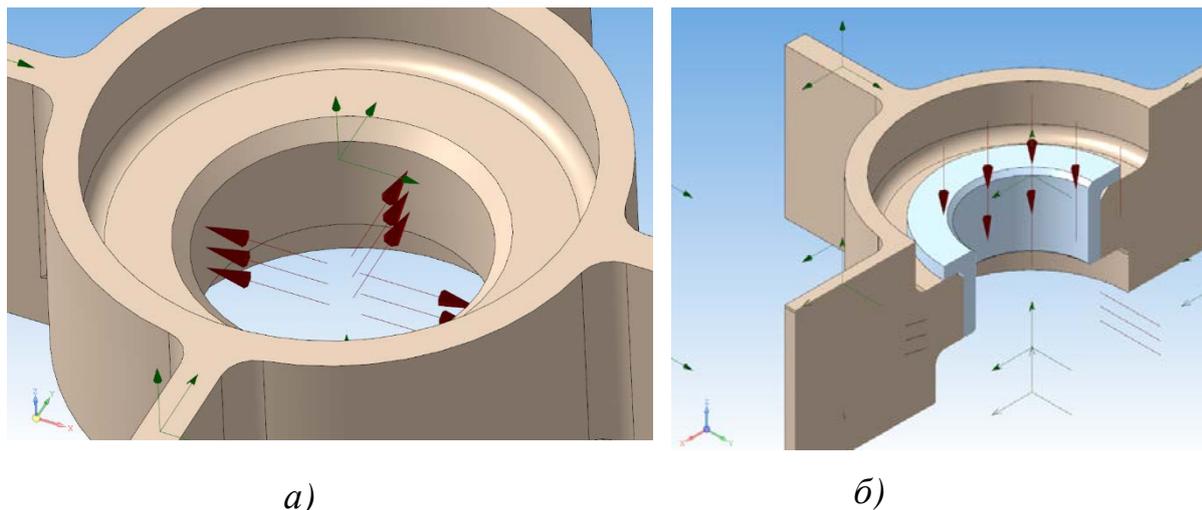


Рис. 6. Модель стакана с граничными условиями: *а* – схема нагружения для моделирования натяга втулки; *б* – схема нагружения для моделирования затяжки болта

Значение нагрузки от затягивания болта было получено с помощью типового решения задачи о болтовом соединении с предварительным затягиванием [1]. Ход решения удобно представить следующим образом (рис. 7).

Таблица 1 – Исходные данные

Момент закручивания, $T_{зав}$, Нмм	Коэффициент трения f	Коэффициент затяжки $K_{зат}$	Резьба
15696	0,13	4,7	M16

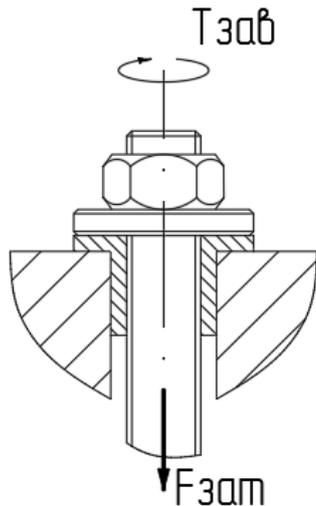


Рис. 7. Схема силового воздействия на горловину стакана от затягивания болта

Из формулы расчёта момента закручивания выразим осевую силу F []:

$$F = 5285,486 \text{ Н.}$$

При этом сила затяжки:

$$F_{зат} = 24841,78 \text{ Н}$$

Инструментарий модуля АРМ FEM позволяют КЭ-ую разбивку выполнить в автоматизированном режиме с уточнением размера КЭ (рис. 8).

Возможности модуля АРМ FEM предусматривают реализацию нескольких типов расчёта. Так как целью эксперимента является качественная оценка параметров состояния прочности узла в окрестности горловины стакана, то из всего набора типов расчёта рационально выбрать статический тип расчёта.

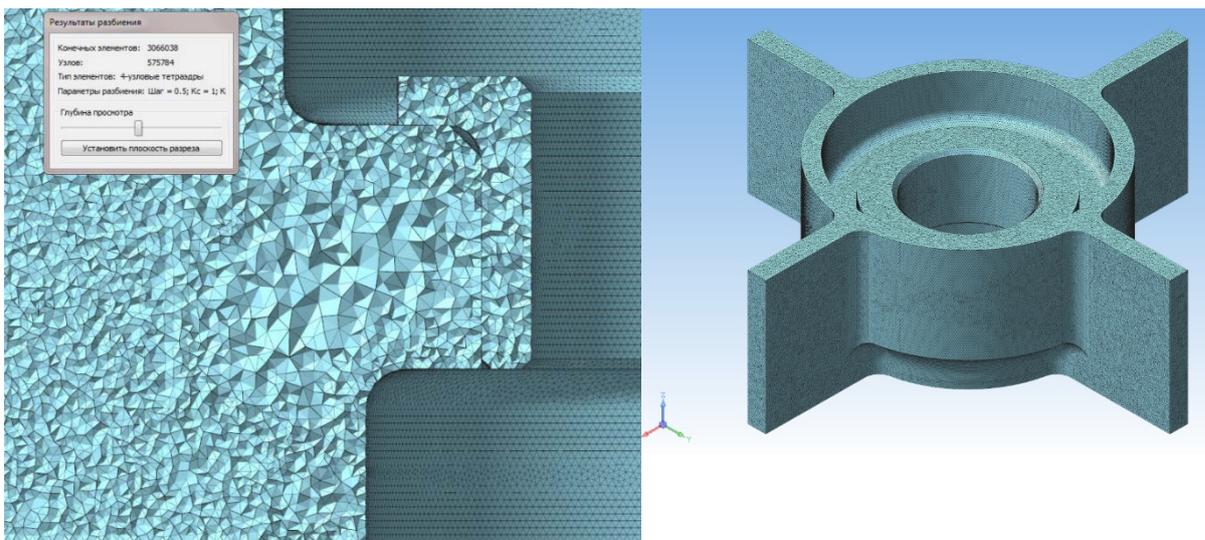


Рис. 8. Конечно-элементная модель стакана, выполненная в среде АРМ FEM

Статический расчёт позволил получить качественную картину распределения напряжений по объёму геометрической модели стакана применительно к заданным граничным условиям. В качестве напряжений определим эквивалентные напряжения теория прочности Мизеса.

Результатом конечно-элементного анализа модели стало поле напряжений, представленное на рис. 9-12. Соединение представлено в разрезе по плоскости симметрии узла. Следует отметить, что вследствие схематичного нагружения для моделирования натяга напряжения на

поверхности втулки не являются истинными и не стоит учитывать их в анализе.

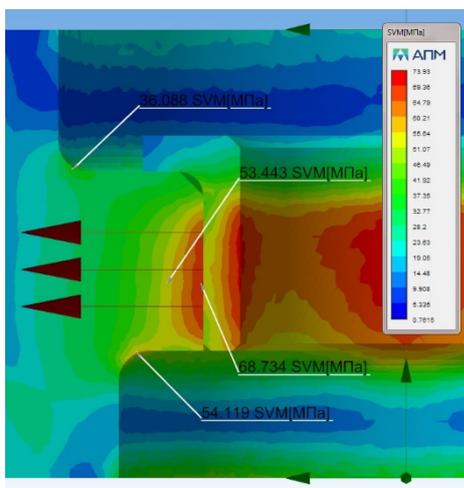


Рис. 9. Поля распределения эквивалентных напряжений в программе APM FEM при натяге

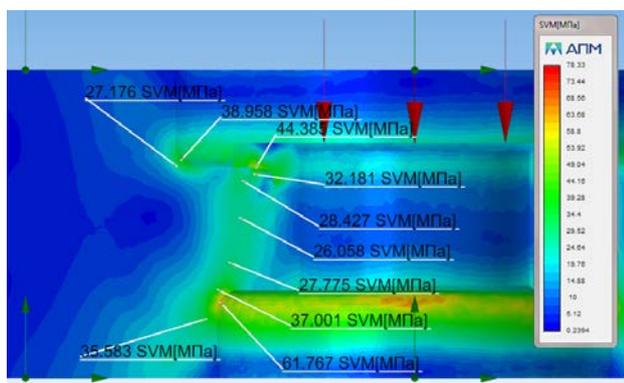


Рис. 10. Поля распределения эквивалентных напряжений в программе APM FEM при затягивания болта

Карта напряжений для случая натяга показывает значительное влияние давления от натяга на напряженное состояние стакана в области горловины (рис. 9). В данном случае на внутренней поверхности горловины стакана возникают напряжения около 70 МПа. По мере удаления от поверхности контакта значения напряжений сокращаются. Однако, в местах сопряжения внутренней поверхности стенки стакана и горизонтальных поверхностей горловины, как верхней, так и нижней, наблюдаются концентрации напряжений. В области верхней галтели максимум напряжения составляет 36 МПа в области нижней галтели - 54 МПа.

При затягивания болта (рис. 10) наибольшие напряжения возникают на поверхности галтелей аналогично случаю натяга втулки. Также стоит заметить, что в области галтелей напряжения выше в районе ребер жесткости стакана (рис. 11). Это подтверждает необходимость подробной детализации модели в соответствии с прототипом.

Карта напряжений, полученная после совместного нагружения (рис. 12) показывает, что в области верхней галтели напряжения практически нейтрализованы. В области нижней галтели напротив наблюдается увеличение концентрации напряжений. Сопоставление карт напряжений, полученных от анализа влияния натяга и от давления, вызванного затягиванием болта, показывает суммирование напряжений от этих двух факторов.

Эти наблюдения позволяет сделать вывод о том, что наиболее ненадёжной в плане прочности является область нижней галтели горловины стакана. Что соответствует действительному состоянию дел, поскольку соответствует физически реальной картине.

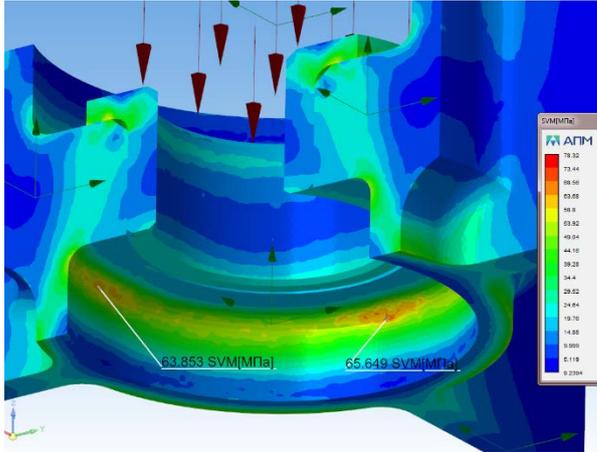


Рис. 11. Повышенные местные напряжения в области ребер жесткости стакана

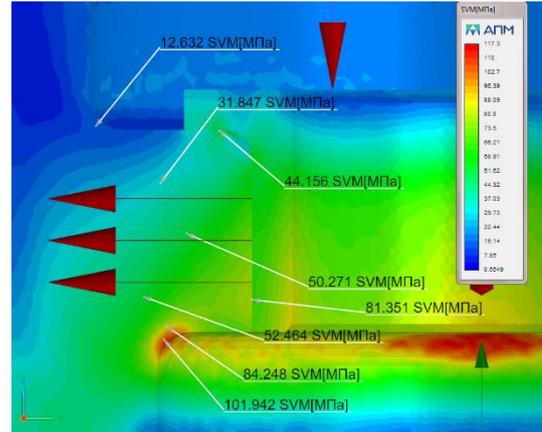


Рис. 12. Поля распределения эквивалентных напряжений при совместном действии затягивания болта и натяга

Необходимо отметить, что данном случае рассмотрены внешние силовые факторы, действующие на стакан в области горловины, вызванные особенностью конструкции узла. Однако, есть вторая составляющая силового воздействия на стакан. Её причиной являются внешние нагрузки (рис. 4). Их влияние на изменения напряжённого состояния рассматриваемой области стакана планируется рассмотреть в будущем.

Следует отметить, что полученные модели напряжённого состояния построены на основе линейного подхода. При расчётных значениях напряжений, не превышающих предел пропорциональности материала, можно полагать что полученный результат не только адекватно описывает качественную картину, но и количественную. Естественно, это так, если модель сформирована корректно.

Список использованной литературы:

1. Гузенков П. Г. Детали машин. М.: Высш. шк., 1986, 395 с.
2. Внедрение модуля конечно-элементного анализа АРМ Structure3D системы АРМ WinMachine в процессе изучения курса «Сопrotивление материалов» / Распопина В.Б. / САПР и графика. - 2006. - № 9. - С. 30-36.
3. Оценка параметров прочности шатуна ДВС в автоматизированной среде модуля АРМ Structure 3D системы АРМ WinMachine / Распопина В.Б., Бодров Е.А., Ковалёв А.А. / Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2011. - №01 (1). – С. 125-137
4. Конечно-элементный анализ в САПР Компас-3D v.13 [электронный ресурс] – URL: <https://cadregion.ru/kompas-3d/konechno->

УДК 004.3

***Совершенствование теории и практики ИПИ-технологии
технического обслуживания бортового комплекса оборудования
воздушных судов***

А.Н. Коптев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34.

Изложена системологическая концепция построения модуля моделирования для развития средств инженерного анализа ИПИ технологий процессов технического обслуживания воздушных судов, синтеза образов объектов технического обслуживания, построение пространственно-временных образов для распознавания принадлежности или непринадлежности объектов технического обслуживания заданному синтезированному образу этого объекта, выступающего в качестве эталона на основе утверждения истинного или ложного суждения, полученного на языке исчисления высказываний – теории вывода о состоянии объектов технического обслуживания в процессе оперативного обслуживания или моделирования за счет ввода специальных предикатов исчисления предикатов первого порядка для решения задач периодического обслуживания. Научно-прикладная эффективность предложенных методов оценивания демонстрируется его использованием при постановке и решении конкретных задач аспирантами автора статьи, зафиксированных более, чем в десяти защищенных и утвержденных ВАК диссертациях на соискание ученой степени кандидата технических наук в области функционального контроля и испытаний летательных аппаратов и их систем, организации обслуживающего производства, в которых были использованы теоретические положения, освещаемые в данной статье.

Ключевые слова: язык, описание, образ, объект, система, надсистеме, техническое обслуживание, бортовой комплекс оборудования, воздушное судно, оценка, оценивание, ИПИ-технологии.

По мере усложнения решаемых задач технического обслуживания (ТО) современных воздушных судов (ВС) и используемых достижений CALS технологий [1-3] в этой области все очевиднее проявляется

ограниченность концептуального аппарата CALS технологий или ее русскоязычный аналог ИПИ технология.

Опыт решения значительного числа практических задач ТО систем (объектов) бортового комплекса оборудования (БКО) и ВС в целом – оценки и оценивания их функционального состояния приводит к осмыслению существующих теоретических положений и экспериментального материала [6-10] к построению достаточно общих системологических аспектов теории ТО БКО и ВС, являющихся основой развития CALS технологий процессов ТО. Так возникла идея использования структурных (синтаксических) методов распознавания образов (состояний) и семиотики для создания фундаментального направления – концепции синтеза эталонных и действующих образов объектов технического обслуживания (ОТО) для оценивания их состояния путем использования основных положений аппарата теории синтеза образов [4] и формализма логических исчислений [5].

Распознавание образов, как отдельной ветви искусственного интеллекта, существенно связанной с теорией решения задач, языком которой является язык математики, и создание концепции распознавания состояний ОТО – получение оценок, приближенных значений оцениваемой характеристики или его параметра, и построение на их основе оценивания – процедуры принятия решения о его функциональном состоянии, как образе обслуживаемого объекта требует четкого множества понятий и определений, использованных в области распознавания образов.

Основные понятия и определения.

В статье для представления исходных понятий и определений была проделана большая работа, целью которой было показать, что с общих позиций основным в решении задачи оценивания функционального состояния ОТО является распознавание его принадлежности заданному «эталону» этого объекта. В рамках вербальной интерпретации этого положения необходимо определить, насколько точно эти два объекта идентичны друг другу или установить между двумя функциями $f_{\text{ОТО}}$ и $f_{\text{Э}}$ существование либо знака равенства $f_{\text{ОТО}}=f_{\text{Э}}$, либо на базе использования элементов адаптивно пороговой логики, с помощью которой можно установить их идентичность с точностью до замены отказавшего элемента (блока) ОТО, которая позволяет восстановить их идентичность.

В соответствии с целями этой работы дано определение слова «образ», которое будет использоваться для представления множества объектов БКО (надсистема), а решения задач установления идентичности при оперативной форме обслуживания является сравнение в системе «ОТО – эталон» реализуется в рамках антропотехнической системы поддержания функционально важных свойств ОТО и ВС в целом (над-надсистема).

И, наконец, в статье будем говорить об образах функциональных состояний, представляемых в рамках точного формализма, который используется в качестве концептуальной основы синтеза образов этих состояний и их распознавания в процессе функционирования антропотехнической системы ТО или над-надсистемы, использующей всеобщее свойство отражения. Если отражения рассматривать с позиции авиатехника в процессе его производственной деятельности по ТО, то оно является воспроизведение особенностей ОТО, соответствующих изменениям, свойств и состояний относительного некоторого эталона этого объекта, зафиксированного в его сознании при их взаимодействии на каком-либо языке.

Таким образом, процесс отражения, формирующий образ, в нашем случае, состояния или функционального состояния, будем называть отображением, которое является одним из видов отражения. Понятие отражения и его видов представляет большой интерес для описания процессов получения информации, которая является неизменным компонентом процессом управления, в нашем случае, для поддержания заданного функционального состояния объектов БКО, которое осуществляется через воздействие активного объекта системы ТО на ОТО, обеспечивающего переход в требуемое состояние.

Для поддержания функционально важных свойств ОТО возникают потребности в таких взаимодействиях этого объекта со средой ТО – над-надсистемой, которые обусловлены ее потребностями. При этом для приведения ОТО в действительное функциональное состояние достаточно лишь направляющего воздействия, под которым будем понимать управляющее воздействие, а процесс их комбинирования как процесс управления восстановлением или ремонтом ОТО, или, с формальных позиций, образ действий, приводящий к результату, т.е. решению задачи ТО.

Содержательная представление задачи технического обслуживания.

По существу нам всегда задано множество ОТО, функциональное состояние которых отражено прообразом, описанным на естественном языке с применением так называемых технических требований, использующих строгие спецификации для устранения большей части неточностей интерпретации его содержания. Однако основной проблемой такого представления конкретных задач ТО является его неэффективность. При этом требуется такое описание ОТО, процессов оценки и оценивания результатов ТО, и, как следствие, язык, который существенен для целей описания принципов, т.е. основных положений, концепции, лежащих в основе рассуждений, из которых следует истинность значений суждений, в нашем случае, об ОТО и их состояний, построенных из последовательности простых утверждений, образующих корректную цепь рассуждений, представляющих результирующее утверждения о состоянии ОТО (образ) – его истинность или ложность

проверяется умозрительно простейшей формой распознавания «сравнение с эталоном». Такая форма оценки характерна для оперативного (линейного) обслуживания.

Рассуждая неформально, язык описания ОТО и их состояний должен состоять из множества простых утверждений (элементов) или для наших дальнейших рассуждений – образующих (непроизводных элементов), на базе которых будут по определенным правилам строиться набор утверждений различного порядка сложности в зависимости от объектов описания, представляющих отдельные фрагменты образов ОТО – повествовательные предложения – в дальнейшем конфигурации, ограниченные классом образов, элементы которого определяются задачей оперативного ТО ВС, т.е. задачей распознавания состояния образов ОТО, состоящих из элементов – простых утверждений.

Содержательная задача эффективного описания заданного класса образов ОТО и действий по оценке и оцениванию сводится к следующей: Дан класс объектов. Создать язык описания их образов, который допускает краткие удобные описания всех образов из этого класса для реализации концепции точного формализма синтеза и анализа образов с целью их распознавания в рамках синтаксического подхода. Сейчас не существует удовлетворительного метода решения задач ТО в рамках точного формализма, без которого невозможно удовлетворить потребности в более объективном оценивании состояния сложных БКО и их агрегатов и систем ВС в целом в рамках антропотехнической (человеконаполненной) системы.

На взгляд автора и его коллектива, наиболее существенный вклад в проблему повышения объективности оценивания функционального состояния ОТО дает предлагаемый в данной работе системно-структурный организационный подход, базирующийся на реализации формальных аспектов задачи распознавания образов, которая обнаруживает необходимость создания универсальной модели описательного языка формирования образов: эталонов конкретных объектов, пространственно-временных образов действий исполнителей операций ТО и их поведения на основе способа выбора действий, комбинация которых приводит к результату, т.е. используя общий подход к порождению преобразований и обработки образов, предложенных У. Гренандером [4], дополненный теоретическими положениями ТО, апробированными в рамках выполненных автором и авторским коллективом кафедры эксплуатации авиационной техники Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева.

Постановка задачи технического обслуживания в замкнутой форме.

В наиболее общем виде условия задачи оперативного (линейного) ТО согласно определения EASA включают плановое ТО – визуальные инспекции, которые позволяют обнаружить видимые отклонения и

дефекты и устранить их, т.е. решить задачу распознавания образа функционального состояния ОТО.

Постановка этой задачи в замкнутой форме требует такого представления, в котором все элементы задачи представлены без избыточности и многозначности.

В рамках такого подхода можно говорить об образах функциональных состояний ОТО, представленных для оперативного ТО образами в пространстве-носителем, например, БКО, в котором можно построить изображения как набор отдельных цепочек произвольных элементов или образующих, представляющих, в свою очередь, исходный для оценки ОТО, сравниваемый с цепочками производных элементов, представляющих эталонный образ, построенный на основе избыточных представлений об ОТО – технических описаний, систем различного назначения и технических требований к ним.

Для решения задачи оперативного (линейного) обслуживания ОТО, требующего минимальных затрат времени на его реализацию, условия этой задачи математически могут быть записаны следующим образом:

Найти в заданном множестве X элементов ОТО цепочку образующих x (конфигурации, преобразы), удовлетворяющую принципу однозначности (основной принцип теории имен [10]), однозначному отношению xRy , где каждому значению y соответствует одноединственное значение x , и каждая образующая x_i , которая входит в цепочку как однозначная сингулярная функция $y=f(x)$, конъюнктивная форма которых описывает состояния ОТО (образ), складывающаяся из входных оценок сингулярных функций образующих, т.е. будем говорить об образах, как структуре связи состояний образующих – простых признаков.

Общий подход к решению задачи оперативного ТО.

Рассматривая различные аспекты проблемы распознавания при реализации оперативного ТО, как проблемы отражения, которые подразумевают обязательное наличие исполнителя ТО ОТО (авиатехника) и собственно ОТО, которые будем называть просто объектами БКО, которые могут находиться в одном из множества функциональных состояний. Объекты будем обозначать заглавными буквами латинского алфавита A, B, C и т.д., а их части – буквами X, Y, P , а тот факт, что они являются составляющими того или иного объекта отразим с помощью логического знака включения, например $X \subseteq A$, т.е. X включено в A .

Так как, в нашем случае, представляет интерес не сам объект и не его часть, а их свойства, называемые признаками, отношения которых к базовым (эталонным) приводит к образованию либо истинного, либо ложного суждения. При решении задач оценки и оценивания функциональных состояний ОТО учитывают, что они состоят из частей (блоков), а оценивание ОТО в целом – изображений – модели его

состояния комбинируется из оценок – образующих, из которых построены конфигурации, характеризуемые не только составом оценок, но и, как указывалось ранее, структурой их связей.

В рамках решаемых задач оценивания функциональных состояний ОТО представляет интерес две разновидности образующих с «пересечением» и «непересечением», или, в общем представлении, соответственно для $x, x \in X$ и $y, y \in Y$ $x \cdot y = p, x \cdot y = \emptyset$.

Образующие признаки представляют информацию об отдельных параметрах, множество X которых для решения задачи построения образа функционального состояния ОТО, состоящего из множества изображений, сформировано из непересекающихся классов образующих, т.е. $X = \bigcup_{\alpha} X^{\alpha}$, где X^{α} – непересекающиеся классы. Комбинация формируется посредством исчисления высказываний, исходя из некоторого множества X простых признаков p . Эти признаки для реализации операционного ТО являются двоичными переменными, принимающими значения «годен», «негоден». Для рассматриваемого случая признаками (параметрами) служат образующие, а изображением или оцениванием функционального состояния являются правильно построенные булевы выражения или сложные функции W , представленные в конъюнктивной нормальной форме

$$W = \bigwedge_{b \in B} (\bigvee_{a \in A} \varphi^{e_{ab}}).$$

Это укладывается в формализм образа функционального состояния ОТО, если X состоит из $x=x(q)$, определенных на опорном пространстве Y .

Классы образующих X^{α} в рассматриваемом случае будут состоять из попарно сравниваемых признаков, порождаемых формой распознавания сравнения ОТО – эталон ОТО, т.е. если $x_1, x_2 \in X^{\alpha}$, то при тождестве $x_1 \Rightarrow x_2$, или $x_2 \Rightarrow x_1$, или при строгом соответствии (равенстве) $x_1 = x_2$ или $x_2 = x_1$.

В случае нарушения тождества или равенства для решения задачи обеспечения требуемого функционального состояния предложено использовать модифицированное исчисление предикатов первого порядка, в частности, применения тестов P , который позволяет получить необходимый для восстановления работоспособности ОТО введением предиката, заменяющего тест P на предикат, описывающий деформированный образ в реальной среде $\langle V, \mathcal{P}, \mathcal{P}' \rangle$, где \mathcal{P} – семейство, представляющее ОТО, \mathcal{P}' – подсемейство из \mathcal{P} , а V – абстрактное множество ОТО. На данном этапе необходимо простое описание с использованием нейронных сетей для описания образов деформации.

В статье, в силу ограниченного объема, кратко рассмотрен формально-логический аппарат и его применения для решения задач ТО в рамках антропотехнической системы, применяемой на современном этапе, который может быть положен в основе инженерного анализа для внедрения автоматизированных систем принятия решений на основе

математического аппарата моделирования принятия решений в тесной связи с средствами и системами управления заданиями (системы Workflow).

Список использованной литературы

1. Судов Е.В. Интегрированная информационная поддержка жизненного цикла машиностроительной продукции. Принципы. Технологии. Методы. Модели. – М.: «МВМ», 2003. – 264 с.
2. CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукции) в авиастроении / Под. Ред. А.Г. Братухина. – М.: Изд-во МАИ, 2002. – 676 с.
3. Левин А.И., Судов Е.В. CALS – сопровождение жизненного цикла // Открытые системы, 2001, №3.
4. Гренандер У. Лекции по теории образов. Синтез образов. Том 1. Москва: МИР, 1979.
5. Столл, Р. Множества. Логика. Аксиоматические теории. М.: Просвещение, 1968. – 232 с.
6. Гареев А.М. Разработка и исследование упреждающих технологий обслуживания гидравлических систем на базе встроенного контроля чистоты рабочей жидкости. Автореферат на соискание уч.ст. канд. техн. наук: 05.07.07. Самара, СГАУ, 2008.
7. Кириллов А.В. Совершенствование технологических процессов функционального контроля и испытаний пилотажно-навигационных комплексов летательных аппаратов. Автореферат на соискание уч.ст. канд. техн. наук: 05.07.02. Самара, СГАУ, 2011.
8. Зотин Н.А. Разработка метода и средств прогнозирования помпажа двигателя силовой установки самолета. Автореферат на соискание уч.ст. канд. техн. наук: 05.07.07. Самара, СГАУ, 2015.
9. Коптев, А.Н. Монтаж, контроль и испытания электротехнического оборудования ЛА [Текст] / А.Н. Коптев, А.А. Миненков, Б.Н. Марьин, Ю.Л. Иванов. - М.: Машиностроение, 1998. - 296 с.
10. Коптев А.Н., Зотин Н.А. Применение теории множеств и теории образов для формирования диагностических признаков ГТД // Сборник научных трудов Всероссийского семинара по управлению движением и навигацией летательных аппаратов. Ч. 3. Самара: СНЦ РАН, 2013. – с. 56-68.
11. Смирнов Н.Н., Чинючин Ю.М. Основы теории технической эксплуатации летательных аппаратов. М.: МИР, 1979. – 383 с.

Выбор ВМГ на основе стендовых испытаний

А.С. Груздев, А.П. Коваль

Руководитель: И.О. Бобарика, к.т.н., доцент

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

В статье описано строение стенда для испытаний винтомоторных групп (ВМГ), а также процесс верификации заявленных производителем характеристик двигателей в сборе с конкретным типоразмером винтов на основе стендовых испытаний. Описаны пределы применимости стенда при проектировании перспективных БПЛА сверхлегкого класса.

Ключевые слова: *бесколлекторные двигатели, стендовые испытания, ВМГ.*

При разработке беспилотного летательного аппарата (БПЛА) подбор винтомоторных групп (ВМГ) является важной задачей, поскольку ВМГ напрямую влияют на возможность выполнения БПЛА поставленных задач, на максимально возможное время пребывания в воздухе, а так же на возможную максимальную массу целевой нагрузки.

Для бесколлекторных электромоторов, которые устанавливаются на БПЛА сверхлегкого класса, на сайте производителя приведены специальные таблицы технических характеристик мотора в составе с несущими винтами нескольких типоразмеров.

Для установки соответствия заявленных производителем характеристик действительности, а также для установления диапазонов применимости конкретных винтомоторных групп необходимо проводить натурные испытания на специализированных стендах [1]. Испытательный стенд, представленный на рисунке 1, имеет в своем составе следующие компоненты:

- тензометрический датчик (мост), для измерения силы создаваемой ВМГ;
- аналогово-Цифровой Преобразователь (АЦП) НХ711 для оцифровки сигнала с тензодатчика;
- датчик тока ACS758LCB-050В;
- АЦП для измерения напряжения на аккумуляторе встроенный в микроконтроллер АТmega328Р;
- термодатчик DS18B20 цифровой в гильзе, предназначенный для измерения температуры статора мотора;

- микроконтроллер ATmega328P, с обвязкой, предназначенный для сбора данных с датчиков, их обработки и передачи на ПК через LTP-порт;
- модуль пульта дистанционного управления Radiolink R12DS, для обеспечения дистанционного управления ВМГ;
- аккумулятор 6s Li-PO с номинальным напряжением 24В для питания ВМГ.

Для подтверждения корректности работы испытательного стенда и для подтверждения заявленных производителем технических характеристик действительности были проведены испытания ВМГ с известными значениями подъемной силы на каждом значении газа, а именно – двигателей T-Motor MN5212 в сборе с винтами диаметром 18 дюймов. Испытания проводились согласно разработанному плану:

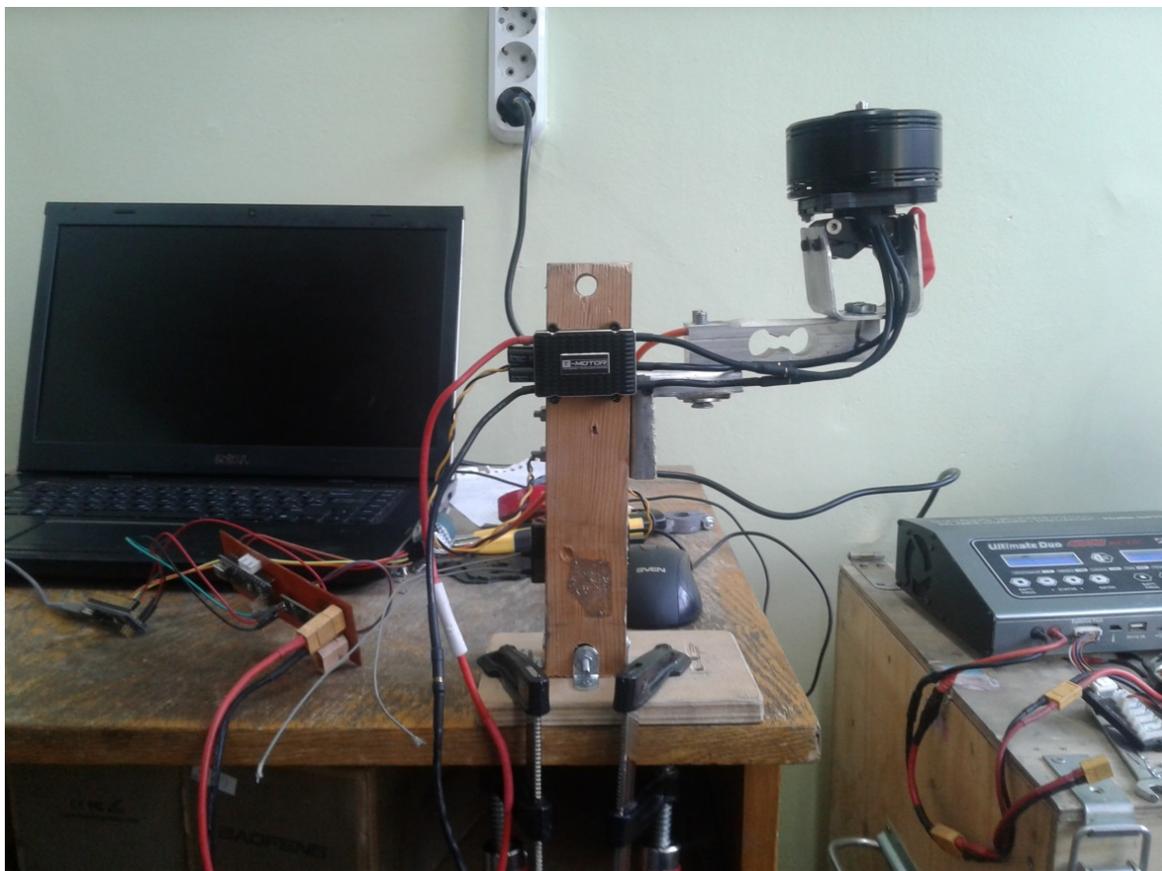


Рисунок 1 – Испытательный стенд

- монтаж ВМГ, калибровка регулятора двигателя (ESC);
- подключение к ПК оператора;
- управление тягой моторов при помощи рукоятки управления двигателем (РУД), посредством дистанционного управления. Плавное повышение тяги моторов, с выдерживанием на выбранных точках не менее 40 секунд с отслеживанием показаний датчиков в реальном времени;

— по окончанию испытаний – возврат РУД в положение 0, отключение питания, обработка полученных данных.

Полученные во время испытаний данные и паспортные характеристики ВМГ приведены в таблице 1. Полученные на стенде значения были округлены до целых. Из полученных данных был сделан вывод о корректной работе испытательного стенда.

Таблица 1 – Испытания ВМГ MN 5212 в сборе с винтами T-Motor 18x6,1

	Мотор	Напряжение на аккумуляторе, В	Винт	Газ, %	Ток, А	Тяга, г.	Обороты, об/мин
Результаты испытаний	MN 5212 KV 340	24	T-Motor 18x6,1	50	6	1250	3500
				55	8	1550	3900
				60	9	1800	4200
				65	12	2200	4600
				75	16	2800	5150
				85	22	3400	5700
				100	33	4200	6400
Паспортные данные	MN 5212 KV 340	24	T-Motor 18x6,1	50	5.7	1318	3596
				55	7.4	1612	3958
				60	9.3	1901	4310
				65	11.6	2259	4622
				75	16.5	2835	5226
				85	22.1	3477	5751
				100	33.0	4355	6358

Для визуализации полученных во время испытаний данных, был построен график зависимости тяги ВМГ от значения газа, изображенный на рисунке 2.

Описанная технология с применением стенда для испытаний, помимо этого, позволяет производить испытания двигателей в сборе с такими типоразмерами винтов, для которых отсутствуют значения паспортных характеристик. Необходимость в применении ВМГ подобного класса может возникнуть на этапе проектирования и прототипирования перспективных летательных аппаратов вертикального взлёта-посадки (аппаратов типа V-TOL) [2,3,4,5]. В процессе проектирования БПЛА подобного класса, в условиях повсеместного применения элементов цифровых двойников изделия для минимизации затрат [5], при переходе к этапу создания рабочего прототипа изделия наиболее актуально проведение подобных испытаний, поскольку данный

подход позволяет дополнительно уменьшить совокупные затраты на изготовление прототипа.

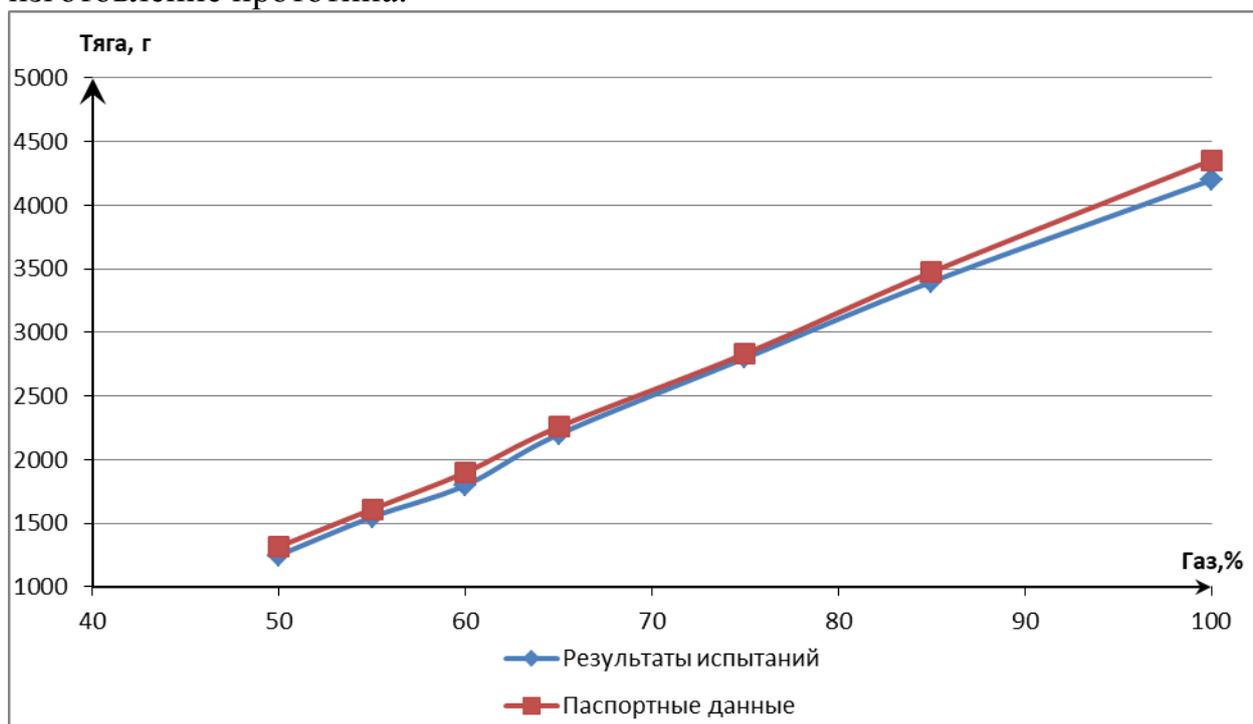


Рисунок 2 – График зависимости тяги в граммах от значения газа на РУД

Помимо этого, вышеописанные технологии испытаний позволяют проводить проверку отдельных ВМГ входящих в силовую установку на предмет соответствия паспортным характеристикам. Данные проверки особенно актуальны на этапе предварительных лётных испытаний, в процессе которых возможно повреждение входящих в ВМГ компонентов, что приведет к ухудшению несущих способностей аппарата.

Таким образом, применение испытательного стенда на различных этапах жизненного цикла БПЛА позволяет минимизировать затраты, а также повысить надёжность проводимых лётных испытаний.

Список использованной литературы:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2019667014 «Программное обеспечение стенда для тестирования двигателей БПЛА (SIBGIS MOTOR STEND)» Авторы: Морозов Владимир Андреевич, Паршин Александр Вадимович от 18.12.2019 г.

2. Патент на полезную модель RU 179810 U1 «Транспортное средство с частичной аэростатической разгрузкой» Авторы: Бобарика Игорь Олегович (RU), Артанов Владислав Владимирович (RU), Бейчук Данил Дмитриевич (RU), Демидов Андрей Игоревич (RU) от 24.05.2018 г.

3. А.П. Коваль, А.С. Груздев. Руководитель И.О. Бобарика. Оценка интерференции элементов летательного аппарата типа катамаран с частичной аэростатической разгрузкой. Авиамашиностроение и

транспорт Сибири. – Сборник статей X Международной научно-практической конференции. ИРНИТУ. Иркутск 2018. С. 33-38.

4. А.П. Коваль, А.С. Груздев. Руководитель И.О. Бобарика. Апробация применения элементов цифровых двойников при проектировании беспилотного летательного аппарата. Тезисы доклада на конференции. Молодёжь и будущее авиации и космонавтики – Аннотации конкурсных работ 11-го Всероссийского межотраслевого молодёжного конкурса научно-технических работ и проектов. Москва, 2019, С. 215.

5. Bobarika I.O., Dumnov G.E., Ivanov A.V. Analysis of aerodynamic interference of UAV structural elements such as catamaran with partial aerostatic unloading. Journal of physics: conference series 2018 International conference complex equipment of quality control laboratories 2018 Saint-Petersburg, 17-19 июля 2018 г.

6. И.О.Бобарика. Элементы цифровых двойников при проектировании беспилотного летательного аппарата. Тезисы докладов международной научной конференции. Современные материалы и передовые производственные технологии (СМППТ-2019) Санкт-Петербург, 25-28 июня 2019 г. С 94-95.

УДК 629.7.02

Применение численного моделирования аэродинамики при модернизации БПЛА

***Е.Б. Азеништейн, А.С.Груздев, А.П. Коваль
Руководитель: И.О.Бобарика, к.т.н., доцент***

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

В статье описан результат применения численного моделирования аэродинамики при модернизации БПЛА вертикального взлёта-посадки (V-TOL). В ходе работы было произведено компьютерное моделирование конструкции модернизируемого летательного аппарата, произведен аэродинамический анализ исходной и модернизированной конструкции, сделаны выводы о целесообразности применения рассматриваемых методов для решения подобного класса задач.

Ключевые слова: беспилотный аппарат, моделирование, модернизация, V-TOL.

Беспилотный летательный аппарат (БПЛА) — это летательный аппарат без экипажа на борту, использующий аэродинамический принцип создания подъемной силы, с помощью фиксированного или

вращающегося крыла, оснащенный двигателем и имеющий полезную нагрузку и продолжительность полета, достаточные для выполнения специальных задач. [1].

При очевидных достоинствах применения БПЛА существует и ряд недостатков: более высокие, чем для пилотируемой авиации требования к погодным условиям, в частности к скорости ветра. Серьезным недостатком также является время полёта, которое зачастую существенно ограничивает функциональные возможности для применения в конкретных областях, например, в аэрогеофизике. Имеются также организационные ограничения, связанные с получением разрешения на полеты [2].

Для выполнения специальных задач БПЛА должен рассматриваться в совокупности с его приборным оснащением и полезной нагрузкой. В таком случае речь идёт о беспилотной авиационной системе (БАС). БАС состоит из непосредственно БПЛА, бортового комплекса управления, полезной нагрузки и наземной станции управления [3].

Характеристики БПЛА постоянно улучшаются, устройства становятся

меньше и компактнее, и, в конце концов, дешевле, что делает их более доступными и привлекательными для пользователей в различных сферах [4]. Происходит миниатюризация полезных нагрузок: тепловизоры, мультиспектральные камеры, гиперспектральные камеры, лазерные сканеры, магнитометры уже сейчас можно ставить на БПЛА различных типов. Масса полезной нагрузки в таком случае может составлять как несколько грамм, так и несколько килограмм. При этом существует проблема: конструкции используемых летательных аппаратов в ряде случаев не позволяют применять совместно разнородные элементы целевых нагрузок по причинам несоответствия массогабаритных параметров, лётно-технических параметров, электромагнитной совместимости, помехоустойчивости. Для решения данных задач целесообразно создавать БАС комбинированных типов уникальной конструкции [5], либо производить модернизацию конструкции существующих БАС под конкретные задачи заказчика.

Глубокая модернизация конструкции – дорогостоящий и длительный процесс, при котором повсеместно применяются различные методы численного моделирования. При глубокой модернизации наличие не полного цифрового двойника изделия, а хотя бы его элементов существенно расширяет возможности применения элементов численного моделирования и анализа, позволяет существенно уменьшить время модернизации и избежать ошибок на всех этапах проектирования [5].

Целью данной работы являлась модернизация конструкции БПЛА с применением численных методов моделирования, с внедрением элементов технологии цифровых двойников изделия для обеспечения

возможности совместного применения разнородных групп целевых нагрузок.

В рамках работы были поставлены и выполнены следующие задачи:

- разработать цифровой двойник аэродинамического облика исходной модели;

- провести модернизацию аэродинамического облика модели для обеспечения возможности совместного применения разнородных групп целевых нагрузок;

- используя методы численного моделирования провести сравнительный анализ исходной и модернизированной конструкции [5].

Модернизация аэродинамического облика модели – сложная комплексная задача, включающая в себя множество критериев. Модернизация аэродинамического облика проводится с целью увеличения аэродинамического качества аппарата при сохранении оптимального соотношения массогабаритных параметров, при одновременном обеспечении летно-технических характеристик, а также электромагнитной совместимости, помехоустойчивости, с сохранением возможностей использования исходных силовых установок. Решить данную задачу возможно, в том числе, за счёт применения современных композиционных материалов в конструкции планера.

Для модернизации был выбран БПЛА V-TOL (vertical take-off landing), изображенный на рисунке 1, предназначенный для аэрофотосъемки больших площадей и протяженных объектов. Используется для геодезической топографической съемки и других целей. Летно-технические и эксплуатационные параметры приведены в таблице 1.

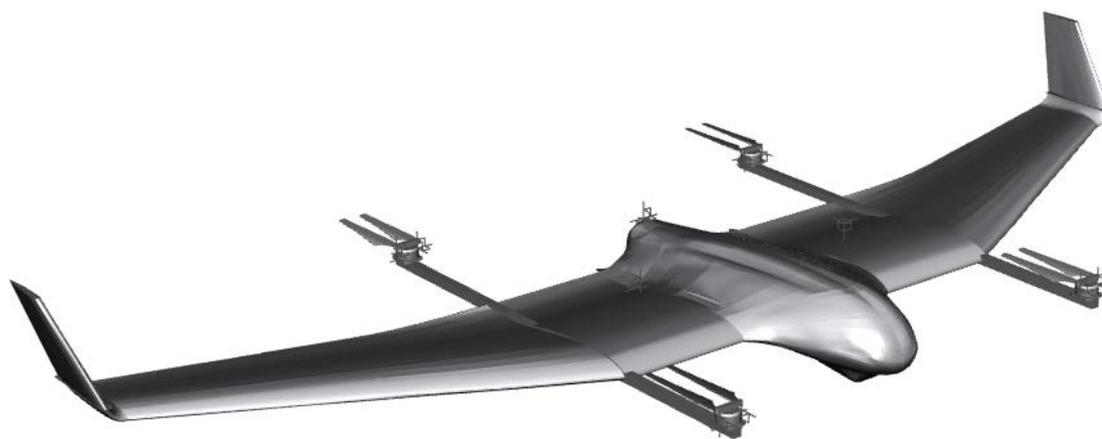


Рисунок 1 – Исходная модель БПЛА.

Таблица 1 – Основные характеристики.

Размах крыла	2400 мм
Длина	790 мм
Площадь крыла	88 дм ²
Масса без полезной нагрузки	5,7 кг
Время полета	до 90 минут
Скорость полета	55-75 км/ч
Максимальная дальность полета	до 90 км
Максимальная масса дополнительной полезной нагрузки	до 1 кг
Скорость ветра не более	10 м/с
Высота полета	до 1500м
Температура воздуха для стабильной работы	-20...+40 С
Средняя площадь облета в режиме съемки	до 700 га

На БПЛА установлен полетный контроллер с тройным резервированием датчиков в изолированном демпфированном блоке с контролем и стабилизацией температуры, что дает возможность осуществлять стабильную работу при любых температурах. Для взлёта и посадки на БПЛА типа VTOL установлены 4 подъемные винтомоторные группы, расположенные симметрично на консольных балках. Для обеспечения горизонтального полёта используется маршевый двигатель, расположенный в хвостовой части фюзеляжа аппарата.

Расположение датчиков на оригинальной конструкции аппарата на их максимальном удалении от маршевого двигателя – на конце консоли крыла, в корпусе, изготовленном из радиопрозрачного материала методом аддитивных технологий, как это показано на рисунке 2, не обеспечивает корректный сбор данных из-за возникающих электромагнитных помех, обусловленных работой маршевого двигателя во время горизонтального полета. Оригинальная конструкция не позволяет разнести датчики необходимое расстояние, в связи с этим были рассмотрены следующие варианты конструктивных решений:

- перенос маршевого двигателя в носовую часть фюзеляжа;
- увеличение размаха крыла;
- использование подвесов;

В данном случае использование подвесов плохо сказывается на управляемости, возрастает инерционность аппарата, повышается аэродинамическое сопротивление, уменьшается время полёта.



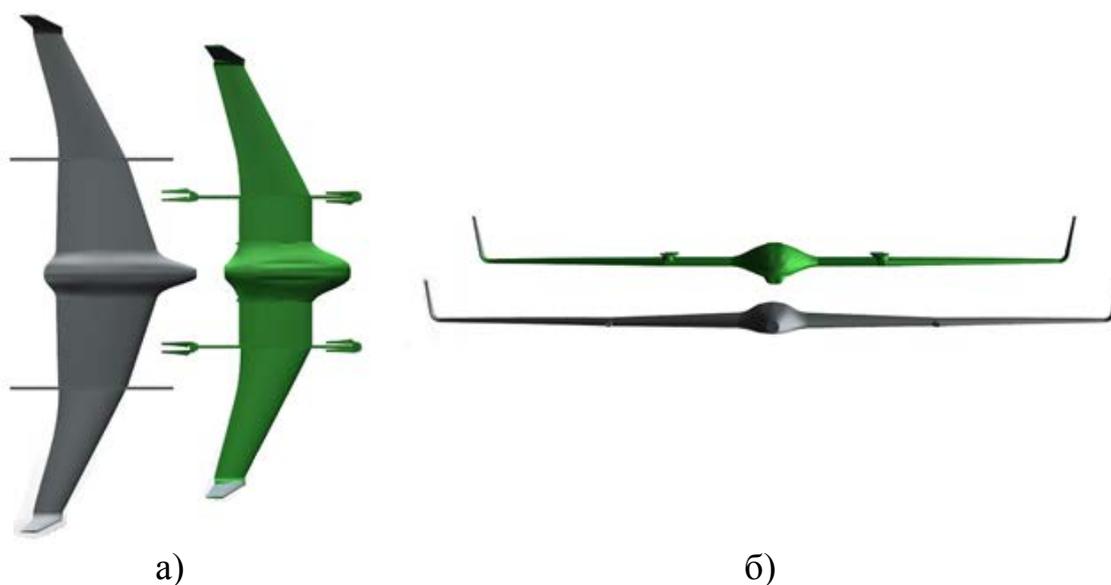
Рисунок 2 – Расположение датчиков на модели.

В качестве пути модернизации было выбрано вынесение маршевого двигателя в носовую часть фюзеляжа и переработку аэродинамического облика конструкции. Таким образом, возможно существенно уменьшить негативное электромагнитное влияние работающего двигателя на чувствительные элементы датчиков.

По результатам модернизации, в сравнении с оригинальной моделью аппарата, в модернизированной модели расстояние от двигателя до предполагаемых мест расположения датчиков увеличилось на 27% при совместном увеличении размаха крыла модели примерно на 17%, что положительно сказывается на достоверности получаемых данных (рисунок 3,4).



Рисунок 3 – Модернизированная конструкция



а) вид сверху б) вид спереди

Рисунок 4 – Сравнение оригинальной и модернизированной конструкции

Таким образом, в рамках работы было реализовано применение численного моделирования аэродинамики для модернизации конструкции беспилотного летательного аппарата типа V-TOL с целью достижения необходимых технико-функциональных характеристик. На данном этапе можно заключить, что подобного рода модернизация позволяет решить поставленные задачи, а значит, может быть принята для дальнейшей проработки и последующей реализации, в том числе с использованием оборудования профильных лабораторий ИАМиТ ИРНИТУ: Учебно-исследовательской лаборатории моделирования по аэродинамике, конструкции и прочности летательных аппаратов, а также научно-исследовательской лаборатории обработки, ремонта и диагностики композиционных материалов.

Список использованной литературы:

1. Жужгов Ю.В., Калач Е.В. Краткая характеристика БПЛА, применяемых для проведения воздушного мониторинга объектов нефтегазового комплекса. Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2012. С. – 1025-1028.
2. А.В.Паршин, В.С.Цирель, А.К.Ржевская Методические рекомендации по выполнению маловысотной аэромагнитной съемки с применением БПЛА. Материалы 12-ой международной конференции «Проблемам геокосмоса» (8-12 октября 2018 г., Санкт-Петербург, Россия). С. – 190-195.
3. «Беспилотник – это инструмент для создания конкурентного преимущества»//«Российские беспилотники» URL: https://russiandrone.ru/experts_opinion/bespilotnik-eto-instrument-dlya-sozdaniya-konkurentnogo-preimushchestva/ (дата обращения 06.05.2020)

4. Харитонова Т.Б., к. т. н., доцент, Хахулина Н.Б., к. т. н., доцент, Рыжков К.А. К выбору моделей и характеристики БПЛА в производстве геодезических и кадастровых задач. «Актуальные проблемы землеустройства, кадастра и природообустройства». Материалы I международной научно-практической конференции факультета землеустройства и кадастров ВГАУ. 2019.

5. А.П. Коваль, А.С. Груздев. Руководитель И.О. Бобарика. Апробация применения элементов цифровых двойников при проектировании беспилотного летательного аппарата. Тезисы доклада на конференции. Молодёжь и будущее авиации и космонавтики – Аннотации конкурсных работ 11-го Всероссийского межотраслевого молодёжного конкурса научно-технических работ и проектов. Москва, 2019, С. 215.

6. Бобарика И.О, Бальзаминов В.В. Применение численного эксперимента для исследования пограничного слоя при моделировании аэродинамики элементов летательных аппаратов. (Статья) Сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции Авиамашиностроение и транспорт Сибири. ИрГТУ - Иркутск, 2014. - С. 38 - 44.

7. Bobarika I.O. Analysis of aerodynamic interference of UAV structural elements such as catamaran with partial aerostatic unloading // I.O. Bobarika, G.E. Dumnov, A.V. Ivanov / Journal of Physics: Conference Series 2018. 1118(1),012008 doi 10.1088/1742-6596/1118/1/012008

8. Бобарика И.О. Элементы цифровых двойников при проектировании беспилотного летательного аппарата. В книге: Современные материалы и передовые производственные технологии (СМПТТ-2019). Тезисы докладов международной научной конференции. 2019. - С. 94-95.

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА: ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.791.927.5

Формообразование стальных заготовок методом аддитивной наплавки сварочной проволокой

А.А. Куликов, Ю.В. Небышинец, А.В. Сидорова, А.Е. Балановский

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Аддитивное производство или 3D печать приходит на смену традиционному субтрактивному производству, где детали изготавливаются путем последовательного удаления частей материала заготовки. При 3D печати материал добавляется послойно, что позволяет изготавливать детали сложной геометрической формы из дорогостоящих металлов с более высокой производительностью и экономической эффективностью. Для того чтобы осуществлять 3D печать в промышленном масштабе необходимо объединить робототехнику с программным обеспечением для 3D печати. В данной статье приводятся результаты адаптации промышленного робота KUKA для процесса 3D печати. В результате при помощи сварочного аппарата и сварочной проволоки были напечатаны объекты из стали разной геометрической формы и сложности. Разработанная методика 3D печати оказалась успешной и доказала, что промышленный робот в связке со сварочным аппаратом использоваться в качестве промышленного 3D принтера.

Ключевые слова: *аддитивные технологии, 3D печать, дуговая сварка в среде защитного газа, автономное программирование, промышленные роботы.*

Повышенное внимание к аддитивным технологиям (АТ) со стороны промышленного сектора в последнее время вызвано прежде всего необходимостью разработки современных экономически эффективных технологий производства. АТ позволяют изготавливать детали сложной геометрической формы с высокой производительностью и высоким коэффициентом использования материала. Одной из таких технологий является WAAM (wire arc additive manufacturing). Данная технология позволяет использовать промышленных роботов в связке со сварочным оборудованием [1, 2]. Благодаря использованию сварочных материалов, технология WAAM может применяться для печати практически любых

металлических сплавов, включая дорогостоящие сплавы титана и никеля. По сравнению с традиционными способами изготовления деталей (механическая обработка) WAAM имеет более высокую производительность (на 40-60 % выше), что позволяет сократить цикл финишной механообработки на 15-20% в зависимости от габаритов изделия [3-5].

В качестве источника тепла выступает электрическая дуга, которая генерируется между основным и свариваемым материалом. В качестве присадочного материала используются сварочные проволоки, которые на порядок дешевле металлических порошков, применяющихся в остальных аддитивных технологиях. Наряду с печатью новых деталей, WAAM может также использоваться для ремонтных и восстановительных операций.

Ввиду довольно сложного характера металлургических и сварочных процессов, протекающих во время расплавления металлов, многие аспекты параметров 3D печати должны быть учтены и глубоко изучены. Наиболее важными параметрам, оказывающими прямое влияние на качество наплаваемых деталей, являются сварочный ток, напряжение на дуге, скорость подачи проволоки и скорость самой печати. В данной статье будут приведены наиболее оптимальные параметры для наплавки стальной проволоки и даны рекомендации по улучшению процесса печати.

После настройки оптимальных параметров будет произведена наплавка простых объектов цилиндрической и квадратной формы. Затем будет произведена оценка качества наплавленных образцов и сделаны необходимые усовершенствования процесса печати.

Конечной целью данного проекта является разработка технологического процесса для печати реальной детали сложной геометрической формы.

Материалы и методика

В качестве присадочного материала используется сварочная проволока Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. Химический состав данной проволоки приведен в таблице 1. Наплавка проволоки осуществлялась на стальную пластину толщиной 16 мм.

Таблица 1 – Химический состав проволоки Св-08Г2С

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N
0.06	0.8	1.9	0.2	0.02	0.02	0.1	0.01

В качестве промышленного 3D принтера использовался робототехнический комплекс, установленный в Иркутском национальном исследовательском техническом университете (см. рисунок 1). Робототехнический комплекс включает: промышленный робот KUKA KR

210 R2700 prime, сварочный аппарат Lorch SpeedPulse S3 mobil и баллон с защитным газом CO₂.

Наплавка проволоки осуществлялась методом gas metal arc welding (GMAW). Данный метод также известен как metal inert gas (MIG) welding or metal active gas (MIG). При данном способе сварки электрическая дуга возникает между присадочной проволокой и металлом заготовки, в результате чего происходит расплавление проволоки. Для защиты расплавленного металла от загрязнений используется защитный газ CO₂ со скоростью подачи 10 л/мин.

Для создания 3D моделей объектов для печати использовался программы пакет САПР Autodesk Fusion 360. Для разделения модели на слои и установки параметров печати использовалась программа-слайсер Ultimaker Cura. Затем для симуляции процесса печати и программирования промышленного робота KUKA использовалось программное обеспечение RoboDK.

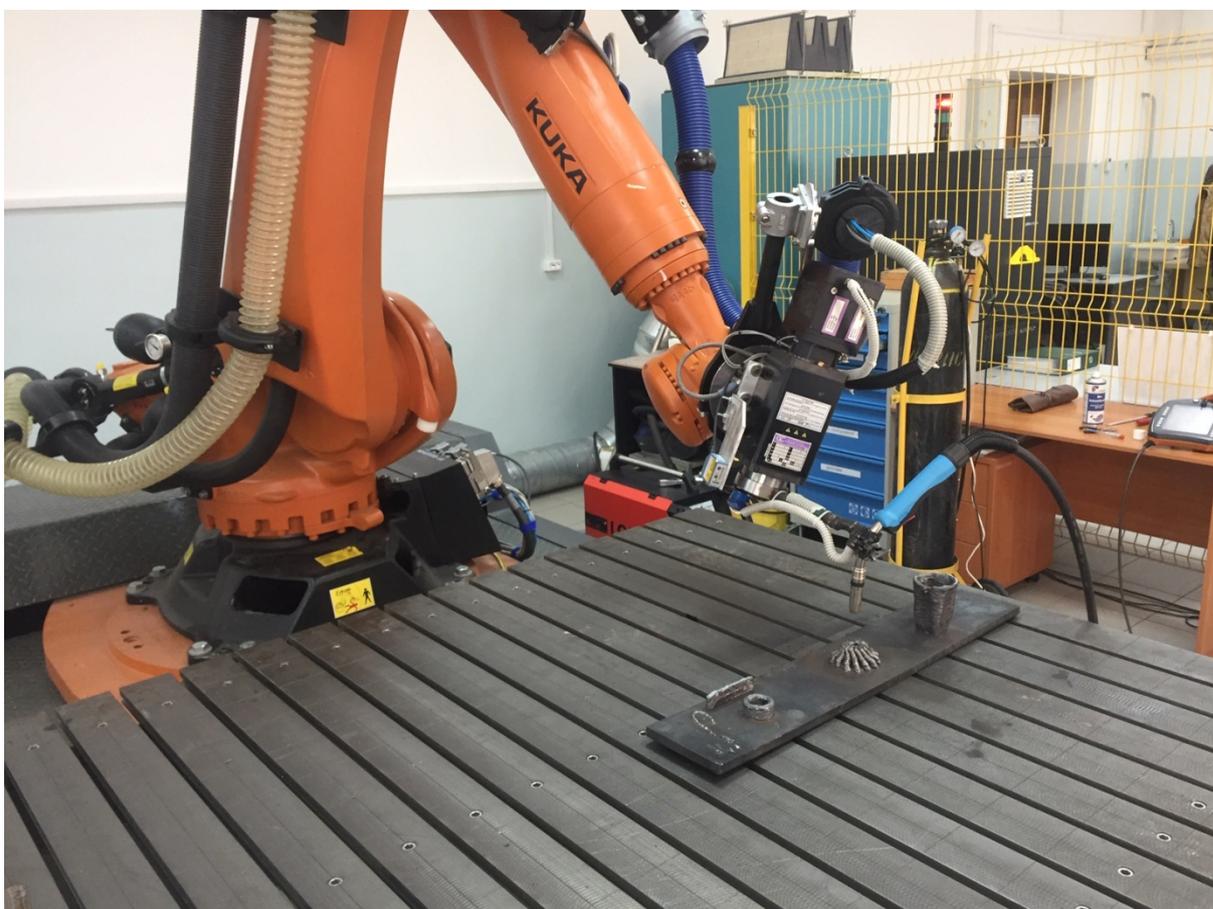


Рис. 1. Робототехнический комплекс для 3D печати

После симуляции и создания конечной программы печати она загружается на контроллер робота и затем запускается с пульта управления роботом.

Результаты

Основными параметрами, оказывающими главное влияние на формирование слоя, являются скорость движения горелки, скорость подачи проволоки, сварочный ток и напряжение. Выбор сварочного тока основан на диаметре проволоки. В нашем случае используется проволока диаметром 1,2 мм. Наиболее подходящий ток для такой проволоки лежит в диапазоне 100-120 А. Настройка тока в таких пределах позволяет добиться желаемого качества наплавляемого валика и его геометрии, обеспечивая необходимую производительность процесса. Так в результате настройки параметров была обнаружена обратная линейная зависимость между скоростью наплавки (скоростью движения горелки) и шириной получаемого валика. Было замечено, что с уменьшением скоростью наплавки ширина валика становится больше. На рисунке 2 изображены валики, наплавленные при разных параметрах.



Рис. 2. Валики, наплавленные при разных режимах

В таблице 2 представлено детальное сравнение геометрических размеров валиков, наплавленных на разных режимах. Валик №1 наплавлялся при скорости 0,005 м/сек. В результате валик получался слишком узким с неравномерным расплавлением металла вдоль оси движения горелки. Данную скорость нельзя использовать для наплавки многослойных объектов, поскольку точность размеров будет слишком низкой, а сам процесс наплавки будет нестабильным и трудноконтролируемым. Увеличение сварочного тока с сохранением данной скорости не показало лучших результатов, поскольку пришлось также увеличить скорость подачи проволоки, что привело к интенсивному разбрызгиванию расплавленного металла и формированию неравномерной геометрии валика.

Таблица 2 – Зависимость геометрии валика от параметров режима

№ валика	Ширина, мм	Высота, мм	Ток, А	Напряжение, В	Скорость подачи проволоки, м/мин	Скорость наплавки, м/сек	Вылет проволоки, мм
1	4	2	100	26	4	0.005	14
2	6	3	120	28	5	0.004	13
3	8	3	120	28	4.5	0.003	11
4	10	2	120	28	4.5	0.002	11
5	12	2	120	28	4.5	0.001	11

При наплавке валика №2 скорость наплавки была снижена до 0,004 м/сек при сварочном токе 120А. Снижение скорости наплавки способствовало формированию более качественного валика поскольку металл стал расплавляться более равномерно с наименьшими отклонениями от оси движения горелки. Однако, при такой скорости высота валика по центральной линии заметно больше, чем высота валика по краям. Это негативно скажется на наложении следующего слоя поскольку металл не сможет наплавиться равномерно на горообразную поверхность предыдущего слоя. В результате металл будет растекаться по краям валиков, оставляя незаполненной центральную линию. В этом случае будет довольно тяжело контролировать процесс и достичь желаемого точности геометрических размеров. Последующее снижение скорости до 0,003 м/сек привело к наилучшему результату. Формирование валика более чем удовлетворительное, форма валика близка к прямолинейной с минимальными отклонениями. Высота валика является оптимальной для наложения последующих слоев без ухудшения геометрической точности. При такой скорости наплавки будет более вероятно предсказать поведение металла в процессе многослойной наплавки и добиться необходимой точности геометрических размеров.

Уменьшение скорости до 0,002 и 0,001 м/сек при наплавке валиков №4 и №5 соответственно привело к получению наиболее широких валиков. При данных скоростях было замечено избыточное тепловложение, которое привело к пережогу металла и образованию неоднородной структуры, что несомненно приведет к образованию дефектов. Также при использовании данных параметров будет довольно сложно достичь геометрической точности и качества наплавляемых изделий.

Таким образом, наиболее оптимальными параметрами для наплавки стальной проволоки оказались следующие: сварочный ток – 100А, напряжение на дуге – 26 В, скорость подачи проволоки – 4,5 м/мин, скорость наплавки – 0,003 м/сек, вылет проволоки – 11мм. Однако при

наплавки многослойных объектов понадобится более тонкая настройка параметров в процессе самой наплавки.

На рисунке 3 изображены многослойные стенки, наплавленные при использовании вышеуказанных оптимальных параметров. В таблице 3 приведены характеристики наплавленных стенок. Как видно из таблицы, средняя толщина слоя составляет 2 мм. Скорость наплавки 0,003 м/сек действительно позволяет наплавливать равномерные и почти прямолинейные слои, однако дефекты все же присутствуют. Самыми заметными дефектами являются расплывание металла и уклон на конце стенок, что было вызвано серьезным тепловложением во время процесса наплавки.

Таблица 3 – Характеристики наплавленных стенок

№ стенок	Кол-во слоев	Высота, мм	Длина, мм	Ток, А	Напряжение, В	Скорость подачи проволоки, м/мин	Скорость наплавки, м/сек	Вылет проволоки, мм
1	13	27	100	10	26	4.5	0.003	11
2	10	20	100	100	26	4.5	0.003	11
3	10	20	100	100	26	4.5	0.003	11



Рис. 3. Наплавленные стенки

Кроме того, присутствуют включения нерасплавленной проволоки и капли разбрызганного металла. Некоторые стенки были наплавлены с небольшим отклонением от центральной оси стенки, что привело к образованию неравномерной толщины всей стенки. Для достижения

более точной геометрии и уменьшения количества дефектов необходимо контролировать тепловложение и постоянно регулировать параметры в процессе печати.

В процессе дальнейших экспериментов был наплавлен образец коробчатого сечения размером 60х60 мм (см. рисунок 4). Количество слоев составило 15, а общая высота 30 мм. Среднее значение толщина слоя также составило 2 мм.



Рис.4. Образец коробчатого сечения

Процесс наплавки образца коробчатого сечения отличается от наплавки стенок из-за присутствия углов. Из-за этого горелка постоянно меняет траекторию своего движения. Поскольку горелка движется по траектории, состоящей из 4-х отдельных линейных движений, в местах перехода происходят небольшие задержки. Это приводит к уширению валиков по углам, однако это не является дефектом, поскольку финишная механообработка поможет исправить эту ситуацию. В общем, формирование коробчатого сечения произошло довольно успешно, отклонения от геометрических размеров лежат в пределах допусков на механообработку.

Затем были наплавлены образцы цилиндрической формы (см. рисунок 5). Цилиндр №1 имеет диаметр 80 мм и состоит из 11 слоев с общей высотой в 22 мм. Цилиндр №2 имеет диаметр 50 мм и состоит из 24 слоев при общей высоте 48 мм.



Рис.5. Образцы цилиндрической формы

Толщина слоя, определенная в предыдущих экспериментах, также остается неизменной и составляет 2 мм

Важным особенностью при наплавки образцов цилиндрической формы оказался выбор точки начала печати каждого слоя. Поскольку печать каждого следующего слоя начиналась в одной точке, в том самом месте образовался небольшой наплыв, который привел к искажению геометрии цилиндров и уширению стенки в данной точке. Для того, чтобы избежать возникновения такого дефекта необходимо менять точку начала печати с каждым слоем, либо использовать спиралевидную траекторию движения горелки.

После настройки параметров и отработки их на образцах квадратной и цилиндрической формы был наплавлен стакан (см. рисунок 6).



Рис.6. Стакан

Размеры стакана: диаметр 70 мм, высота 120 мм, количество слоев 60, время печати 1ч.

После успешной печати было принято решение напечатать реальную деталь.

Импеллер – механизм для создания реактивной тяги (см. рисунок 7). Принцип его действия используется в авиационных двигателях. Поршневые механизмы давно отошли на задний план, так как реактивные двигатели более легкие, экономичные в работе, работают на более дешевом топливе. Направляющие лопатки могут регулироваться на разных механизмах.



Рис.7. Импеллер

Материалами для изготовления импеллеров служат высококачественные сплавы из жаропрочной стали, нержавеющей стали марок AISI 316 и AISI 304, а также различные сплавы алюминия.

Заготовки проходят комплекс механической обработки (см. рисунок 8) для снятия заусенцев, зазубрин и прочих дефектов. Применяют для этого токарно-фрезеровочные комплексы и фрезеровочные машины. После чего лопатки проходят термическую обработку, отпуск и нормализацию. После чего проводится комплекс испытаний на прочность и твердость.



Рис.8. Традиционный технологический процесс изготовления импеллера

Традиционный технологический процесс изготовления импеллеров состоит в основном из операций различных видов механической обработки. В результате в процессе изготовления около 50% материала основной заготовки расходуется на металлическую стружку. Поэтому данный процесс является экономически невыгодным, особенно когда импеллеры изготавливаются из дорогостоящих сплавов.

3D печать, с другой стороны, позволяет использовать до 100% полезной массы присадочного материала, притом, что только около 10% от массы конечной заготовки теряется на финишной механической обработке. Также, применение 3D печати позволяет значительно сократить количество технологических операций изготовления импеллера (см. рисунок 9), что делает этот процесс как экономически выгодным, так и высокопроизводительным.

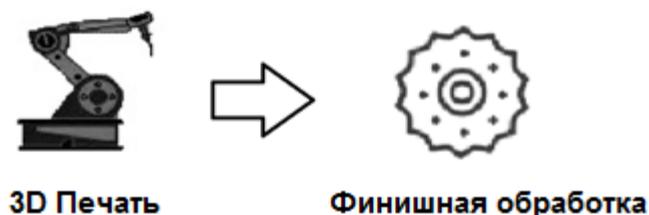


Рис.9. Альтернативный технологический процесс импеллера

Для того, чтобы напечатать импеллер необходимо создать его 3D модель. Autodesk Fusion 360 использовалась для моделирования данной

детали (см. рисунок 10). За основу бы взят импеллер из источника . Размеры и форма импеллера были несколько изменены для облегчения процесса печати.

После того, как модель создана, ее необходимо сохранить в формате STL, который распознает программа-слайсер. Затем модель загружается в слайсер для последующего разделения на слои. Поскольку мы печатаем прототип импеллера, то мы уменьшили масштаб детали на 60%, чтобы сократить время печати. Получившаяся модель имеет диаметр 80мм и высоту 30мм. С такими геометрическими размерами печать займет около 43 минут. После изменения геометрических размеров следует перейти к настройке параметров печати.

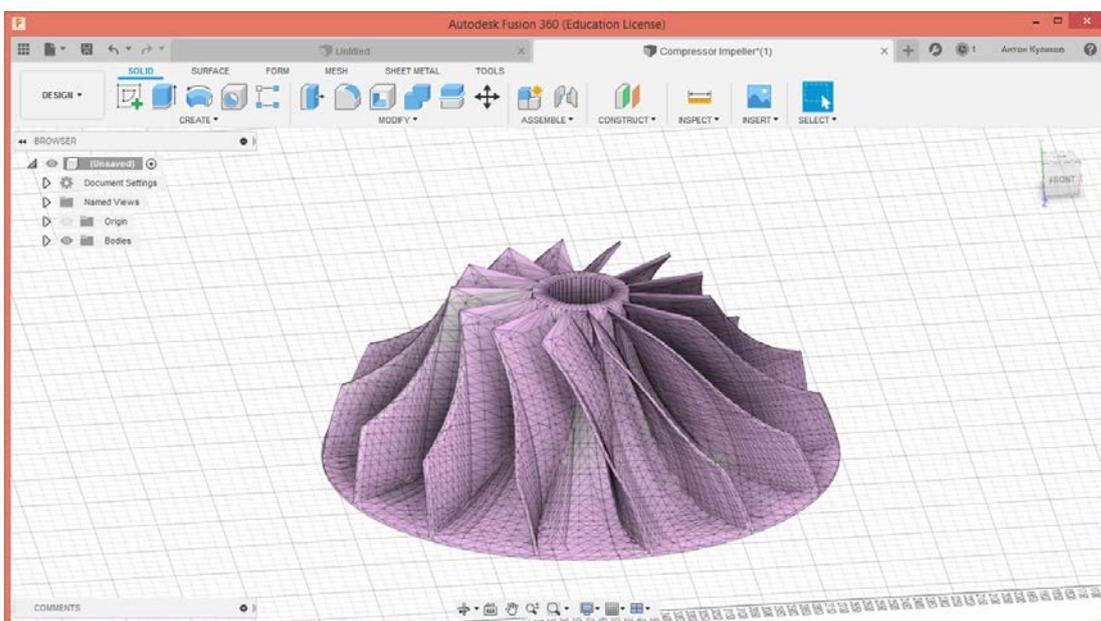


Рис.10. 3D модель импеллера

Прежде всего необходимо указать диаметр используемой проволоки. Для наплавки импеллера мы используем стальную проволоку Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. Следующими параметрами необходимо указать толщину (высоту) и ширину слоя. В предварительных исследованиях, не включенных в данную статью, были получены следующие значения: средняя толщина слоя равняется 2мм, а ширина наплавленного валика 10 мм. Данные значения были получены во время наплавки стенок при скорости 3 мм/сек. Данная скорость оказалась наиболее оптимальной для 3Д печати стальной проволокой.

Следующим шагом является выбор алгоритма движения сварочной горелки в процессе печати. Данный параметр является наиболее важным, поскольку именно он определяет качество будущей детали. Также мы можем выбрать в какой точке будет начинаться печать каждого нового слоя. Это является необходимым для того, чтобы исключить образования такого дефекта как наплыв. Наплыв возникает в том случае, если печать каждого нового слоя начинается в одной и той же точке. Также

образованию данного дефекта способствует небольшое замедление движения горелки перед новым слоем, что вызвано программными ограничениями. Поэтому необходимо правильно выбирать точку начала печати каждого слоя, чтобы она была незаметна, либо могла беспрепятственно удаляться финишной механической обработкой.

Оптимизировать движение горелки в процессе печати можно следующими способами:

1. Задание точки начала печати каждого нового слоя вручную. При данном способе алгоритм программного обеспечения поместит точку как можно ближе к ее указанной координате. Однако поскольку при данном режиме печать каждого слоя будет осуществляться в одинаковой точке, то в местах начала/окончания печати будут образовываться наплывы, которые могут привести к искажению геометрии детали, что в конечном итоге приведет к неравномерной высоте наружных стенок и уширению стенки в этом месте.

2. Начало печати в самой ближайшей точке траектории. Данный режим позволяет минимизировать длину перемещений между слоями. Точка начала печати при этом может располагаться в разных местах. Поскольку перемещения горелки между слоями станут короче, длительность всего процесса печати значительно сократится. Наплыв также будет немного меньше, потому что меньше материала будет наплавлено в том месте, где горелка начинает печать нового слоя. Однако точка все равно будет располагаться по возможности ближе к тому месту, где находится горелка в момент окончания печати предыдущего слоя. Выбирается не самое близкое значение координаты точки, а усредненное значение. Это позволяет несколько уменьшить перемещения и одновременно подобрать подходящую координату.

3. Печать нового слоя происходит в случайном месте. Точка начала печати изменяется с каждым слоем, что позволяет добиться почти равномерной поверхности стенок. Поскольку точки начала печати разных слоев не совпадают, наплыв будет едва заметен. Главное преимущество этого режима заключается в том, что будущая деталь будет иметь ровную поверхность с точными размерами по всем осям. Благодаря такому алгоритму движения возникновение потенциальных дефектов сведено к минимуму.

4. Спиральный алгоритм движения. Данный режим позволяет печатать объекты, каждый слой которых состоит из одного контура, по спиральной траектории. Поскольку горелка постепенно поднимается в процессе печати, переход на каждый новый слой не будет заметен. Этот метод позволяет полностью исключить появление наплывов и любых других дефектов, возникающих при остановке горелки в момент перехода к каждому следующему слою.

Поскольку каждый слой импеллера имеет замкнутый контур, а диаметр окружностей уменьшается постепенно с каждым слоем, спиральный алгоритм движения горелки наиболее предпочтителен для печати данной детали. При спиральном движении, печататься будет

только внешний контур стенки. Высота горелки будет постепенно увеличиваться по мере увеличения толщины слоя. Таким образом спираль создается по контуру модели. Перемещения горелки от одного слоя к другому исключены, поскольку горелка будет постепенно наращивать высоту в процессе печати

После выбора алгоритма движения горелки необходимо настроить скорости печати. Как уже упоминалось ранее, экспериментально было установлено, что наиболее оптимальной скоростью движения горелки при наплавке стальной проволоки является 3 мм / сек. Также можно задать скорость движения грелки при переходе между слоями, однако данный параметр рекомендуется устанавливать для печати объектов, которые не могут быть напечатаны с помощью спирального метода. Скорость перемещения горелки, как правило, намного выше, чем скорость самой печати. Более высокая скорость перемещения может немного сократить время печати. Однако увеличение скорости также может привести к повышенным вибрациям горелки ввиду возникновения колебаний сочленений робота при резких остановах.

Для более тонкой настройки процесса печати, рекомендуется добавить печать дополнительных тестовых слоев перед печатью самой детали, чтобы подготовить проволоку к наплавке основной детали. Тестовый слой печатается вокруг будущей детали, после чего горелка перемещается по запрограммированной траектории к точке начала печати основной детали. Тестовый слой никак не повлияет на качество будущей детали. Как только все необходимые параметры печати установлены, необходимо выполнить нарезку детали на слои. После нарезки можно увидеть расслоенную модель (см. рисунок 11). Время печати также будет рассчитано автоматически. В данном случае прототип импеллера будет печататься 43 минуты.

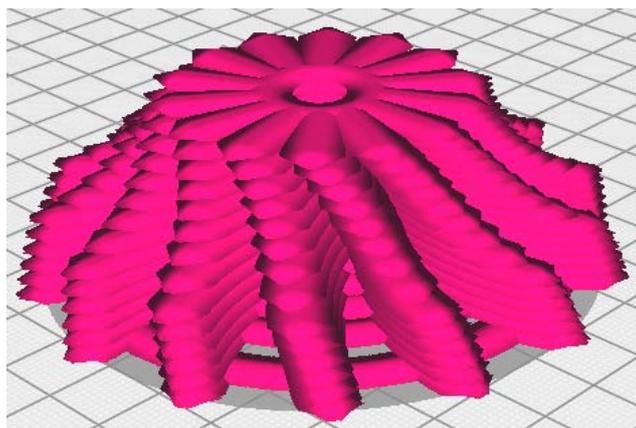


Рис.11. 3D модель импеллера после расслоения

Следующим шагом является сохранение разрезанной модели импеллера в формате g-code. G-code – это формальное название языка программирования для станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Этот язык также поддерживается большинством современных 3D-принтеров. Программа в формате g-code необходима для создания

траектории движения горелки в процессе наплавки металлической проволоки. G-code файл затем загружается в программу для моделирования и программирования промышленных роботов. В программе необходимо создать роботизированную ячейку, включающую рабочее место, промышленный робот и рабочий инструмент (см. рисунок 12). Для печати импеллера используется робот KUKA KR 210 r2700 prime.

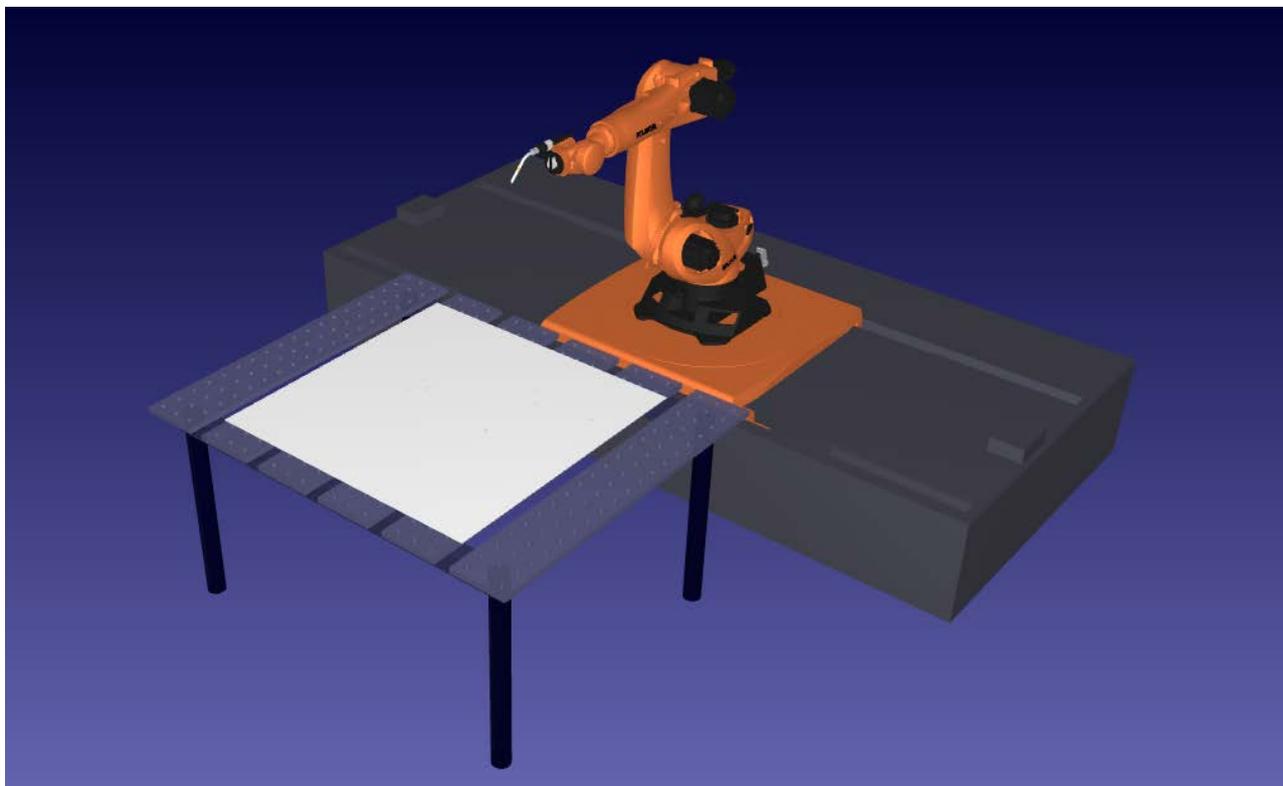


Рис.12. Роботизированная ячейка

После создания g-code файла, моделирование процесса печати продолжается в программном обеспечении для автономного программирования промышленных роботов. Автономное программирование позволяет тестировать и производить симуляцию роботизированных программ в компьютерной среде, устраняя ошибки и неполадки, возникшие при программировании с помощью пульта управления роботом. Симуляция и автономное программирование позволяют анализировать несколько сценариев работы роботизированной ячейки перед созданием робототехнического комплекса в реальных промышленных условиях. Автономное программирование является лучшим способом оптимизации робототехнического комплекса и позволяет использовать роботов с максимальной эффективностью. Благодаря автономному программированию, такие новые технологии как WAAM, могут быть испытаны и оптимизированы в максимально короткие сроки, что в свою очередь способствует ускорению процесса внедрения роботизированной 3Д печати в реальное производство.

Для использования промышленных роботов в качестве 3-х или 5-ти осевых 3D-принтеров требуются инструменты автономного программирования для перевода программ 3D принтеров в программы роботов. Такое программное обеспечение позволяет достичь тех же результатов с промышленными роботами, что и при использовании 3D-принтеров. На основе расслоенной модели импеллера создается траектория движения робота и создается конечная программа печати. Затем программа печати конвертируется в программу, написанную на языке робота.

Для выполнения проекта 3D-печати необходимо определить систему координат и рабочий инструмент. Система координат импеллера должна быть совмещена с системой координат рабочей области печати для того, чтобы система координат реальной рабочей среды была правильно определена. Кроме того, для стартовых и конечных движений робота должны быть созданы команды подхода и отхода.

Чтобы свести к минимуму движения сочленений робота и сохранить ориентацию рабочего инструмента как можно более постоянной, необходимо использовать алгоритм ориентации инструмента, обеспечивающий минимальное изменение ориентации инструмента в процессе печати. Позиционирование робота требует определения центральной точки инструмента робота используя целевые точки, расположенные в декартовом пространстве. Центральная точка инструмента робота должна быть корректно определена с использованием более чем 3 или 4 конфигураций положения инструмента. Это позволяет получить более точный результат и помогает избежать ошибок настройки. Как правило, для наиболее точной настройки требуется 8 или более точек. Если высокая точность не требуется, то 3-х точек будет достаточно.

Определение местоположения объекта печати относительно робота выполняется путем определения внешней системы координат. Для данной настройки необходимо совершить касания нескольких точек с помощью рабочего инструмента. Перед определением внешней системы координат необходимо правильно откалибровать центральную точку инструмента робота. Также можно использовать точки, измеренные с помощью внешней измерительной системы.

Затем можно приступить к симуляции процесса печати. Все достижимые роботом точки будут окрашены в зеленый цвет, недостижимые точки – в красный цвет. Для того чтобы сделать точки достижимыми для робота, их необходимо повернуть относительно желаемой траектории движения инструмента. Если некоторые точки не могут быть достигнуты, рекомендуется переместить систему координат или установить меньшее количество ограничений для поворота инструмента. Затем необходимо обновить программу, чтобы все заданные

настройки вступили в силу. Если программа записана успешно, в поле настроек появится зеленая отметка. Затем на станции появится новая программа печати, а рассчитанная траектория движения инструмента будет показана зеленым цветом.

Деталь должна быть расположена в удобном для печати месте, где робот может легко выполнить загруженную программу. В соответствии с загруженной моделью программа автоматически генерирует траекторию движения горелки (см. рисунок 13).

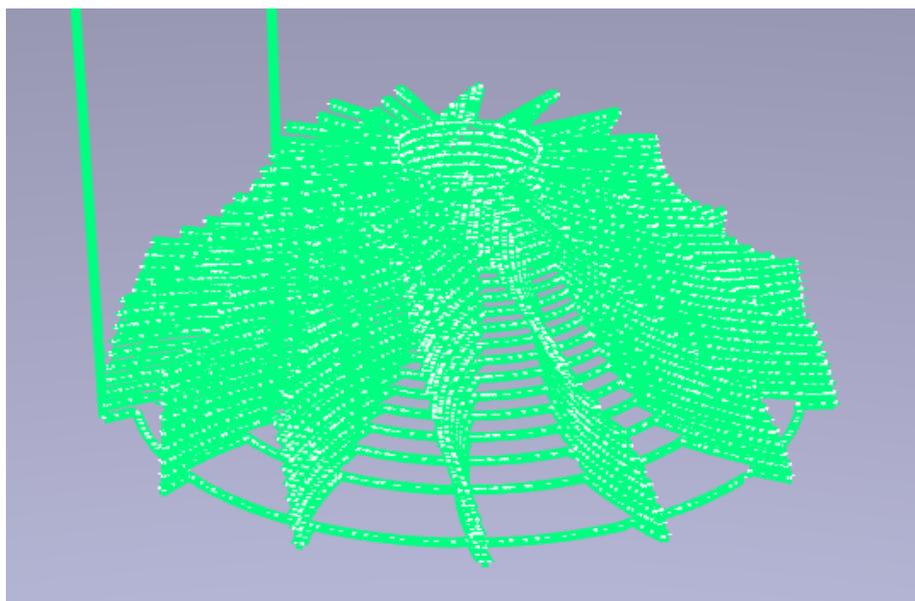


Рис.13. Траектория движения горелки

Загруженный g-code файл проверяется на наличие ошибок и возможность для робота выполнить эту программу. Программное обеспечение также позволяет включать дополнительные функции в процесс печати, такие как включение и выключение электрической дуги, а также дополнительно устанавливать скорость движения, похода и отхода робота. Также необходимо правильно откалибровать сварочную горелку, чтобы ее центральная точка точно соответствовала точке, с которой начинается печать.

Программное обеспечение автоматически оптимизирует траекторию робота, избегая сингулярностей, ограничений осей и столкновений. Далее необходимо ввести координаты расположения рабочей зоны робота и рабочего инструмента из реальной рабочей среды, после чего программное обеспечение еще раз проверит возможность выполнения этой программы. После завершения всех вычислений и проверок можно произвести симуляцию процесса печати и увидеть, как будет протекать процесс 3D-печати (см. рисунок 14).

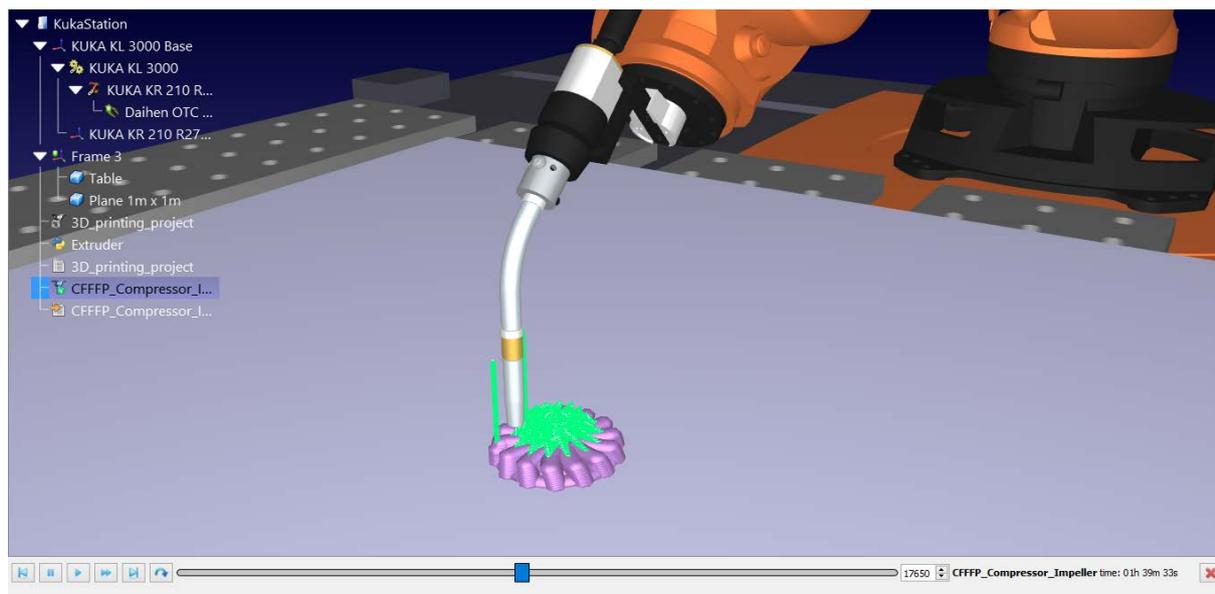


Рис.14. Симуляция процесса печати

После завершения симуляции можно увидеть, как будет выглядеть импеллер после завершения процесса печати (см. рисунок 15). После успешной симуляции виртуальной программы создается окончательная программа, написанная на языке робота. Постпроцессор выполняет преобразование симуляции в соответствующую роботизированную программу. Особенности каждого конкретного робота учитываются постпроцессором. По умолчанию каждый робот имеет стандартный постпроцессор, определенный программным обеспечением для автономного программирования. Все промышленные роботы KUKA используют язык KRL.

Постпроцессоры обладают полной универсальностью для создания узкоспециализированных роботизированных программ. Постпроцессоры могут быть легко модифицированы под каждую конкретную задачу. Поскольку контроллер робота имеет ограничения на размер файла или количество строк кода, длинные программы не могут быть переданы роботу. В частности, программы для 3D-печати могут содержать сотни тысяч строк кода. Для решения этой проблемы необходимо разбивать длинные программы на подпрограммы, которые будут выполняться последовательно после запуска основной программы.

После того, как программа была сгенерирована, она может быть либо отправлена роботу непосредственно из интерфейса симулятора, либо перенесена на флэш-накопитель и загружена в шкаф управления роботом. Программа может быть передана непосредственно с компьютера в робота с помощью протокола передачи файлов или других специальных протоколов. Чтобы начать передачу, необходимо определить IP-адрес

робота и настроить параметры протокола передачи файлов в меню подключения робота.

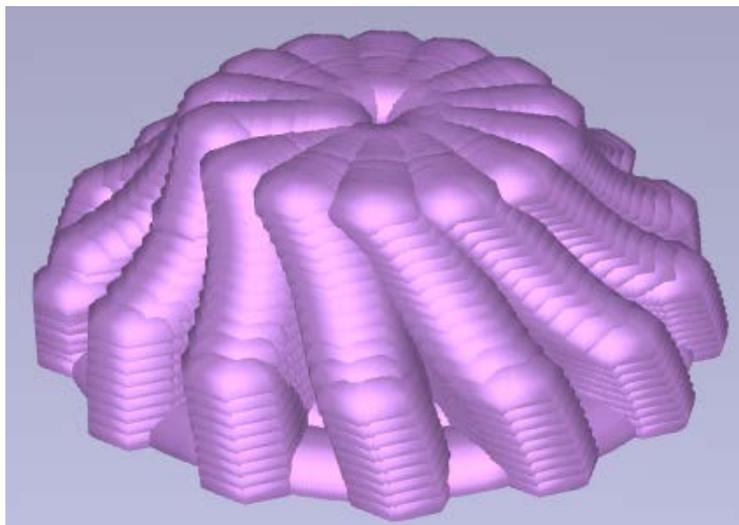


Рис.15. ИмPELLер после симуляции печати

После загрузки программы на робота того ее необходимо проверить на пульте управления, чтобы выявить ошибки программирования. На пульте управление также имеется возможность добавления или удаления недостающих команд. Если программа была проверена успешно и траектория движения горелки оказалась правильной, то можно приступить к включению сварочного аппарата и настроек сварочных режимов. Затем можно приступить к процессу самой печати.

Напечатанный прототип имPELLера из стали представлен на рисунке 16.



Рис.16. Напечатанный прототип имPELLера

Импеллер имеет следующие размеры: диаметр 80 мм, высота 30 мм, количество слоев 15, толщина одного слоя 2мм.

Обсуждение

Программное обеспечение для 3Д печати в связке с программным обеспечением для автономного программирования промышленных роботов позволило разработать и успешно напечатать прототип импеллера из стали. Однако чтобы осуществлять 3Д печать таких деталей на промышленном уровне необходимо произвести усовершенствование робототехнического комплекса путем оснащение его дополнительными датчиками и программными средствами узкой специализации. Например, необходимо внедрить систему технического зрения для удаленного слежения за процессом печати. Это требуется прежде всего для того, чтобы контролировать процесс печати в реальном времени для предупреждения появления возможных дефектов и отклонений геометрических размеров детали от заданных при проектировании в САПР. Кроме того, во время процесса печати необходимо контролировать и измерять показатели сварочного тока, напряжения и скорости подачи проволоки. Для этого сварочные аппараты должны иметь обратную связь, чтобы иметь возможность регулировать режимы сварки в процессе печати.

Также требуется узкоспециализированное программное обеспечение, специально предназначенное для 3Д печати по технологии WAAM. Стандартное программное обеспечение для 3D-печати не учитывает всех особенностей сложных металлургических и сварочных процессов, которые имеют огромное значение для 3D-печати металлических изделий. Термический цикл сварки и изменение микроструктуры непосредственно влияют на качество и механические свойства наплавляемых деталей.

В ходе данного проекта был напечатан уменьшенный прототип импеллера. Это было сделано исключительно для того, чтобы сократить время печати и доказать возможность использования робототехнического комплекса в связке с программным обеспечением для 3Д печати по новой технологии WAAM. Данный технологический процесс оказался успешным с точки зрения оптимизации и осуществления печати. Однако о качестве наплавленной детали можно судить лишь только визуально, поскольку никаких испытаний механических свойств еще не проводилось. Результаты исследования микроструктуры металла наплавленного импеллера, а также результаты испытаний будут представлены в будущих публикациях.

Задачами будущих исследований является разработка технологического процесса для печати деталей из дорогостоящих металлов, таких как титановые и никелевые сплавы. Сталь все еще может использоваться для печати прототипов деталей, однако для производства

реальных деталей необходим переход к новым материалам [6-12]. Также необходимо разработать процесс для печати объектов более сложной геометрической формы с большими размерами.

Аддитивное производство является перспективным направлением исследований, поскольку оно позволяет изготавливать детали сложной геометрической формы и значительно экономить количество использованного присадочного материала. Робототехника в свою очередь открывает новые возможности для осуществления 3Д печати на промышленном уровне. Роботы могут использоваться как промышленные 3Д принтеры, а гибкость и адаптивность их программирования соответствует тенденциям и особенностям малого, среднего и крупного производства.

В данной статье описан технологический процесс для 3Д печати прототипа импеллера. Подробно описана методика программированию промышленного робота от создания САПР модели до печати реальной детали. Поскольку в настоящее время специализированное программного обеспечения для 3D-печати металлических изделий отсутствует, одним из вариантов является оптимизация имеющегося программного обеспечения для 3D-принтеров. Слайсер позволяет нарезать модель САПР на слои и задавать параметры печати. Программное обеспечение для автономного программирования промышленных роботов позволяет использовать промышленные роботы в качестве 3D-принтеров. Сгенерированный в слайсере g-код легко распознается в программе и затем переводится на язык робота.

Доступные настройки программного обеспечения позволяют создавать программы для 3D-печати как простых полых фигур, таких как цилиндр или квадрат, так и довольно сложных объектов как импеллер. Технологический процесс, разработанный для печати импеллера, оказался успешным и доказал, что связка робототехнический комплекс + программное обеспечения для 3Д печати может быть использована для 3D-печати металлических изделий по технологии WAAM.

Список использованных источников

1. Frigne, P., & Braembussche, R. V. D. (1984). Distinction Between Different Types of Impeller and Diffuser Rotating Stall in a Centrifugal Compressor With Vaneless Diffuser. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 106(2), 468–474. doi: 10.1115/1.3239589
2. Krain, H. (1981). A Study on Centrifugal Impeller and Diffuser Flow. *Journal of Engineering for Power*, 103(4), 688–697. doi: 10.1115/1.3230791
3. Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J., & Norrish, J. (2018). A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties,

defects and quality improvement. *Journal of Manufacturing Processes*, 35, 127–139. doi: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001

4. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. (2015). Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(1-4), 465–481. doi: 10.1007/s00170-015-7077-3

5. H.E. Gravele, “Compressor impeller and method of manufacture”. U.S. Patent 4,093,401, 1978

6. Wu, B., Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Han, J., & Fei, Z. (2017). Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 250, 304–312. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.07.037

7. Wang, F., Williams, S., & Rush, M. (2011). Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured Ti6Al4V alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 57(5-8), 597–603. doi: 10.1007/s00170-011-3299-1

8. Cong, B., Ding, J., & Williams, S. (2014). Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(9-12), 1593–1606. doi: 10.1007/s00170-014-6346-x

9. Xu, F., Lv, Y., Xu, B., Liu, Y., Shu, F., & He, P. (2013). Effect of deposition strategy on the microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy fabricated by pulsed plasma arc deposition. *Materials & Design*, 45, 446–455. doi: 10.1016/j.matdes.2012.07.013

10. Baufeld, B. (2011). Mechanical Properties of INCONEL 718 Parts Manufactured by Shaped Metal Deposition (SMD). *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21(7), 1416–1421. doi: 10.1007/s11665-011-0009-y

11. Haden, C., Zeng, G., Carter, F., Ruhl, C., Krick, B., & Harlow, D. (2017). Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties. *Additive Manufacturing*, 16, 115–123. doi: 10.1016/j.addma.2017.05.010

12. Ding, D., Pan, Z., Duin, S. V., Li, H., & Shen, C. (2016). Fabricating Superior NiAl Bronze Components through Wire Arc Additive Manufacturing. *Materials*, 9(8), 652. doi: 10.3390/ma9080652

Влияние технологической наследственности на выбор методов удаления заусенцев с малогабаритных деталей СВЧ-электроники

Ю.И. Карлина, Д.А. Журавлёв, Т.А. Опарина

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Исследовано влияние технологической наследственности на операции лезвийной механообработки на выбор методов удаления заусенцев с малогабаритных деталей СВЧ-электроники. Проведен анализ проблемы возникновения заусенцев на малогабаритных деталях СВЧ-электроники, анализ параметров заусенцев и степени их влияния на выбор метода удаления заусенцев. Выявлены параметры, влияющие на количество, размер, расположение заусенцев на операции лезвийной механообработки. Необходимо создание базы нормативно-справочной информации по видам обработки для конкретных материалов, инструментов, станков по качествам точности.

Ключевые слова: *технологическая наследственность, обработка на станках с ЧПУ, высокоточное производство, качество поверхности, заусенец.*

Проблема обеспечения требуемого качества деталей с наименьшими издержками является актуальной для всех предприятий машиностроения. Технологичность изделия во многом обеспечивает его рентабельность и конкурентоспособность на рынке.

Под обеспечением качества изделия понимают совокупность технических и организационных мер, гарантирующих выполнение всех требований, предъявляемых к качеству продукции. Вопросы качества деталей рассматриваются на основе физических величин отказов в работе. В связи с этим необходимо исследовать условия, приводящие к отказам. Изменение свойств изделий в процессе их изготовления и эксплуатации объясняется явлениями технологической наследственности.

Под *технологической наследственностью* понимают явление переноса свойств объектов от предшествующих технологических операций к последующим.

Процесс технологического наследования в ходе изготовления деталей предполагает два направления, по которым формируются качественные показатели детали. На первом направлении показатели характеризуют все свойства обрабатываемого объекта. Второе

направление связано с особенностями проведения самой операции. Готовая деталь отражает особенности обоих направлений.

Носителем наследственной информации являются материал детали и ее поверхность с параметрами, описывающими состояние этих поверхностей. Носители информации активно участвуют в технологическом процессе. В ходе различных операций они могут менять свои свойства полностью или частично. Следовательно, для обеспечения качественных показателей деталей следует управлять процессом технологического наследования [1].

В данном исследовании рассмотрим влияние технологической наследственности на выбор методов уделения заусенцев с малогабаритных деталей СВЧ-электроники.

Анализ проблемы возникновения заусенцев на малогабаритных деталях СВЧ-электроники.

Характерными особенностями деталей для СВЧ-электроники являются малые габариты, высокая точность размеров, высокие требования к качеству поверхности, наличие внутренних труднодоступных поверхностей. Габаритные размеры внутренних проводников коаксиальных радиокомпонентов составляют до 0,039 мм в диаметре и длиной до 15 мм, диаметр внешних проводников до 6 мм, а длина не превышает 25 мм. Передача сигнала в коаксиальных радиокомпонентах осуществляется по внешней стороне внутреннего проводника и по внутренней стороне наружного проводника. Поэтому детали подлежат гальваническому покрытию толщиной 2 – 3 микрона слоем высокопроводящего сплава. В дальнейшем эти детали поступают на сборку, во время которой сопрягаемые поверхности должны плотно прилегать к друг другу, а высокопроводящий слой не должен быть нарушен. Поэтому заусенцы на этих деталях не допускаются. Материалы, из которых изготавливают детали для коаксиальных радиокомпонентов являются трудно обрабатываемыми. Для негерметических соединителей проводники изготавливают из латуни или бериллиевой бронзы, так как бериллиевая бронза имеет высокие пружинящие свойства после закалки, что позволяет плотно обжать ламели при сборке. Для герметических соединителей используют сплав 29 НК для получения согласованных по величине коэффициентов термического расширения спаев со стеклом С52-1. На деталях из этих материалов устранить появление заусенцев не получается. Поэтому необходимо проводить дополнительную обработку по устранению заусенцев.

По геометрическим особенностям детали коаксиальных радиокомпонентов можно разделить на две группы:

- детали, не имеющие внутренних труднодоступных поверхностей это внутренние проводники,
- детали, имеющие внутренние поверхности или резьбы это наружные проводники.

Анализ параметров заусенцев и степени их влияния на выбор метода удаления заусенцев.

Удаление заусенцев с деталей, не имеющих внутренних поверхностей легко осуществляется обработкой в галтовочном барабане. Однако эта операция проводится в несколько этапов разными наполнителями в течение 1 – 3 часов в зависимости от размеров и количества заусенцев.

Удаление заусенцев с деталей, имеющих труднодоступные внутренние поверхности, более сложная задача [2-5]. Как правило, используют комбинацию из предварительной обработки внешних поверхностей в галтовочном барабане с последующей ручной слесарной операцией по удалению заусенцев с внутренних поверхностей. Затраты на проведение такой обработки также во много зависят от количества и размеров заусенцев. Удаление крупных заусенцев с сильно укрепленным корнем непростая задача, возможно возникновение зарезов в поверхность деталей и браковки детали.

Существуют также альтернативные способы удаления заусенцев, наиболее привлекательным из которых видится термоимпульсное удаление заусенцев. Однако, для термоимпульсного удаления заусенцев имеются ограничения. Размер заусенцев, а точнее толщина корня заусенца не должна превышать 0,1 мм для деталей из латуни и бериллиевой бронзы, и 0,3 мм для деталей из сплава 29 НК. Для деталей, имеющих тонкостенные участки, соотношение минимальной толщины детали и толщины заусенца менее 1 / 6 [6-7].

Как видно, на выбор метода удаления заусенцев, его затратность, влияет количество, размер и расположение заусенцев [3]. Технологическая наследственность от операции лезвийной механообработки обуславливает выбор способа удаления заусенцев и его затратность.

Обеспечение получения контролируемого количества и размеров заусенцев необходимо обеспечить на операции лезвийной механообработки.

Подбор оборудования, инструмента, режимов обработки, а также стратегии обработки необходимо проводить с целью минимизации количества, размеров, направления и расположения заусенцев.

Для изготовления деталей коаксиальных радиокомпонентов целесообразно использовать высокоточные токарные прутковые автоматы CITIZEN или часовые станки, выбирать инструмент для микромеханики со специальной геометрией и твердым покрытием, обеспечивающим хороший отвод тепла от обрабатываемой поверхности. Наиболее подходит для этого инструмент швейцарских фирм UTILIS, Fraisa, IFANGER, Applitec.

Последовательность обработки поверхностей должна быть выбрана так, чтобы заусенец на кромке не выходил на ответственную поверхность [8-10].

Режимы обработки подбираются экспериментальным способом. На размер и количество заусенцев оказывают влияние степень износа инструмента, а также скорость, глубина резания и подача [11-15]. Подобранные для каждого материала и инструмента оптимальные значения скорости резания, подачи и глубины резания должны быть занесены в справочник для дальнейшего использования при назначении режимов обработки других деталей с целью минимизировать количество дорогостоящих натуральных экспериментов на станках.

Выводы.

На выбор метода удаления заусенцев, его затратность, наибольшее влияние оказывают такие параметры заусенцев как количество, размер, толщина корня, расположение и направление заусенцев. Технологическая наследственность от операции лезвийной механообработки обуславливает выбор способа удаления заусенцев и его затратность.

Обеспечение получения контролируемого количества и размеров заусенцев необходимо обеспечить на операции лезвийной механообработки.

Подбор оборудования, инструмента, режимов обработки, а также стратегии обработки необходимо проводить с целью минимизации количества, размеров, направления и расположения заусенцев.

Основные параметры, от которых зависит решение минимизации количества и размеров заусенцев – это качество и степень износа инструмента, последовательность обработки поверхностей, режимы обработки, такие как скорость резания, подача, глубина резания.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90184.

Список использованной литературы:

1. Завадская Н.Ю., Майорова К.А. Анализ проблем технологической наследственности при изготовлении деталей машин // Научное сообщество студентов XXI столетия. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ: сб. ст. по мат. XLIII междунар. студ. науч.-практ. конф. № 6(42). URL: [https://sibac.info/archive/technic/6\(42\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/6(42).pdf) (дата обращения: 16.04.2020)

2. Сергиев, А.П. К вопросу заусенцеобразования / Сергиев А.П., Логачев В.Н. // Образование, наука, производство и управление: Сборник трудов международной научно-практической конференции: В 4-х т. - Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2006. -Т.1. с. 399-400.

3. Проскурин А.А. Разработка устройства и исследование режимов реверсивной вырубки деталей из тонколистового проката без

заусенцев // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Нац. исслед. технол. ун-т. Москва, 2016. – 172 с.

4. Торопов А.А. Прогнозирование и минимизация заусенцев при обработке резанием, моделирование процессов их образования // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Санкт-Петербургский государственный технический университет. Санкт-Петербург, 1999. – 235 с.

5. Hashimura M., Chang Y.P., Dornfeld D. Analysis of burr formation mechanism in orthogonal cutting// Trans.ASME.J.Manuf.Sci and Eng. 1999. 121, No 1. P. 1-7.

6. Альфа Стил. Инновационная технология снятия заусенцев. [Электронный ресурс] URL: http://alfastil.spb.ru/data/files/Термоимпульсная_установка_октябрь.pdf. Дата доступа 09.04.2020.

7. Современные технологии удаления заусенцев в отверстиях малых диаметров при изготовлении деталей гидравлического оборудования. Интернет-ресурс: <https://stanko-arena.ru/article/sovremennyye-tekhnologii-udaleniya-zausentsev-v-otverstiyakh-malykh-diametrov.html>. Дата доступа 27.04.2020.

8. Аверин В. В., Гусельников В. С. Автоматизация проектирования управляющих программ / Изв. вузов. Приборостроение, 2010, № 6 (53), с. 67-71.

9. Вороненко В.П., Седых М.И., Шашин А.Д. Проектирование и эффективная эксплуатация производственных участков многономенклатурного машиностроительного производства // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева. - 2017.- №1 (40). - С.182-189.

10. Вороненко В.П., Шашин А.Д. Планирование опытного производства с учетом его текущего состояния // Автоматизированное проектирование в машиностроении: Материалы V международной заочной научно-практической конференции. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – №5. – 134 с.

11. Маданов А.В. Анализ проблем при обработке деталей сложной геометрии и путей их решения на этапе технологической подготовки производства / Проблемы науки. 2015. № 1 (1). С. 14-16.

12. Инженерия поверхности деталей / под ред. А.Г. Сулова. М. : Машиностроение. 2008. 320 с.

13. Results of the Complex Studies of Microstructural, Physical and Mechanical Properties of Engineering Materials Using Innovative Methods / V.I. Shastin. et al. // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12. № 24. P. 15269–15272.

14. Братан С.М., Новиков П.А., Сидоров Д.Е. Теория резания. Практикум. Севастополь: СевНТУ. 2010. 248 с.

15. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975, 343 с.

***Моделирование формирования основных параметров качества
поверхностного слоя при дробеударном упрочнении деталей***

Ле Чи Винь, В.П.Кольцов, Нгуен Минь Хоанг

Иркутский Национальный Исследовательский Технический
Университет, ул. Лермонтова 83, г. Иркутск, 664074, Россия

В авиастроении при изготовлении крыльев и обшивок самолета, работающих в условиях постоянных циклических нагрузений для повышения сопротивления усталости широко применяется операция дробеударного упрочнения [1-13]. При дробеударном упрочнении круглая стальная дробь выполняет функцию абразивного материала, ударяясь в материал каждая частичка дроби действует подобно ударению микромолотка, которое, в свою очередь, приводит к образованию отпечатка на поверхности материала и формированию слоя с высокими сжимающими напряжениями под образованной полусферой холоднодеформированного материала. В результате этой операции существенно изменяются параметры и показатели поверхностного слоя деталей, в число которых входят шероховатость поверхности, микротвёрдость, толщина упрочненного слоя, остаточные напряжения в упрочненном слое и т.д. Назначение режимов дробеударного упрочнения, обеспечивающих эти показатели, вследствие недостаточной изученности и исследований самого процесса упрочнения, отсутствия стандартного дробеударного оборудования и надёжных методик выбора режимов в настоящее время представляет известные трудности. Проведение же предварительных экспериментальных исследований ограничивается их высокой трудоёмкостью. Решением проблемы выбора режимов в каждом конкретном случае может быть использование методов моделирования дробеударного процесса с помощью программных продуктов инженерного анализа для определения режимов при конкретных условиях обработки.

Целью данной работе является моделирование процесса формирования толщины упрочненного слоя и остаточных напряжений в поверхностном слое детали из алюминиевого сплава в результате ударного воздействия потока дроби с помощью программы инженерного анализа. На основании результатов исследования построены математические модели для определения толщины упрочненного слоя и распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя в зависимости от параметров ударного воздействия потока дроби.

Ключевые слова: *дробеударное упрочнение, обработка дробью, остаточные напряжения, толщина упрочненного слоя, отпечатки дроби, степень покрытия, моделирование удара, метод инженерного анализа.*

Моделирование удара потока дроби при параметрах упрочнения

Для изучения напряженно-деформированного состояния обрабатываемого материала при упрочнении в последнее время широко применяются методы математического моделирования и программы инженерного анализа методом конечных элементов [14-16].

Для исследования формирования толщины упрочненного слоя и остаточного напряжения в поверхностном слое при режимных параметрах обработки дробью ударной установки контактного типа ДУФ-4М (установка ИРНТУ, внедренная на Иркутском Авиационном заводе) применяли программу Ansys модуля динамического анализа.

В качестве материала детали был взят алюминиевый сплав В95.

Анализ существующих работ по дробьюударному упрочнению показал, что хорошее качество упрочненного слоя можно получить при обработке дробью со степенью покрытия отпечатками дроби на обработанной поверхности в пределах близких к 100%.

При моделировании процесса упрочнения рассмотрим случай при допущении, что отпечатки дроби на обработанной поверхности имеют форму окружности одинакового размера. После удара первого потока дроби, отпечатки дроби расположены рядом друг с другом (рис. 1а), а после второго удара второго потока, новые отпечатки перекрывают граничные зоны между отпечатками дроби от первого потока (рис. 1б).

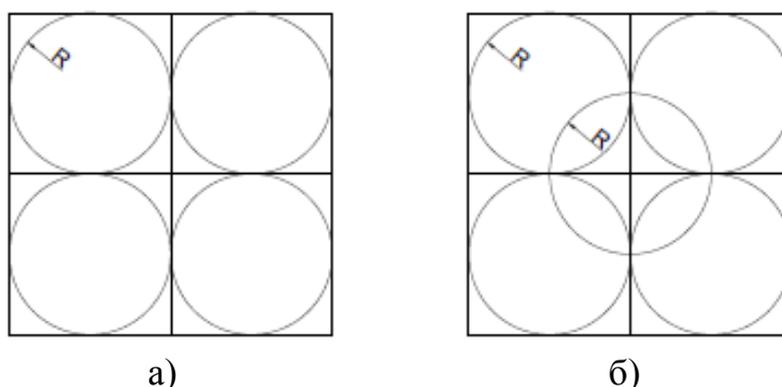


Рис. 1. Расположение отпечатков дроби, где а) контактирующие отпечатки дроби без перекрытия, б) расположение отпечатков дроби с перекрытием

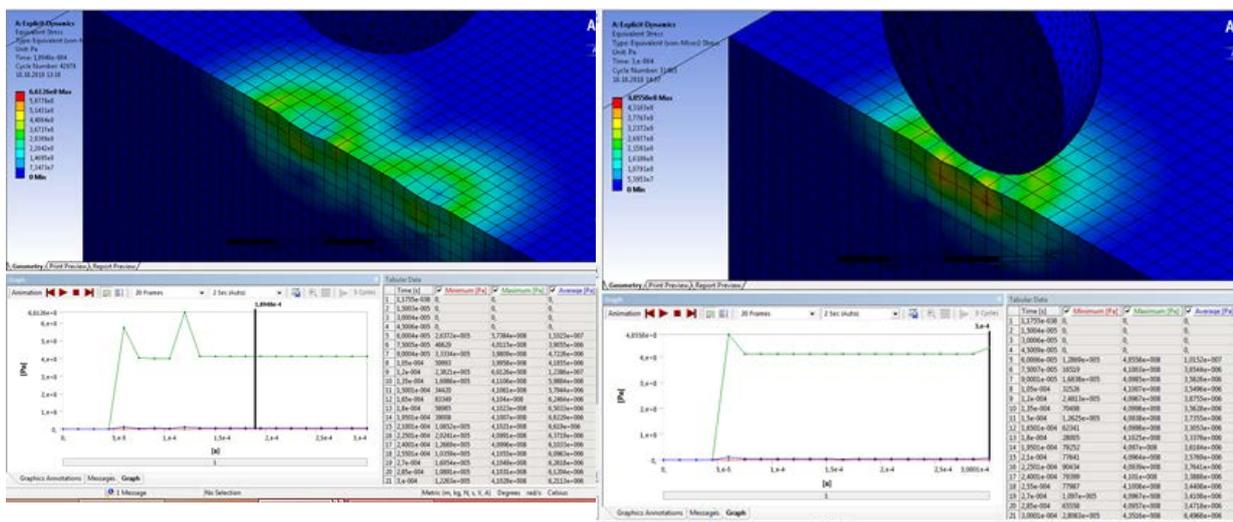
Из рис. 1а следует, что при таком расположении отпечатков степень покрытия отпечатками не достигает 100% и имеет постоянную величину при условии того, что площадь исследуемой поверхности покрывают все отпечатки, тогда:

$$K = \frac{S_{от}}{S_{об}} \cdot 100\% = \frac{\pi R^2}{4R^2} \cdot 100\% = 78,5\% \quad (1)$$

Для достижения степени покрытия к 100% обязательно нужно чтобы было перекрытие отпечатков (рис. 1б).

Для определения характера распределения остаточных напряжений при единичном ударе и ударе двух стальных шаров с образованием контактирующих отпечатков было проведено отдельное моделирование. Диаметры шаров были взяты равными 1 мм, материал обрабатываемого материала ВТ 95, начальная скорость шара 20 м/сек.

Результаты моделирования ударов двух шаров, в результате которых образованы контактирующие отпечатки и перекрытие отпечатков показаны на рис.2. На рисунках показано поверхностное распределение остаточных напряжений и распределение их в плоскости перпендикулярной поверхности и проходящей через центры отпечатков.



а)

б)

Рис. 2. Распределение остаточных напряжений в результате ударов двух шаров, где а) в случае образования контактирующих отпечатков, б) в случае образования отпечатков с перекрытием

Анализ результатов рис. 2 показал, что в обоих случаях толщина упрочнения и нормальное остаточное напряжение под центром отпечатков имеет одинаковое значение. На основании этого был сделан вывод, что для определения глубины залегания и величины остаточных напряжений в поверхностном слое в зависимости от свойств обрабатываемого материала и режимов упрочнения достаточно провести моделирование единичного удара.

Для модели единичного удара приняты следующие исходные данные (таблица 1):

Таблица 1. Исходные данные.

Наименование	Параметры
Материал шарика	Абсолютный жесткий
Материал обрабатываемой детали	ВТ-95
Диаметр шарика	0,6; 1; 1,4; 1,8 мм
Скорость удара	10; 15; 20; 25; 30 м/с
Направление удара	Нормально к поверхности модели обрабатываемого материала
Размер модели обрабатываемого материала (заготовка)	5*5*5мм

В таблице исходных данных материал заготовки ВТ-95 как наиболее распространённый авиационный материал для изготовления крыльев и обшивок самолета. Размер шарика – наиболее распространённый размер дроби, применяемой на производстве, а скорость удара – на основании возможной окружной скорости дробебетного колеса дробеударной установки контактного типа ДУФ-4М. Выбор размера модели заготовки базировался на основании результатов предварительного моделирования с целью получения лучших результатов и максимального сокращения времени анализа программой Ansys.

На рис. 3, 4, 5 и 6 представлены полученные в результате моделирования, графики изменения нормальных остаточных напряжений в поверхностном слое под центром отпечатка при ударе шариков различных диаметров с различной скоростью по толщине модели обрабатываемого материала. На этих рисунках слева направо: первая кривая - при скорости удара 10 м/с, вторая кривая- при скорости удара 15 м/с, третья кривая - при скорости удара 20 м/с, четвертая кривая- при скорости удара 25 м/с, пятая кривая- при скорости удара 30 м/с.

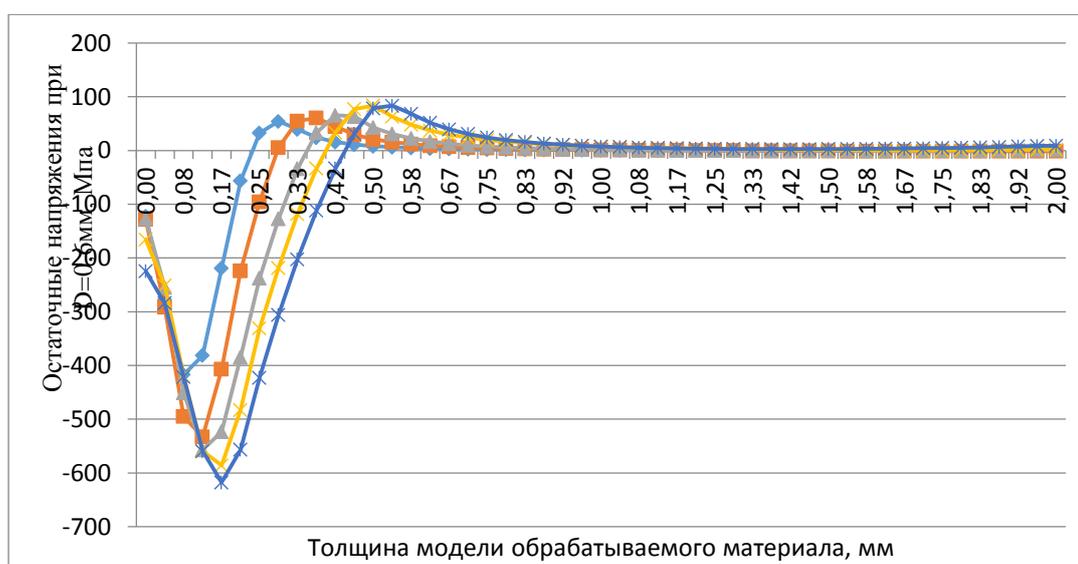


Рис. 3. Остаточные напряжения в поверхностном слое под центром отпечатка при ударе шарика диаметром 0,6мм, МПа

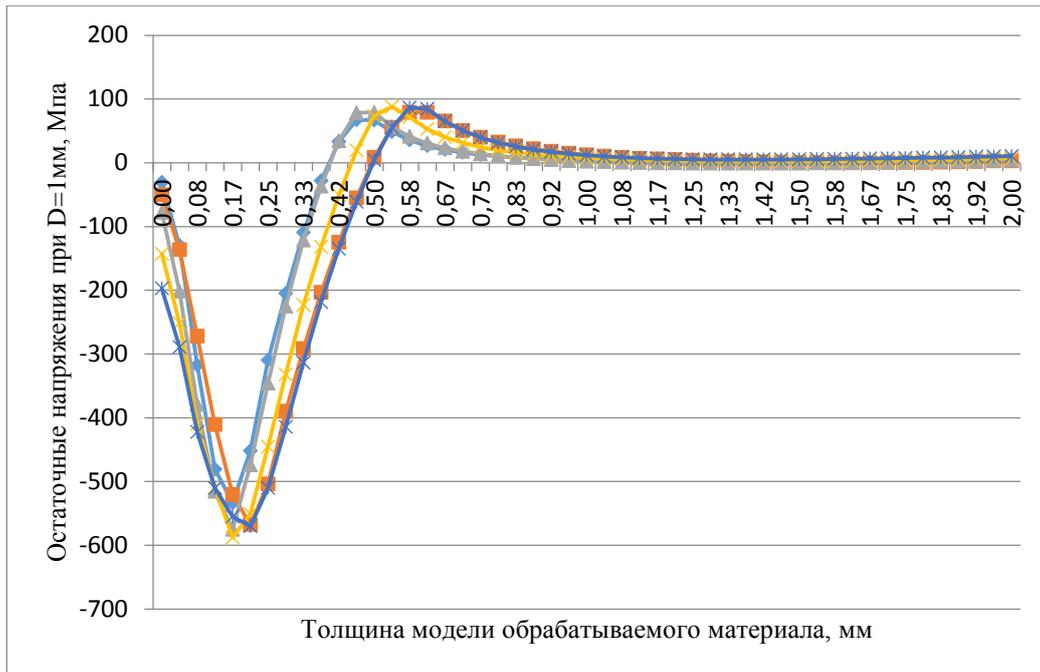


Рис. 4. Остаточные напряжения в поверхностном слое под центром отпечатка при ударе шарика диаметром 1 мм, МПа

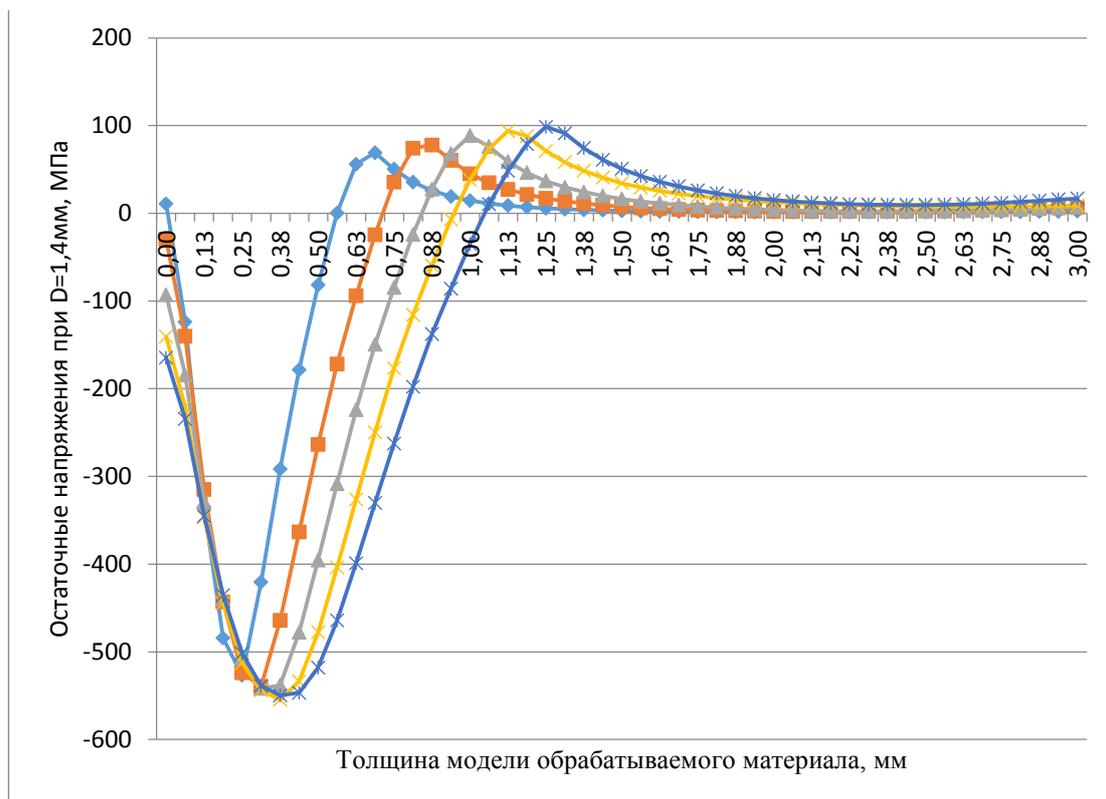


Рис. 5. Остаточные напряжения (в МПа) в поверхностном слое под центром отпечатка при ударе шарика диаметром 1,4 мм

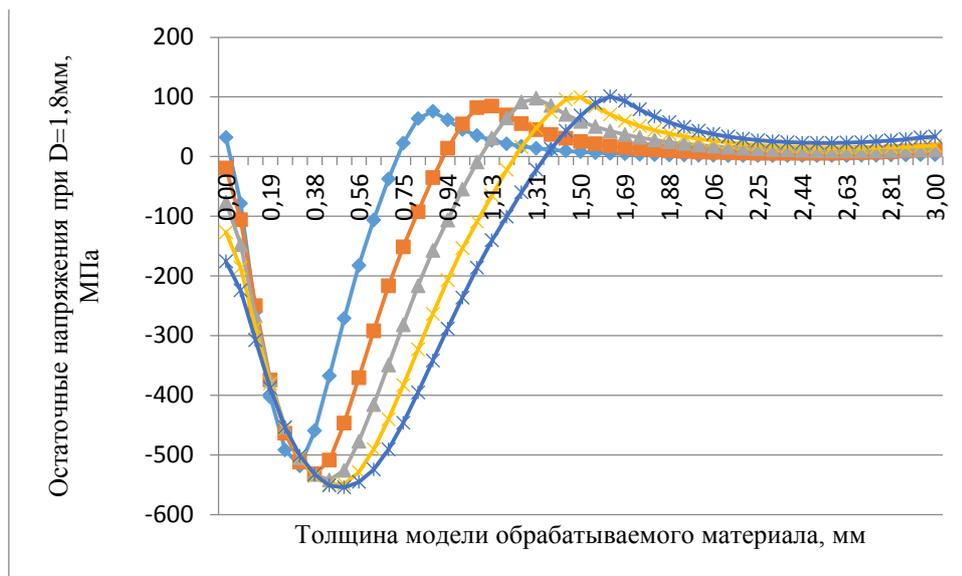


Рис. 6. Остаточные напряжения (в МПа) в поверхностном слое под центром отпечатка шарика при ударе диаметром 1,8мм

По графикам на рис. 3, 4, 5 и 6 можно заключить, что независимо от размера шарика и скорости его удара, изменение остаточных напряжений в поверхностном слое под отпечатком имеет подобную форму. На рис. 7 представлены максимальные значения нормальных остаточных напряжений в поверхностном слое под центром отпечатка при ударе шарика различных диаметров и скоростей.

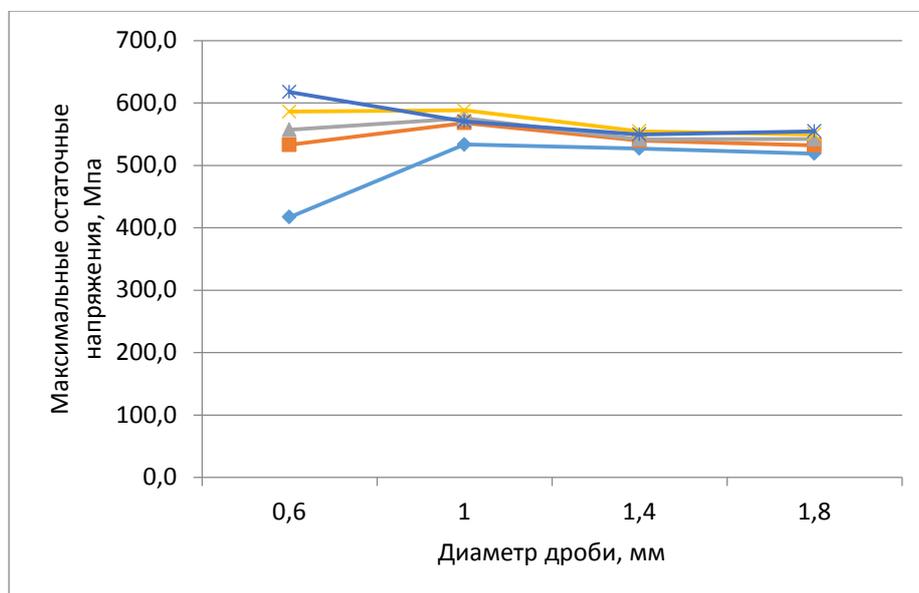


Рис. 7. Максимальные остаточные напряжения под центром отпечатка в зависимости от диаметра шарика при различной скорости удара, где снизу вверх: первая линия – при скорости удара 10м/с, вторая линия – при скорости удара 15м/с, третья линия – при скорости удара 20м/с, четвертая линия – при скорости удара 25м/с, пятая линия – при скорости удара 30м/с

Из рис. 7 следует, что при малом размере шарика чем больше скорости удара, тем больше максимальные остаточные напряжения под центром отпечатка. При увеличении размера шарика более 1мм максимальные остаточные напряжения существенно не меняются от скорости удара шарика.

На рис. 8 представлены графики изменения толщины упрочненного слоя в зависимости от размеров шарика и скорости удара.

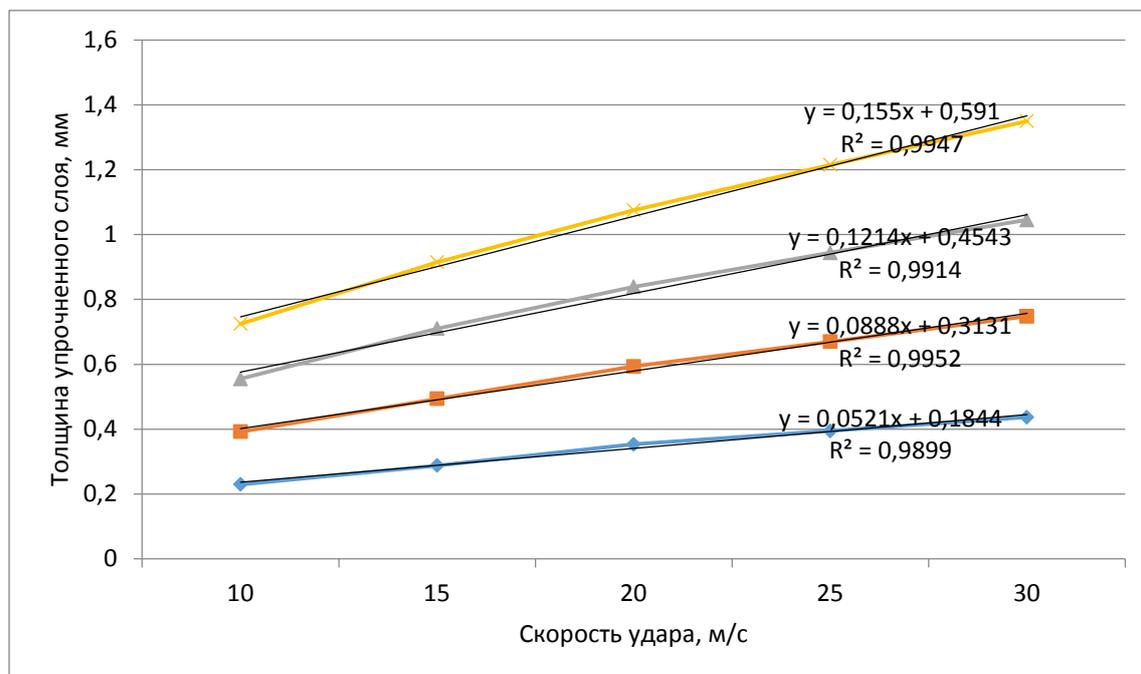


Рис. 8. Зависимости толщины упрочненного слоя от размеров шарика и его скорости удара

По графикам на рис. 8 видно, что зависимость толщины упрочненного слоя под отпечатком шарика от размера шарика и скорости удара носит линейный характер (с точностью аппроксимации не менее 99%), то есть чем больше шарик и его скорость удара, тем больше толщина упрочненного слоя.

В результате обработки полученных данных методом планирования экспериментов [17,18] при моделировании дробеударного процесса на параметрах обработки на дробеударной установки контактного типа ДУФ-4М получено высокоточное (с отклонением от результатов моделирования не более 5,6%) общее уравнение для расчетов толщины упрочненного слоя в зависимости от размера дроби и скорости его удара при дробеударном упрочнении детали из алюминиевого сплава ВТ-95:

$$T_p = -0.01632375 - 0.000117625 \cdot V + 0.2382354166 \cdot D + 0.01742645833 \cdot V \cdot D, \quad (2)$$

где: T_p – расчетное величина толщины упрочненного слоя, мм; D – диаметр дроби, мм; V - скорость удара, м/с.

Выводы.

Программа компьютерного инженерного анализа Ansys является эффективным средством для моделирования динамического удара с целью определения остаточных напряжений в поверхностном слое под отпечатком дроби и толщины упрочненного слоя при дробеударном упрочнении деталей.

Для деталей из алюминиевого сплава ВТ-95 при упрочнении дробью диаметром более 1мм максимальные остаточные напряжения не значительно изменяется как от размера дроби, так и от скорости удара. Однако толщина упрочненного слоя прямо пропорциональна диаметру и скорости удара дроби.

Полученные в работе зависимости максимальных остаточных напряжений в поверхностном слое под центром отпечатка дроби и толщины упрочненного слоя от размера дроби и скорости ее удара могут быть полезными для назначения рациональных режимов дробеударного упрочнения панелей и обшивок самолета из алюминиевого сплава ВТ-95.

Список использованной литературы:

1. Пашков А.Е. Технологические связи в процессе изготовления длинномерных листовых деталей // Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2005. -138 с.
2. Pashkov A.E., Veprev A.A. Complex technology of the aircraft panels forming / IAMFO Vol. 4 No. 1 January-June 2012. - pp. 39-54.
3. Матлин М.М., Мозгунова А.И....Определение рациональных технологических режимов упрочняющей дробеобработки стальных деталей. Волгоград:Изд-во Известия ВГТУ, 2014.- 4с.
4. Матлин М.М., Мозгунова А.И., Лебский С.Л. Прогнозирование параметров упрочнения деталей машин путем поверхностного пластического деформирования // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2005. № 3. С. 52–55.
5. Матлин М.М., Мосейко В.О., Мосейко В.В. Вероятностная оценка параметров потоков дроби при дробеобработке с целью поверхностного упрочнения // XIV Петербургские чтения по проблемам прочности, посвященные 300-летию Санкт-Петербурга: сб. тез. (г. Санкт-Петербург, 12–14 марта 2003 г.). Санкт-Петербург, 2003. С. 58–59.
6. Гребенников Д.С., Максименков В.И. Формообразование панелей крыла дальнемагистрального самолета // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 1. С.116–121. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.15.1.018>
7. Дрозд М.С., Осипенко А.П. Аналитическое исследование

напряженного состояния при внедрении упругой сферы в упруго-пластическое полупространство // *Металловедение и прочность металлов: сб. науч. тр. Волгоград: ВПИ, 1977. Вып. 8. С. 58–68.*

8. Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.

9. Дрозд М.С., Фёдоров А.В., Сидякин Ю.И. Расчет глубины распределения пластической деформации в зоне контакта тел произвольной кривизны // *Вестник машиностроения. 1972. № 1. С. 54–57.*

10. Братухин А.Г., Халимулин Р.М., Юнусов Ф.С. Размерное и безразмерное формообразование поверхностей деталей. М.: Машиностроение, 1996. 270 с.

11. Пахомова С.А., Рыжова М.Ю. Эффективность деформационного упрочнения цементованных зубчатых колес из стали 10ХЗРИБ2Ф-Ш. *Вестник МГТУ им.Н.Э. Баума, Москва 2018, 9стр.*

12. V.P. Koltsov, Le Tri Vinh, D.A. Starodubtseva, Phung Xuan Son. Step-by Step surface roughness formation during shot peening and subsequent grinding with flap wheels. *International Conference on Aviaemechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018). Изд-во: ATLANTIS PRESS, vol.158, <https://www.atlantispress.com/proceedings/avent-18/25901664>, 2018.*

13. Кольцов В.П., Ле Чи Винь, Стародубцева Д.А., Фунг Суан Шон. Производительность зачистки поверхности лепестковым кругом поле дробеударного формообразования. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019г. 10с.

14. Meguid S.A., G. Shagal, J.C. Stranart, J.Daly. Tree-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses. *ELSEVIER- Finite Elements in Analysis and Design #31, USA, 1999. - 13p.*

15. Pham Quang Trung, Nay Win Khum, David Lee Buttler. Tree-dimensional dynamic finite element model of shot peening process: new approach to estimate level of the coverage parameter // *XXX Internatinal Conference on Surface Modification Technologies (SMT30). Italy, 2016. – 8p.*

16. Лебедеко В.Г. Математическое моделирование процесса формирования геометрических параметров поверхностного слоя и параметров упрочнения при обработке деталей дробью.: Ростов на Дону: Изд-во Вестник ДГТУ, 2008. – 11стр.

17. Сидняев Н.И. Введение в теорию планирования эксперимента. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 463 с.

18. Ферстер Э., Ренц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа / пер. с нем. М.: Финансы и статистика, 1983. 304 с.

Проект автономной технологической платформы с шагающим механизмом перемещения.

В.Н. Москвитин, С.Н. Дрожжин, П.Г. Шубин

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Главным направлением во всех отраслях производства машиностроения, строительстве и т.д. является автоматизация и гибкость. Если автоматизация самого процесса, решается использованием оборудования с числовым программным управлением, то вспомогательные операции: транспортировка, ориентации, фиксации и др., чаще всего не автоматизированы. Предложенная конструкция платформы эффективно решает эти задачи. Модульный принцип, позволит создать из базового модуля технологические платформы под разные задачи, требуемых размеров и грузоподъёмности. Приведено описание конструкции в общем виде

Ключевые слова: *модульный принцип, подвижная технологическая платформа, строительный робот, шагающий механизм с приводом*

При автоматизированном производстве в различных отраслях промышленности требуется организация перемещений самих изделий и их частей; технологического оборудования и элементов оборудования; технологической оснастки. Сложной задачей является точное позиционирования перечисленных выше элементов и привязка платформы в координатах технологической системы (ТС), чаще всего по двум координатам. Кроме того, для фиксации изделий и технологического оборудования, требуется жесткое и прочное положение подвижной платформы в заданной точке. Желательно, обеспечить стыковку нескольких платформ, автономную работу без наличия подводящих кабелей, дистанционное адаптивное управление, наличие систем безопасности и др. Проведенный обзор позволяет разделить все платформы на следующие виды и типы по: назначению, перемещению, грузоподъёмности, габаритам, автономности, перемещению, управлению. По назначению автоматизированные технологические платформы можно разделить на:

1. Транспортные (для перемещения изделий, заготовок, инструментов, материалов.

2. Платформы для размещения изделий, точного позиционирования, как неотъемлемой части ТС. Например, платформа фирмы KUKA для клепального робота.

3. Платформы для установки роботов различного назначения: складские роботы, сварочные роботы, покрасочные роботы и т.д.

4. Платформы специального назначения ТС, выполняющие отдельные операции.

Примером может служить два вида платформ, разработанных в ИРННТУ для робота KUKA KR30 HA, при позиционировании рубильников сборочных ступеней. Платформа была разработана в двух, вариантах: первый перемещался в ТС с помощью цехового крана или погрузчика. Второй вариант выполнен в виде грузовой тележки. В том и другом случае фиксация производилась при помощи аутригеров, закрепленных к полу цеха и системы ручного механизма выравнивания по горизонту. Стоимость таких платформ, значительно меньше, чем платформы зарубежных фирм. Конструкция простая и эффективная по функциям жесткого крепления и ориентации в горизонтальном положении по уровню.

Использование автономных технологических платформ ориентировано на различные отрасли. В первую очередь – машиностроение (сборочные операции, загрузка заготовок и снятие готовых деталей на станках с ЧПУ и т.д.). Современная организация поточного производства, требует внедрения подобного оборудования.

Строительная отрасль развивается в направлении использования 3D печати и роботов строителей каменной кладки. В рамках создания робота строителя авторами разработан строительный комплекс порталного типа на базе робота KUKA RK60 HA. Недостаток данного комплекса – ограничение возводимого здания по высоте (не более 10 м). Используя технические решения, заложенные в проекте для устранения этого недостатка, предлагается разработать универсальные технологические платформы разного назначения: платформы для установки самого робота-строителя, транспортного модуля для доставки кирпичей в зону кладки, модуль приготовления и подачи раствора, а также специальные модули.

Конструкция платформы включает в себя: жесткую металлическую раму прямоугольной формы, на верхней части которой, закреплена универсальная плита для установки технологического оборудования (робота, ножничного подъемника, смесителей строительных растворов и т.д.); на торцевых поверхностях рамы находятся по 2 отверстия для крепления башмаков шагового механизма, эти же отверстия используются для базирования при стыковке 2-х и более платформ; по углам рамы установлены опоры качения на выдвижных аутригерах, что позволяет увеличивать устойчивость площадки при работе. Для перемещения

платформы используется шагающий механизм с частичной весовой разгрузкой. Вес платформы с полезной нагрузкой распределяется на опоры качения и регулируется пружинным механизмом. Для снижения нагрузки на механизмы перемещения, соотношение веса составляет: 70% на опоры и 30% на башмаки. На платформу установлены две пары башмаков во взаимоперпендикулярном расположении (при работе одной пары платформа перемещается по координатам X, а при работе другой пары по координатам Y). Привод установлен в каждом башмаке, и представляет собой червячный мотор-редуктор, расположенный поперек оси башмака и два червячных редуктора расположенных вдоль оси. Выходные валы продольных редукторов связаны общим валом с поперечным мотором-редуктором. На выходные валы продольных редукторов установлены кривошипные валы с силовыми подшипниковыми опорами и осью для установки башмака на платформу. Эксцентриситет вала составляет 50 мм., что обеспечит ход башмака на 100мм.

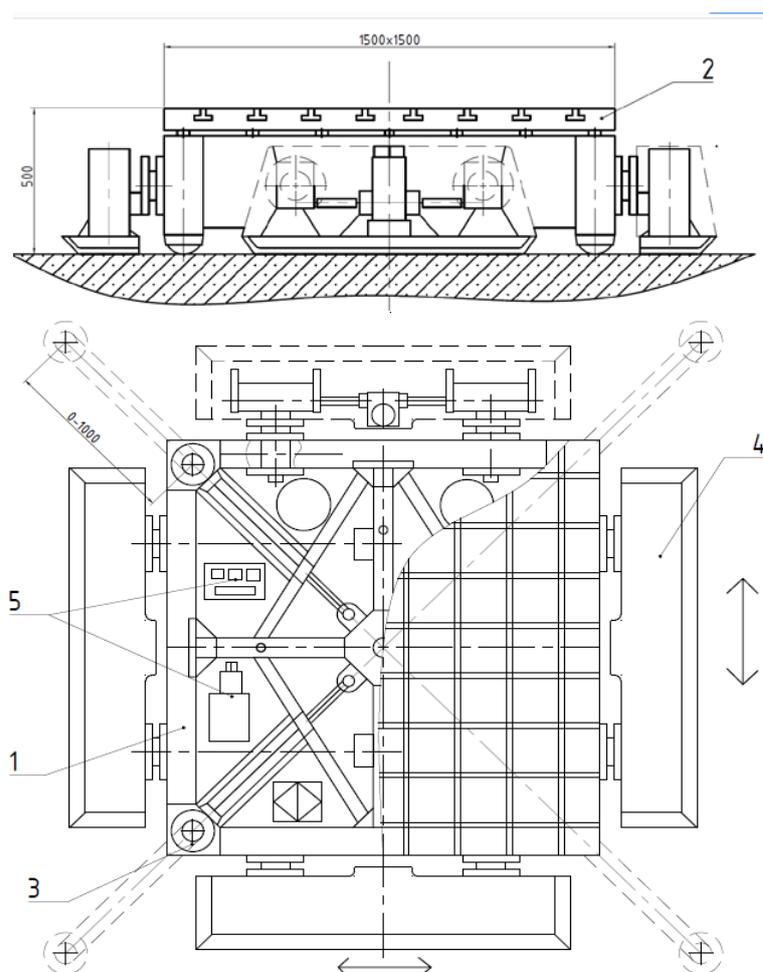


Рис.1 Платформа технологическая с шагающим механизмом. 1.- Рама =1шт. 2. – Площадка=1шт., 3 – Аутригеры с опорами качения=4шт. 4-Башмак-4шт.,5- система питания и управления= комплект.

В зависимости от нагрузки и настройки механизмов перемещения за один оборот кривошипных механизмов башмака, перемещение составит от 10 до 20 мм., точность позиционирования платформ при этом будет равна половине хода, то есть, $\pm 5-10$ мм. Скорость перемещения платформ, варьируется в диапазоне: от 0 до 200 мм/мин. При разном направлении вращения двигателей платформа получает криволинейное перемещение или вращение вокруг оси симметрии. Опоры качения, сферической формы, установлены на выдвижных аутригерах (Рис. 1, поз.3.). Под площадкой (Рис 1. Поз.2), расположен: дизель генератор мощностью не менее 10кВт, аккумуляторные батареи, гидростанция и гидросистема, воздушный компрессор для захватных устройств робота, системы управления, и т.д. На боковых стенках каркаса установлены по два подшипниковых узла для крепления выходного вала кривошипа. Отверстие имеет коническую форму, что обеспечивает точную фиксацию вала; вторая функция этих отверстий – стыковая (для стыковки двух и более платформ).

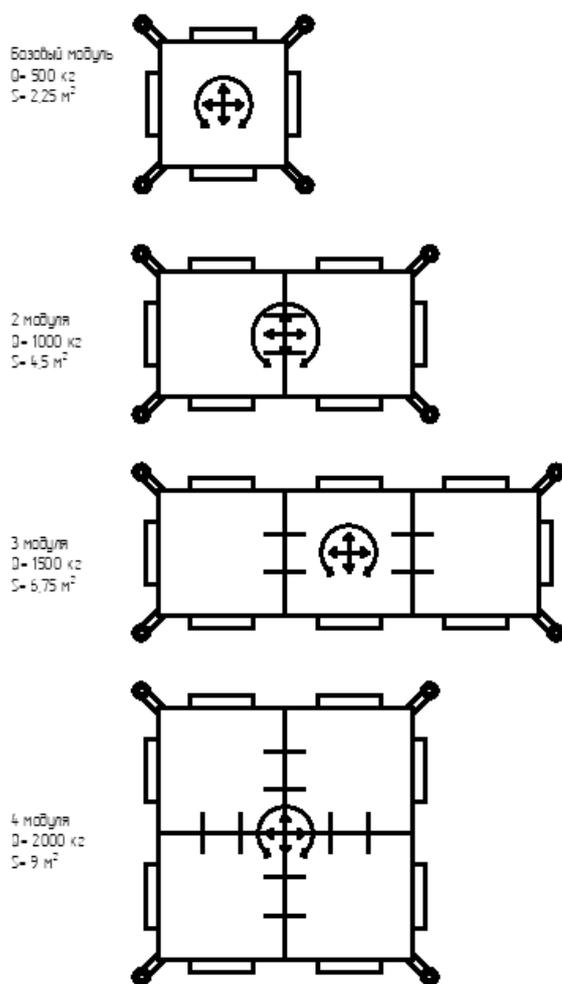


Рис 2. Стыковка технологических площадок

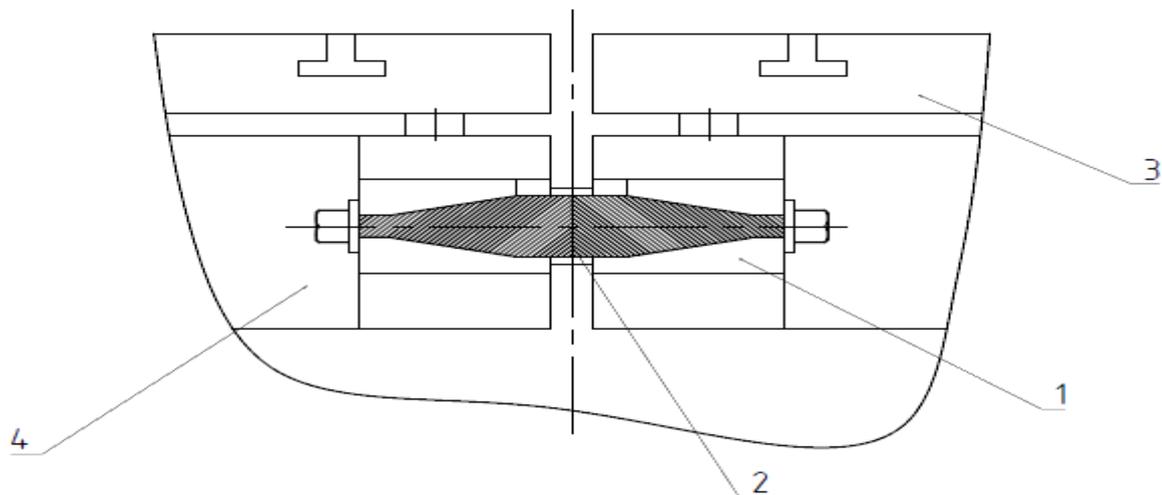


Рис. 3 Стыковочный узел. 1-подшипниковый узел установки башмака, 2-сдвоенная коническая оправка, 3- площадка, 4- каркас.

Используя модульный принцип [1,2], можно создать разнообразные платформы с большей площадью площадок и большей грузоподъемности. На (Рис. 2) приведен пример получения разных платформ на базовом модуле размером 1,5x1,5 м., полезной нагрузкой Q равной 500 кг. Стыковочный узел выполнен в виде двух сторонней конической оправки (Рис.3), которая входит в отверстия, двух платформ и закрепляется вручную, рабочими, двумя болтами. Для доступа к ним на площадке сделаны специальные вырезы. Подвижность остается прежней, как и для одной платформы. Для повышения устойчивости сохранены, 4 выдвижных аутригеров и все опоры качения платформы, что позволяет равномерно распределять нагрузку. Для продолжения проекта, необходимо создать действующую модель в масштабе, 1:10, провести всесторонние испытания, внести необходимые изменения в конструкцию и перейти к эскизному проекту.

Вывод: разработанный проект автоматической технологической платформы отличается достаточной простотой, но в ней заложены большие перспективы создания автоматизированных гибких производств в разных отраслях промышленности.

Список использованной литературы

1.Базров Б.М. Организация машиностроительного производства на принципах модульной технологии / Проблемы машиностроения и надежности машин. 2006. № 6. С. 67-78.

2 В.Н. Москвитин, Е.В. Зеньков, Иванов Е.А. Многофункциональное технологическое оборудование на модульном принципе/Авиамашиностроение и транспорт Сибири: - Иркутск 2019г.

3. Вайсон А.А. Подъемно-транспортные машины М.: Машиностроение, 1989. - 536с.

4. Строительный комплекс порталного типа Режим доступа: <https://youtu.be/4ТьхкJ9ВаМк> – свободный - Дата обращения 01.05.2020.

5. Базров Б.М. Модульная технология в машиностроении. М: Машиностроение, 2001. 368с., ил.

УДК 621.98.042

Профилирование лепестковых кругов для зачистки обводообразующих деталей

Кольцов В.П., Ле Чи Винь, Ракицкая В.Б., Орлов Д.А.

Иркутский Национальный Исследовательский Технический Университет, ул. Лермонтова 83, г. Иркутск, 664074, Россия

Для операций изготовления обводообразующих деталей сложной формы на предприятиях авиа и судостроения успешно используется комплексная технология дробеударного формобразования. В общем случае эта технология включает в себя операции фрезерования, дробеударного формобразования и зачистки, при необходимости, дробеударного упрочнения. При дробеударном формобразовании используется дробь большего диаметра, чем при упрочнении (обычно в 3-4 раза), что заметно увеличивает при обработке значения шероховатости поверхности. После операции формобразования обязательна операция зачистки, которая производится для обеспечения соответствия шероховатости и окончательной аэродинамической формы поверхности требованиям, установленным чертежом детали.

Ключевые слова: *дробеударное формобразование, зачистка лепестковым кругом, профилирование лепестковых кругов.*

Для реализации комплексной технологии дробеударного формобразования [1,2] на Иркутском авиационном заводе была спроектирована и изготовлена специальная установка УДФ-4 (установка дробеударного формобразования 4-й вариант модернизации), представленная на рисунке 1. Последний вариант этой установки для оптимизации операции зачистки оснащён системой ЧПУ и револьверной зачистной головкой с 4-мя лепестковыми кругами [3-6]. Возможность выбора в процессе зачистки в зависимости от кривизны и ширины панели или обшивки необходимого круга заметно расширили технологические

возможности установки. При обработке сложных поверхностей двойной кривизны появилась необходимость помимо цилиндрического круга поочерёдного использования нескольких профилированных кругов.



Рис. 1 – Установка УДФ-4, а) общий вид; б) зачистная головка револьверного типа

В данной работе приведены результаты разработки и испытания технологии и оборудования для профилирования стандартных цилиндрических лепестковых кругов, выпускаемых отечественной промышленностью. Для операций зачистки в условиях Иркутского авиационного завода на установке УДФ-4 для зачистки панелей и обшивок используют лепестковые круги типа П (прямой профиль) модели КК 751 различной зернистости, диаметром 350 мм и шириной 100, 200, 300 и 400 мм [5-10].

Лепестковый круг КК751 представляет собой эластичный абразивный инструмент, набранный из «лепестков» абразивной шкурки, закреплённых на наружной поверхности втулки под углом к радиальному направлению. При этом, ещё и сами лепестки имеют криволинейную форму с абразивной поверхностью на выпуклой стороне. При такой конструкции круга наружный диаметр в стационарном (без вращения) и рабочем состоянии (при вращении) непостоянен, поскольку вследствие действия центробежных сил он несколько увеличится за счёт распрямления лепестков. Так, диаметр лепесткового круга выше названной модели, имея наружный диаметр 325 мм, при частоте вращения 1200 об/мин увеличивается до 350 мм за счёт распрямления лепестков. В создавшихся условиях, назначение и контроль величины осадки при назначении режима обработки и регулировании частоты вращения круга становится проблематичным, поскольку в практических условиях значение осадки лежит в пределах 2-8 мм. Помимо этого, износ лепестков

в процессе обработки сопровождается уменьшением наружного диаметра круга [7].

В качестве основного оборудования для профилирования лепестковых кругов был выбран токарный станок типа 1К62. Это объясняется тем, что на токарно-винторезном станке предусмотрена работа по копиру или копирной линейке. Эти возможности станка при небольшой доработке технологии и оборудования несложно использовать для профилирования лепестковых кругов. Для операций профилирования лепестковый круг устанавливался на оправке в патроне шпинделя станка модели 1К62. Второй конец оправки поддерживался центром задней бабки. На рисунке 12 представлена схема установки лепесткового круга 1 на оправке 2 на станке. Один конец оправки 3 зажат в патроне 3 шпиндельной бабки, второй поддерживается центром 4. На салазках суппорта привода поперечного движения закреплён кронштейн 6 с толкателем 7, который размещён в пазу копира 8. Профилирование лепесткового круга производится резцом 5.

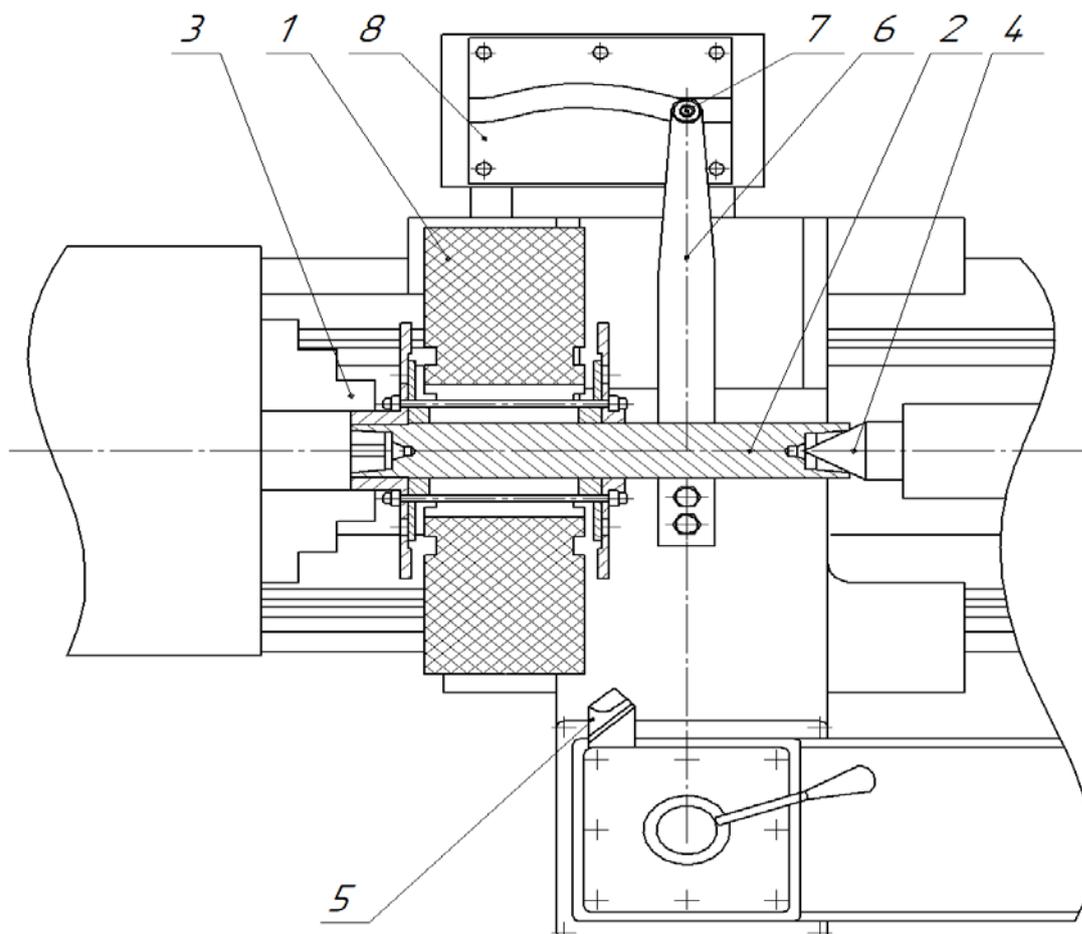


Рис. 2 Схема профилирование лепесткового круга

Инструментом для профилирования служат стандартные проходные резцы с минимальными углами резанья. Предпочтение при этом может быть отдано твердосплавным резцам, что обеспечит их большую стойкость. Круг при профилировании устанавливают с обратным (рабочему) вращением, чтобы максимально снизить воздействие абразива на резец. В результате резец практически будет резать только тканевую основу лепестков. Обработку следует вести на высоких оборотах (1000-1500 об/мин). При профилировании привод поперечной подачи следует отключить, а салазки поперечного супорта соединить с кронштейном толкателя копира. При включении продольной подачи и вращении шпинделя круг будет профилироваться в соответствии с формой копира.

Поскольку при профилировании лепесткового круга образуется достаточное количество абразивной пыли, желательно оснащение станка пылесобирающим устройством.

Список использованной литературы

1. Пашков А.Е. Технологические связи в процессе изготовления длинномерных листовых деталей // Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2005. 138 с.
2. Pashkov A.E., Veprev A.A. Complex technology of the aircraft panels forming / IJAMFO Vol. 4 No. 1 January-June 2012 pp. 39-54.
3. Стародубцева Д.А. Автоматизация процесса зачистки крупногабаритных поверхностей панелей и обшивок после дробеударного формообразования на установках контактного типа / Д.А. Стародубцева // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. статей XI Всероссийской научно-технической конференции. – Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2018. – С. 96-101.
4. Стародубцева Д.А., Револьверная головка для зачистки панелей и обшивок лепестковыми кругами после дробеударного формообразования// Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2015. - №4 (48). С. 34-37.
5. Патент на изобретение РФ №2567926. Револьверная головка для шлифования криволинейных поверхностей лепестковыми кругами / А.К. Китов, А.Е. Пашков, П.Г. Гришаев, Д.А. Стародубцева. Опубл. 10.11.2015. Б.И. №31.
6. Кольцов В.П. Д.А. Стародубцева Зачистка лепестковым кругом поверхности из алюминиевого сплава // Инновационные технологии в науке нового времени: Сб. статей Международной научно-практической конференции. – Уфа: Изд-во АЭТЕРНА, 2017. – С. 66-69.
7. Koltsov V.P., Starodubtseva D.A. Investigation of Traces of Interaction between Flap Wheel and Aluminum Alloy Plain Surface // Procedia Engineering. – 2017. – P. 473-478.

8. V.P. Koltsov, Le Tri Vinh, D.A. Starodubtseva, "Formation of the surface roughness during grinding with flap wheels after shot peening", International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018), 2018, vol. 224, EDP Sciences <https://www.edpsciences.org>.

9. V.P. Koltsov, Le Tri Vinh, D.A. Starodubtseva, Phung Xuan Son. Step-by Step surface roughness formation during shot peening and subsequent grinding with flap wheels. International Conference on Aviaemechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018). Изд-во: ATLANTIS PRESS, vol.158, <https://www.atlantis-press.com/proceedings/avent-18/25901664>, 2018.

УДК 620,17

Моделирование упругих, прочностных и теплофизических характеристик моно- и поликристалла алюминия Al

И.Х. Бадамиин

Уфимский государственный авиационный технический университет, 450000, г. Уфа, ул. К.Маркса,12

Для оценки прочности материала детали необходимо знать его температурные зависимости механических и теплофизических свойств. В случае, когда справочных данных не хватает, возникает необходимость их моделирования. Данная задача решается на основе учёта сил межатомного взаимодействия в кристаллической структуре на примере моно- и поликристалла алюминия. Приведены результаты расчёта модуля упругости, пределов упругости и текучести, коэффициента Пуассона, коэффициентов теплопроводности и теплового расширения. плотности материала. Получена удовлетворительная сходимость с имеющимися справочными данными. Полученные результаты могут быть использованы в качестве исходных данных для конструирования композиций и сплавов на основе алюминия.

Ключевые слова: *алюминий; моно- и поликристалл; модуль упругости, пределы упругости и текучести, коэффициенты Пуассона, теплопроводности и теплового расширения, плотность.*

Для оценки термочного состояния материала детали необходимо знать его упругие, прочностные и теплофизические характеристики в зависимости от температуры. В некоторых случаях справочных данных по этим свойствам не хватает для расчетов на прочность. В этих условиях возникает необходимость моделирования названных характеристик.

В данной работе задача моделирования характеристик материала решается на основе учета сил межатомного взаимодействия в кристаллической структуре.

Допущения и расчетные формулы.

Допущения

1. Рассматривается элементарная атомная ячейка бездефектного монокристалла с периодом кристаллической решетки a_0 .

2. Рассматриваются наиболее плотноупакованные плоскости элементарной атомной ячейки монокристалла и кристаллографические направления, соответствующие этим плоскостям. В частности, для кубической решётки плоскости и направления показаны на рисунке 1. Таким образом, учитывается анизотропия свойств элементарной атомной ячейки монокристалла.

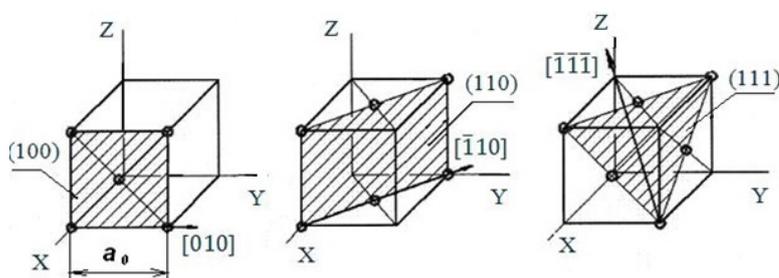
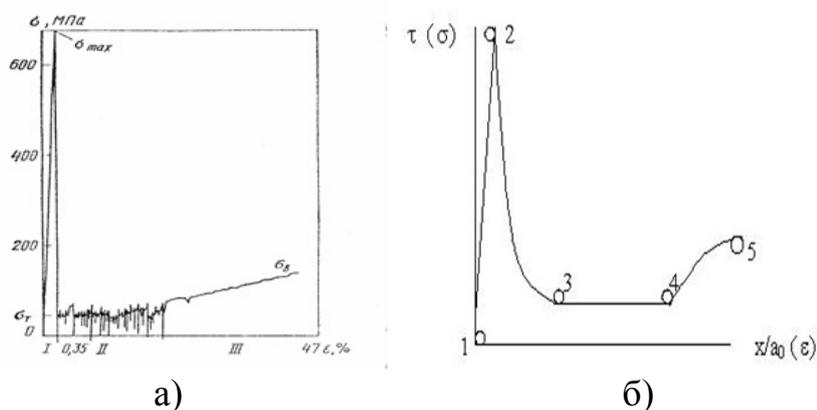


Рис.1. Направления и плоскости кристаллической решетки.

3. Вследствие симметрии кристаллической структуры свойства элементарной атомной ячейки передаются макрообъему монокристалла.

4. Диаграмма «напряжение-деформация» бездефектного монокристалла характеризуется так называемым «зубом текучести» (рисунок 2,а), которым он существенно отличается от поликристалла. Модель диаграммы «напряжение-деформация» представлена рисунке 2,б



а) эксперимент [1]; б) расчётная модель; 1-2-3 – монокристалл; 3-4-5 – поликристалл

Рис. 2 Диаграмма «напряжение – деформация» нитевидных монокристаллов

В частности, упругие характеристики монокристалла определяются модулем упругости и пределом упругости (точка 2 на рисунке 2,б). Причем предел упругости превышает по величине предел текучести. Поэтому для расчета предела текучести монокристалла необходимо знать величину предела упругости.

По причине ограниченного объема статьи здесь приводятся только некоторые базовые формулы. С остальными формулами можно ознакомиться в работе [2].

Тангенциальная составляющая *предела упругости* при сдвиге в элементарной атомной ячейке монокристалла рассчитывается по теоретической формуле [2]

$$\tau_{\max} = \frac{e^2}{a_0^2 \pi \epsilon_0 A} (1 - \cos \gamma_{\max}) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_{\max}\right)$$

где γ_{\max} – максимальный угол сдвига, соответствующий пределу упругости; A – площадь сдвига.

Предел текучести при растяжении монокристалла рассчитывается по теоретической формуле [2], основанной на механизме перемещения краевой дислокации и электростатической природе межатомного взаимодействия

$$\tau = \frac{c}{(x/a_0)^2}$$

где c – коэффициент, определяемый в точке $[\tau_{\max}; x/a_0]$; x – величина перемещения в элементарной атомной ячейке при сдвиге.

Связь между нормальной и тангенциальной проекциями напряжения сдвига бездефектного монокристалла определяется по формуле [2]

$$\tau = \frac{\sigma}{(\cos \alpha \cos \beta)},$$

где α - угол между горизонтальной плоскостью и плоскостью сдвига; β - угол между плоскостью сдвига и направлением нормального напряжения.

Изменение периода кристаллической решетки вследствие повышения температуры, рассчитывается на основе изменении энергии связи двух разноименных зарядов в кристаллической решетке.

Зависимость изменения периода кристаллической решетки от температуры рассчитывается по теоретической формуле [2]

$$a_0 = 0.5 \frac{e^2}{\left(\frac{e^2}{a_0} - c^1_v \Delta t 2\pi \epsilon_0\right)} - a_0$$

где Δa_0 – изменение периода кристаллической решетки вследствие теплового воздействия; ΔT – изменение температуры; c'_v – теплоемкость атома при постоянном объеме; ϵ_0 – электрическая постоянная.

Формула расчета плотности монокристалла простого вещества ρ , состоящего из атомов одного химического элемента имеет вид [2]

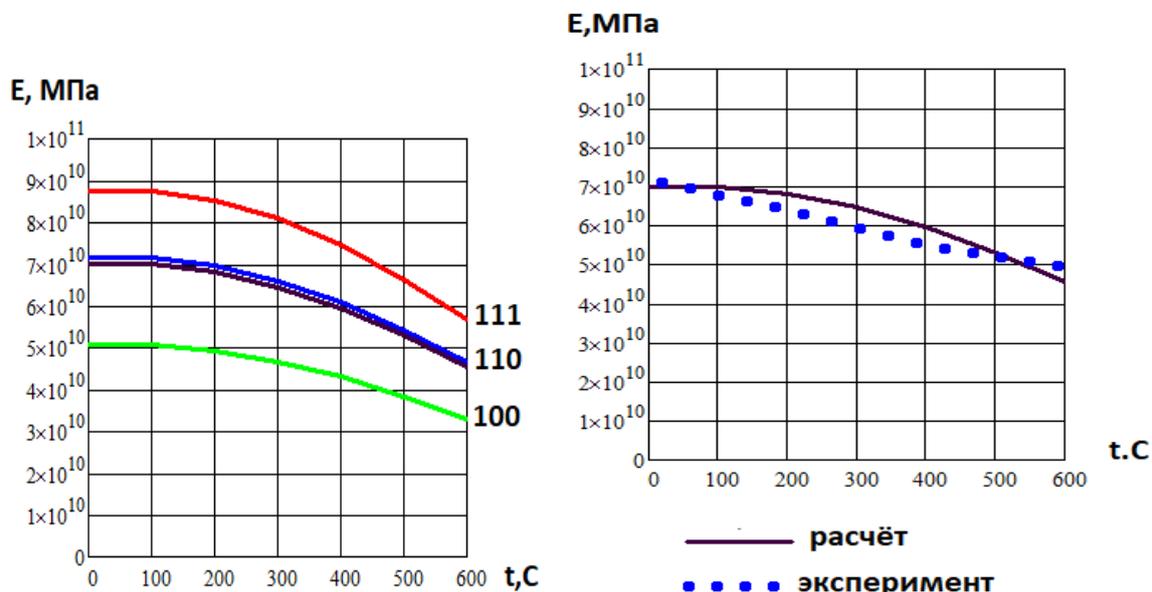
$$\rho = \frac{m_A \cdot M \cdot k_p}{a_0^3}$$

где m_A - атомная масса элемента; $M = 1.66 \cdot 10^{-27}$ – атомная единица массы; k_p - коэффициент ретикулярной плотности для элементарной атомной ячейки.

Результаты расчета и сравнительный анализ.

На рисунках 3-7 и в таблицах 1-5 представлены результаты расчетов и сравнение со справочными данными следующих характеристик моно- и поликристалла алюминия: модуль упругости, пределы упругости и текучести, коэффициент Пуассона, коэффициент теплопроводности, коэффициент теплового расширения, плотность материала.

На рисунке 3,а приведены температурные зависимости модуля упругости с учетом анизотропии свойств монокристалла *Al*, в кристаллографических направлениях $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$. На рисунке 3,б - для поликристалла *Al* в сравнении со справочными (точки на графике) данными [3].



а) направления $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$;

б) поликристалл.

Рис.3. Температурные зависимости модуля упругости

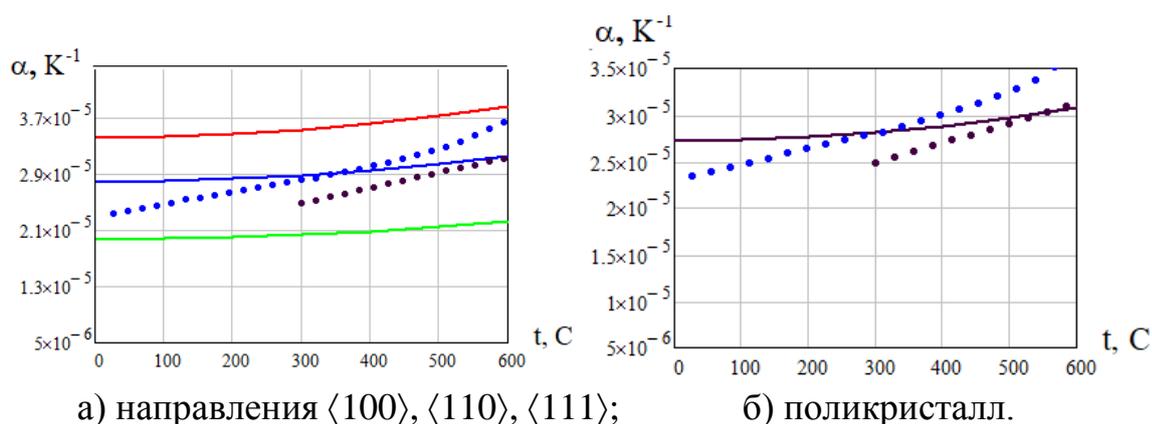
Коэффициенты поперечной деформации (Пуассона) ν_{xy} , ν_{xz} , определяются при одноосном растяжении вдоль оси X (рисунок 1). Если в элементарной атомной ячейке ось координат X совмещена с

направлением $\langle 100 \rangle$, то имеет место «ортогональная изотропность», иначе говоря, упругие характеристики вдоль осей координат x, y, z одинаковы. В этом случае коэффициент Пуассона определяется по формуле работы [2]. Если в элементарной атомной ячейке ось координат X совмещена с направлением $\langle 110 \rangle$ или $\langle 111 \rangle$, то имеет место анизотропность. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициент Пуассона

Обозначение параметра	Величина параметра при совпадении оси X с направлением		
	$\langle 100 \rangle$	$\langle 110 \rangle$	$\langle 111 \rangle$
ν_{xy}	0,352	0,192	0,477
ν_{xz}	0,352	0,462	0,149

На рисунке 4,а приведены температурные зависимости коэффициента теплового расширения монокристалла Al в направлениях $\langle 100 \rangle, \langle 110 \rangle, \langle 111 \rangle$. На рисунке 4,б - для поликристалла в сравнении со справочными (точки на графике) данными [3].



а) направления $\langle 100 \rangle, \langle 110 \rangle, \langle 111 \rangle$; б) поликристалл.
Рис.4. Температурные зависимости коэффициента теплового расширения Al .

Температурные зависимости пределов упругости (верхние обозначения 100,110,111) и текучести (нижние обозначения 100,110,111) приведены на рисунке 5,а. На рисунке 5,б - предел текучести для поликристалла в сравнении со справочными (точки на графике) данными [4].

Из рисунка 5,а видно, что максимальное значение предела упругости соответствует кристаллографическому направлению $\langle 111 \rangle$. В свою очередь, максимальное значение предела текучести соответствует кристаллографическому направлению $\langle 100 \rangle$.

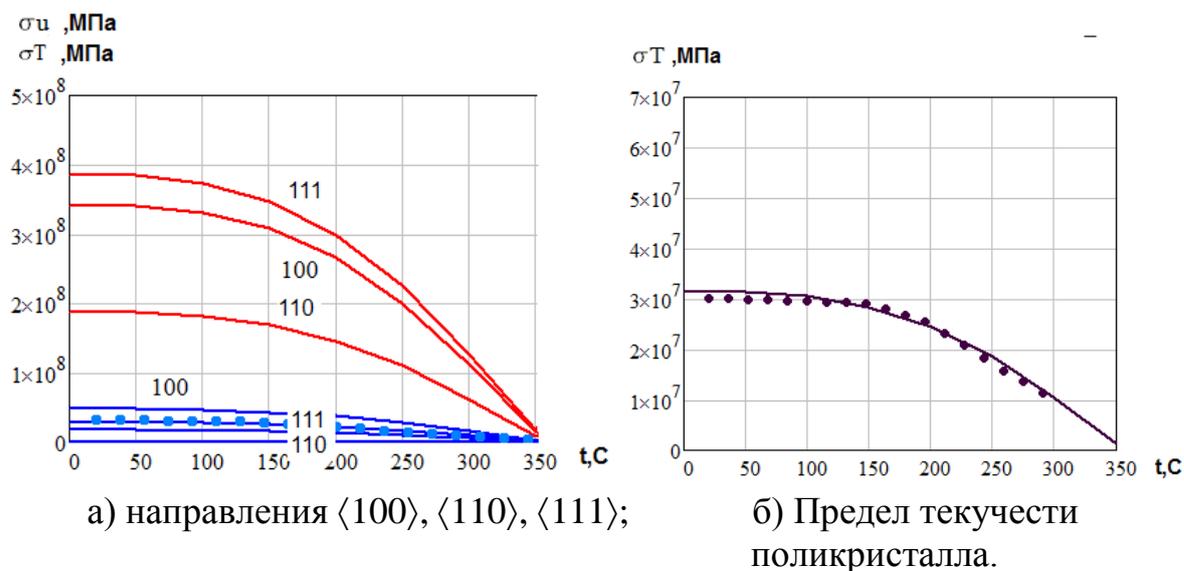


Рис. 5 Пределы упругости и текучести Al.

В частности, поскольку на диаграмме «напряжение-деформация» монокристалла имеется «зуб текучести» (рисунок 2,а) максимальное значение предела текучести определяется пределом упругости. Такая информация может понадобиться при разработке (конструировании) монокристаллических сплавов алюминия. В таблице 2 приведены пределы текучести при температуре 20 С в сравнении со справочными данными.

Таблица – 2 Предел текучести

Обозначение элемента	Предел текучести σ_T , МПа при 20 С					$\Delta, \%$
	$\sigma_{T 100}$	$\sigma_{T 110}$	$\sigma_{T 111}$	$\sigma_{T \text{ ср}}$	$\sigma_{T \text{ ср}}$	
Al	48	17,6	28,8	31,5	30 [4]; 32 [5]	$\approx \pm 1,5$

Для определения коэффициента теплопроводности предварительно необходимо рассчитать скорость распространения колебаний [2]. Эта скорость определяется в кристаллографических направлениях $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ и обозначается соответственно v_{100} , v_{110} , v_{111} . Её значения сравниваются со справочными данными [5] для поликристалла соответственно: v_3 – поперечная скорость; v_1 – скорость в стержне; v_2 – продольная скорость. Результаты расчёта v приведены в таблице 3.

Таблица - 3 Скорость распространения колебаний

Обозначение элемента	Скорость распространения колебаний v , м/с					
	v_{100}	v_3	v_{110}	v_1	v_{111}	v_2
Al	3534	3080	4997	5080	6123	626 0

Из таблицы 3 видно, что имеется удовлетворительная сходимость между величинами: ν_{100} и ν_3 , ν_{110} и ν_1 , ν_{111} и ν_2 . В частности, для алюминия $\nu_{110} = 4997$ м/с и $\nu_1 = 5080$ м/с, $\nu_{111} = 6123$ м/с и $\nu_2 = 6260$ м/с.

Результаты расчета коэффициента теплопроводности сведены в таблицу 4.

Таблица - 4. Коэффициент теплопроводности

Обозначение элемента	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·К					
	λ_{100}	λ_{110}	λ_{111}	$\lambda_{ср}$	$\lambda_{спр}$	$\Delta, \%$
Al	187.3	250.0	175.7	204,4	207	-1.3

В качестве коэффициента теплопроводности для поликристаллического состояния принята средняя величина его значений для монокристалла $\lambda_{ср} = (\lambda_{100} + \lambda_{110} + \lambda_{111})/3$. Из таблицы 4 видно, что результаты расчёта удовлетворительно сходятся с экспериментальными значениями для поликристалла из справочной литературы $\lambda_{спр}$ [5] с расхождением 1,3 %. Эти результаты также косвенно подтверждают адекватность модели по определению скорости распространения колебаний (таблица 4).

Результаты расчета температурной зависимости периода кристаллической решетки и плотности поликристалла Al приведены на рисунках 6,7 в сравнении со справочными (точки на графике) данными [3,4].

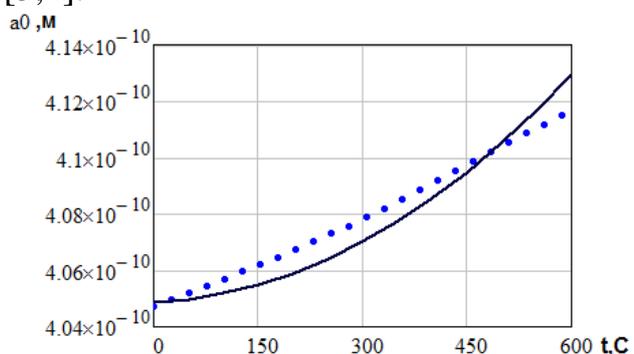


Рис.6 Период кристаллической решётки Al в зависимости от температуры

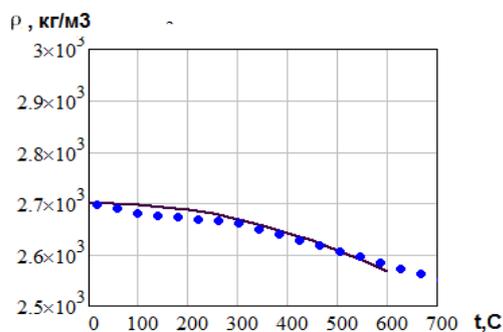


Рис.7 Плотность Al в зависимости от температуры

Плотность Al в зависимости от температуры приведена также в таблице 5.

Таблица – 5. Плотность алюминия

Обозначение элемента	Плотность ρ , кг/м ³ при температуре, С						
	20	100	200	300	400	500	600
Al	2699	2697	2687	2669	2643	2609	2568

Таким образом, удовлетворительная сходимость результатов расчетов со справочными данными подтверждает адекватность модели, а также позволяет пополнить недостающие экспериментальные данные расчетными значениями.

1. Разработанная модель позволяет дополнить недостающий объем справочных данных об упругих, прочностных, теплофизических и физических характеристиках материала.

2. Модель позволяет получить необходимую информацию в условиях, когда эксперимент провести затруднительно по техническим причинам, например, при высоких температурах.

3. Результаты расчетов удовлетворительно сходятся со справочными данными для поликристаллического состояния алюминия. В случае, когда имеется справочная информация о свойствах монокристалла, также имеется удовлетворительная сходимость, в частности для модуля упругости алюминия.

4. Расчеты восполняют нехватку справочной информации для монокристаллического состояния алюминия по его упругим, прочностным и теплофизическим характеристикам с учетом анизотропии, а также в зависимости от температуры.

5. Полученные результаты являются исходными данными для конструирования композиций и сплавов на основе алюминия.

Список использованной литературы

1. Светлов, И. Л. Машина для механических испытаний нитевидных кристаллов (усов) [Текст] / И. Л. Светлов// Заводская лаборатория. –1964. –№9. –С. 1133–1136.

2. Бадамшин И.Х. От четырёх к одному. Силы внутриатомного взаимодействия и прочность материалов: монография – 2-е изд., перераб. и доп. / И.Х. Бадамшин. – Москва: Издательский дом Академии естествознания, 2016. –134 с.

3. Свойства элементов. В 2 ч. Ч. 1. Физические свойства: справочник. М.: Металлургия, 1976. 600 с.

4. Свойства элементов: Справ. изд./ Под ред. М.Е Дрица., М: Металлургия, 1985, 672 с.

5. Физические величины: справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

УДК 621.865.8

Автоматизация процесса смены инструмента и анализ точности позиционирования робота KUKA KR210 R2700 extra

С.Ю. Фалеев, А.С. Беломестных

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

В данной статье рассматриваются точность и повторяемость промышленного робота KUKA KR210 R2700 extra при выполнении операции смены инструмента.

Ключевые слова: *автоматизация смены инструмента, точность позиционирования, операция фрезерования кромок, промышленный робот, гибкая производственная система.*

В настоящее время операция фрезерования кромок деталей на Иркутском авиационном предприятии выполняется вручную, и, как следствие, характеризуется низкой производительностью и качеством. В целях автоматизации процесса и повышения производительности, качества и стабильности операции в лаборатории промышленной робототехники ИРНТУ синтезирован робототехнический комплекс на базе промышленного робота РТК KUKA KR210 R2700 extra (рисунок 1).



Рис.1. РТК на базе робота KUKA KR210 R2700 extra

Обработка сопровождается интенсивным износом инструмента. Ресурс применяемого инструмента составляет 5-6 часов. По истечении данного промежутка времени инструмент должен быть заменен. В настоящее время эта операция выполняется оператором вручную [1]. В целях повышения уровня автоматизации и, как следствие, увеличения производительности техпроцесса, в РТК включен инструментальный магазин, что позволяет автоматизировать процесс установки и замены инструментальной сборки. Предлагаемая автоматизированная система инструментального обеспечения (АСИО) должна осуществлять сборку, установку в обрабатывающий центр инструментального механизма, использование инструментов для обработки деталей в соответствии с маршрутной технологией [3,15].

Чтобы реализовать функции АСИО, был разработан алгоритм и синтезирована подпрограмма автоматической смены инструмента на языке KRL. Данная подпрограмма в автоматическом режиме определяет какой инструмент на текущий момент установлен в шпинделе робота. Если необходимо произвести замену или выгрузку инструмента, робот помещает установленный инструмент в магазин и при необходимости загружает новый.

Для роботизированной ячейки важнейшим показателем эффективности является повторяемость операций. Чтобы обеспечить требуемый уровень повторяемости, необходимо корректно настроить РТК, рассчитать оптимальную траекторию движения робота, подобрать рациональные скоростные режимы и реализовать соответствующую управляющую программу [6].

По окончании проведенных исследований был выполнен анализ повторяемости конечного положения запястья робота при перемещении из различных положений. Для движения робота были задействованы все оси, включая линейную. Изначально в шпиндельном узле инструмент отсутствовал, затем выполнена инструментальная загрузка, робот перемещен в удаленную позицию и запущена операция смены инструмента. Экспериментальные данные (координаты точки позиционирования) занесены в таблицу 1. В целях повышения информативности эксперимента контроль выполнялся по двум точкам. Первая точка располагалась непосредственно над инструментом 205 мм. (рисунок 2), вторая контрольная точка- инструмент установлен в шпиндель (рисунок 3) [2].

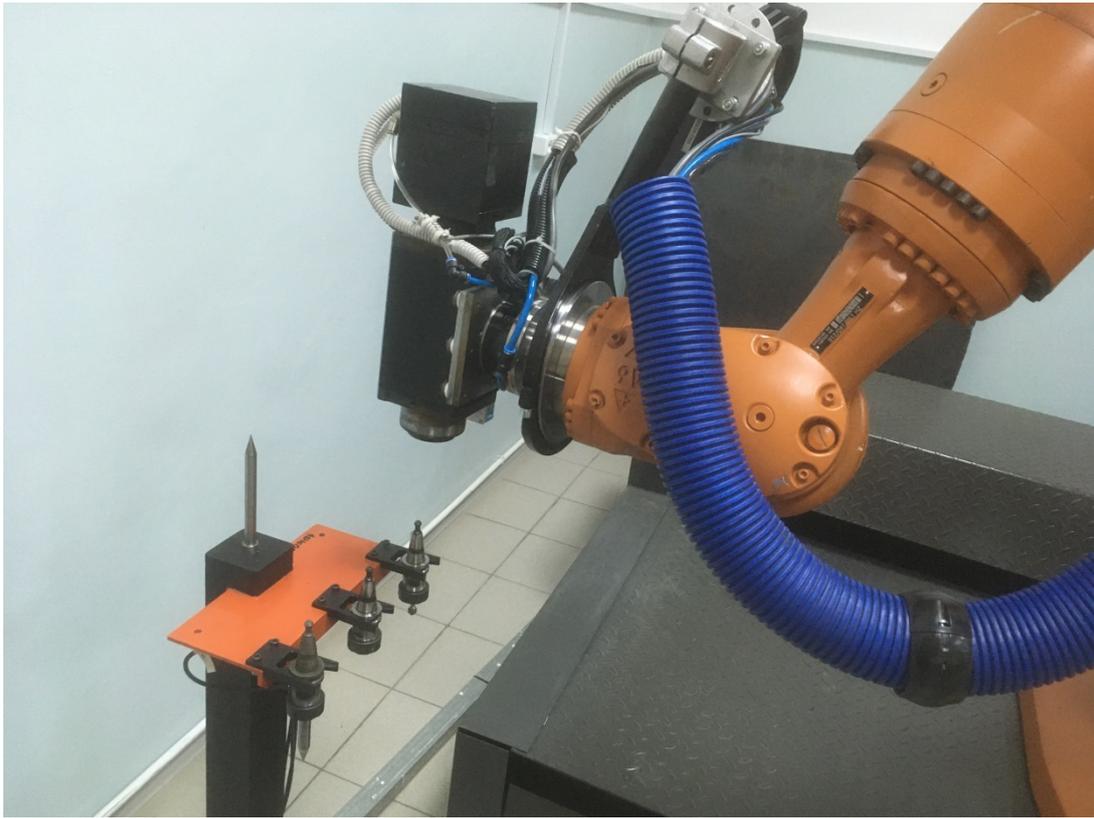


Рис.2. Верхнее положение.

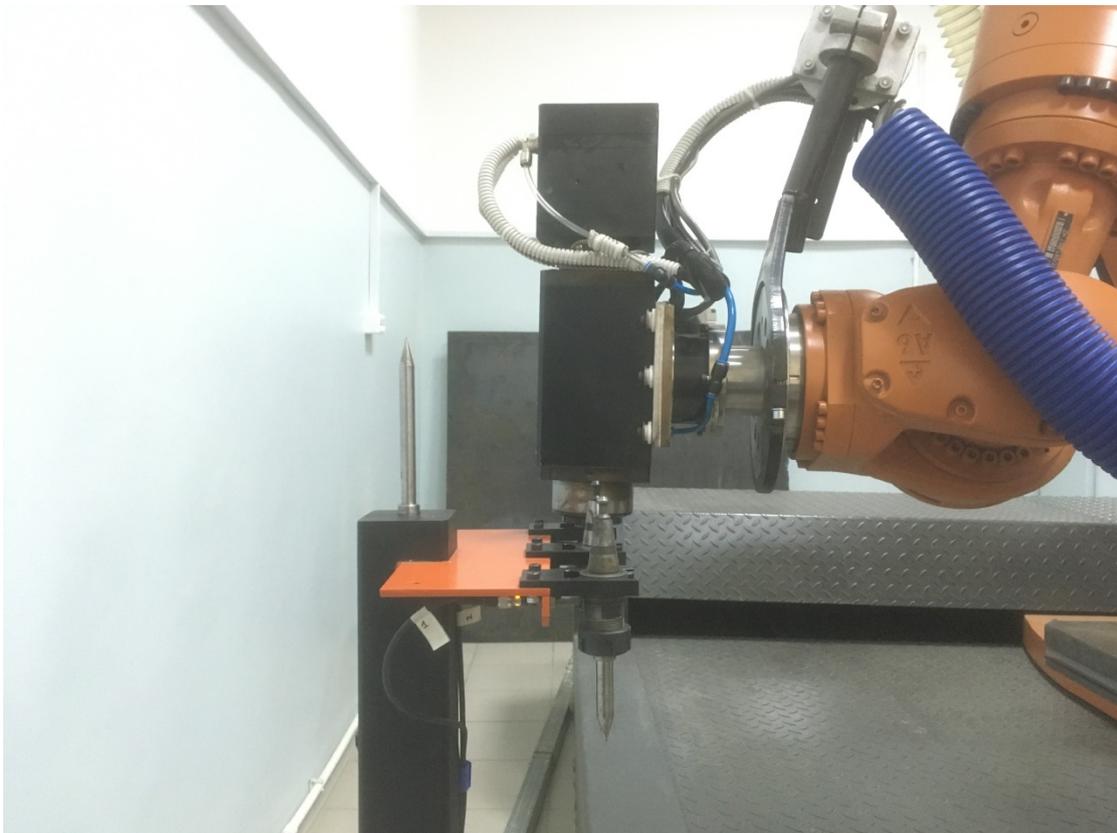


Рис.3. Нижнее положение.

Таблица 1. Положение робота при снятии и установке инструмента №1.

Положение	X, мм.	Y, мм.	Z, мм.	A, град.	B, град.	C, град.
Над инструментом	1150.72	1127.39	1140.05	-95.16	89.57	-63.60
Инструмент установлен	1150.61	1127.50	934.67	-94.82	89.60	-63.26
Инструмент снят	1150.61	1127.50	934.67	-94.77	89.60	-63.21
Над инструментом	1150.72	1127.38	1140.05	-95.07	89.57	-63.51

Главной плоскостью, в котором был произведен анализ точности, являлась XOY, а также углы поворота A, B и C. Как следует из табличных данных, присутствует невязка положения схвата по координатам X и Y в верхнем и нижнем положении (0.11 и 0.12 мм соответственно). Также фиксируются ошибки в поворотных осях A, B, C. Значения углов поворота B отличаются в верхнем и нижнем положениях. Углы A и C отличаются во всех положениях. Максимальные погрешности в верхнем положении 0,01 мм и 0,18 градуса. Погрешности позиционирования в нижнем положении схвата 0 мм и 0,1 градуса.

Аналогичные исследования выполнены при смене инструмента и сформированы таблицы 2 и 3.

Таблица 2. Положение робота при снятии и установке инструмента №2.

Положение	X, мм.	Y, мм.	Z, мм.	A, град.	B, град.	C, град.
Над инструментом	1158.84	1007.20	1140.63	-98.20	89.58	-63.92
Инструмент установлен	1158.74	1007.31	935.93	-97.66	89.60	-63,38
Инструмент снят	1158.76	1007.31	935.93	-97.62	89.60	-63.33
Над инструментом	1158.96	1007.16	1140.63	-98,21	89.57	-63,92

Таблица 3. Положение робота при снятии и установке инструмента №3.

Положение	X, мм.	Y, мм.	Z, мм.	A, град.	B, град.	C, град.
Над инструментом	1129.74	789.78	1140.86	-68.54	89.63	-63.92
Инструмент установлен	1129.77	789.90	938.11	-65.71	89.65	-61.09
Инструмент снят	1129.77	789.90	938.11	-65.63	89.65	-61.01
Над инструментом	1129.78	789.76	1140.86	-69.73	89.63	-65.11

Как видно из таблицы 2 максимальные невязки в верхнем положении составили 0,08 мм и 0,02 градуса, в нижнем положении 0,02 мм и 0,09 градуса соответственно. При установке третьего инструмента отклонения координат в верхнем положении составила 0,02 мм и 2,38 градуса. При нижнем положении 0 мм и 0,16 градуса соответственно.

Полученные экспериментальные данные демонстрируют существенное превышение фактической ошибки позиционирования робота по сравнению с паспортной характеристикой (0.06 мм). Однако, в данном случае фактическая ошибка позиционирования существенно меньше допустимого значения для используемого захватного устройства шпинделя. Таким образом, при выполненных настройках промышленного робота, используемом способе перемещения, предложенной кинематике и разработанной программе точность позиционирования обеспечивает надежную процедуру автоматической замены инструмента в случае его поломки или износа. При смене захватного устройства (ЗУ) или шпинделя необходимо провести предварительное исследование точности позиционирования робота и сопоставить его с техническими характеристиками ЗУ [11].

Список использованных источников:

1. Робототехнический комплекс удаления заусенцев после фрезерования деталей. Иванова А.В., Пономарев Б.Б., Савилов А.В., Чапышев А.П. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 11 (82). С. 49-53.
2. Исследование частотных характеристик робота KUKA KR210 R2700 Extra. Семенов Е.Н., Беломестных А.С., Сидорова А.В. В сборнике: Авиамашиностроение и транспорт Сибири Сборник статей

всероссийской молодежной научно-практической конференции. 2016. С. 252-257.

3. Эффективное зонирование рабочего пространства промышленного робота Kuka KR210 R2700 extra / Семенов Е.Н. [и др.] // Вестник ИрГТУ. 2015 № 12. с. 86 – 95.

4. Савилов А.В. Современные технологии механообработки и формообразования авиационных деталей. В сборнике: Новые технологии, материалы и оборудование Российской авиакосмической отрасли. Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 2-х томах. 2016. С. 494-499.

5. Стуров А.А., Чащин Н.С. Определение зависимости качества обработанной поверхности от используемых режимов резания при фрезеровании кромок на углепластике с помощью промышленного робота KUKA KR210 R2700 Extra. В сборнике: Авиамашиностроение и транспорт Сибири. Сборник статей всероссийской молодежной научно-практической конференции. 2016. С. 281-285.

6. Бакшеева Е.Н., Костин П.Н., Беломестных А.С. Ревизия алгоритма и программного обеспечения для технологической подготовки финишной обработки авиационных деталей на робототехническом комплексе. В сборнике: Авиамашиностроение и транспорт Сибири. Сборник статей VIII Всероссийской научно-практической конференции. 2016. С. 8-12.

7. Савилов А.В. Разработка управляющих программ РТК при помощи CAD/CAM систем //В сборнике: Экстремальная робототехника. Материалы VIII Научно-технической конференции. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГТУ, 1998. С. 54-55.

8. Manufacturing capability of the robotic complex machining edge details Ivanova A.V., Belomestnykh A.S., Semenov E., Ponomarev B.B. International Journal of Engineering and Technology. 2015. Т. 7. № 5. С. 1774-1780.

9. Беломестных А.С., Иванова А.В., Чапышев А.П. Исследование влияния коэффициента усиления в канале управления скоростью движения робота на технологические свойства робототехнического комплекса механической обработки кромок деталей.

10. Кольцов В.П., Ружников Д.А, Беломестных А.С. Активный контроль технологических операций при виброабразивной обработке. Тез. докл. российской научно- технической конференции “Наукоемкие технологии в машиностроении и приборостроении”. Рыбинск: РАТИ, 1994. с. 18-20.

11. E.N. Semyonov, A.V. Sidorova, A.E. Pashkov, A.S. Belomestnykh. Accuracy Assessment of Kuka KR210 R2700 Extra Industrial Robot. International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS Vol 16 No 1, p. 19-25.

12. Воротников С.А., Солдатов А.В. Интеллектуальный

силомоментный датчик для задач промышленной и экстремальной робототехники. М.: Изд-во ИПУРАН, 2012. С. 70–77.

13. Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Козырева М.В. Анализ зависимостей съема и шероховатости поверхности детали при обработке лепестковыми кругами по результатам факторного эксперимента // Вестник ИргТУ. 2015. № 1 (96). С. 32–41.

14. Чапышев А.П., Иванова А.В., Крючкин А.В. Технологические возможности процессов механизированной финишной обработки деталей // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. № 1. Т. 16

15. Интернет ресурс: <https://cyberleninka.ru>.

МЕХАНИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

УДК 629.33

Определение геометрических характеристик участков трения в контакте колеса шасси с твердой опорой

Е.В. Балакина, Д.С. Сарбаев, И.В. Сергиенко

Волгоградский государственный технический университет, 400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28

Эластичные колеса содержат шасси самолетов, автомобилей и других транспортных средств (ТС). Их шины взаимодействуют с твердой опорной поверхностью – дорожными одеждами дорог и аэродромов. В результате этого взаимодействия в пятне контакта может присутствовать только трение покоя, только трение скольжения или их сочетание, в зависимости от режима движения колеса. Геометрические размеры и взаимное расположение участков разного трения определяют устойчивое, неустойчивое или граничное движение эластичного колеса. Установлено, что:

– участок скольжения появляется на продольной оси пятна контакта, на расстоянии от центра пятна контакта, равном $1/4$ длины пятна контакта, затем он увеличивается за счет уменьшения участка трения покоя;

– центр участка трения покоя в пятне контакта перемещается в сторону действующего момента на величину, пропорциональную моменту;

– максимальное перемещение центра участка трения покоя соответствует моменту, максимальному по условиям сцепления, и составляет $1/3$ длины пятна контакта для всех видов и состояний твердой опоры; при достижении этого перемещения наступает полное скольжение в пятне контакта, когда участок трения скольжения занимает всю его площадь.

«Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00011»

Ключевые слова: *шасси, эластичное колесо, твердая опорная поверхность, пятно контакта, участки трения покоя и скольжения, размеры и расположение, расчет и экспериментальное определение*

Эластичные колеса содержат шасси самолетов, автомобилей и других транспортных средств (ТС). Их шины взаимодействуют с твердой

опорной поверхностью – дорожными одеждами дорог и аэродромов. Поскольку явления, происходящие в контакте движущейся шины с опорной поверхностью, определяют свойства устойчивости движения, управляемости и тормозную динамику ТС, то при создании шин их производители стремятся обеспечить одновременно ряд их важных свойств: сцепные, упругие по разным координатам, прочностные, весовые, а также надежность [1-16].

При этом большинство современных ТС, в том числе и беспилотных, снабжены системами контроля движения и управления, алгоритмы функционирования которых предусматривают исполнительные воздействия на колеса и шины. Несмотря на то, что эти системы все время совершенствуются, их наличие не всегда способствует сохранению безопасности [5]. Более того, известно, что в некоторых режимах движения срабатывание указанных систем приводит к потере устойчивости и управляемости машины. Это режимы, связанные с наличием боковой силы даже малой величины, составляющей 15...20% от веса машины, при этом наличие тормозного режима еще больше усугубляет ситуацию. Описанные явления не связаны с неисправностями или недоработкой конструкции системы контроля движения и управления, которая соответствует современным представлениям специалистов-проектировщиков о взаимодействии колеса с дорогой. Эти современные представления не являются совершенными в связи с недостаточной изученностью явлений, происходящих в пятнах контакта колес с дорогой, особенно при наличии боковой силы. Соответственно, эта недостаточная изученность проявляется в проблеме некорректности моделирования явлений в пятне контакта колеса с дорогой (на этапе проектирования машины), которые определяют устойчивость и управляемость машины, и не обеспечивает базовой возможности создания систем контроля движения и управления, способных адекватно выполнять свои функции во всех режимах движения, в том числе и специфических.

В связи с этим возникает необходимость дальнейшего исследования процессов взаимодействия эластичного колеса с твердой опорой, особенно при наличии боковой силы. Появляется ряд задач, одна из которых заключается в расчете изменяющихся геометрических характеристик участков с трением покоя и трением скольжения в пятне контакта эластичного колеса с твердой опорой, по-разному воспринимающих внешние силы и по-разному создающих реакции на колесо.

Ранее, на созданной в Волгоградском государственном техническом университете экспериментальной установке для исследования явлений в пятне контакта эластичного колеса с твердой опорной поверхностью были проведены эксперименты, которые позволили качественно выявить

взаимное расположение участков трения покоя и скольжения в пятне контакта [2,10]. Это были качественные исследования, но не количественные.

На сегодняшний день отсутствуют исследования количественных характеристик процесса появления и распространения участка скольжения в пятне контакта, а также взаимного расположения и размеров участков с трением покоя и скольжения в разных условиях.

Для определения количественных характеристик этих участков проведены математические расчеты.

Как известно, взаимодействие эластичного колеса с твердой опорой в пятне контакта характеризуется эпюрами нормальных и касательных напряжений. Используя эпюру нормальных напряжений, можно определить эпюру допустимых касательных напряжений в пятне контакта. Поскольку участок скольжения в пятне контакта зарождается не там, где касательные напряжения максимальны, а там, где они начинают превышать допустимые, то условие появления скольжения в i -ой точке пятна контакта можно записать так:

$$\tau_{xi} \geq [\tau_{xi}] = f_{\Pi} \cdot \sigma_{zi} ,$$

где σ_{zi} – нормальные напряжения в i -ой точке пятна контакта колеса с опорой;

τ_{xi} – касательные напряжения в i -ой точке пятна контакта колеса с опорой;

f_{Π} – коэффициент трения покоя между материалом колеса и опорной поверхностью.

Эта методика была реализована. Расчетным путем получены эпюры нормальных и касательных напряжений в пятне контакта эластичного колеса с твердой опорой при разных видах нагружения колеса. Сравнены действующие в пятне контакта касательные напряжения с допустимыми и тем самым аналитически найдено геометрическое расположение участков с трением покоя и скольжения в пятне контакта при разных режимах движения колеса.

Для экспериментальное подтверждение полученных результатов создана экспериментальная установка для количественного выявления взаимного расположения участков с трением покоя и скольжения в пятне контакта, показанная на рисунке 1.



Рис.1. Фотография экспериментальной установки

Шина 4.10/3.50-5 (для аэродромной тележки), диагональная, производителя Omega (Тайвань) имеет давление по паспорту – 2,5 атм; нагрузку – 1100 Н. Давление создавалось компрессором ДС 12V 300 psi, рассчитанным на максимальное давление до 3 атм, а контролировалось манометром типа МТИ ГОСТ 2405-63.

Установка содержит шарнирно установленное в горизонтальном положении эластичное колесо, взаимодействующее с твердой плоской опорой из оптически прозрачного материала. Она является моделью дороги и обеспечивает возможность визуализации явлений в пятне контакта колеса с дорогой. Установка позволяет нагружать колесо со стороны плоской опоры нормальной нагрузкой и продольной нагрузкой до появления полного скольжения в пятне контакта колеса. Для видеосъемки пятна контакта использована скоростная видеокамера со скоростью съемки 8 тыс. кад/с. Съемка производилась в процессе продольного нагружения до наступления полного скольжения в пятне контакта, через оптическую линзу с фокусным расстоянием 0,2м для зрительного увеличения размеров пятна контакта. Обработка видеозаписи производилась с использованием анализа изображений пятна контакта на компьютере с визуализацией на большой монитор. Большой монитор и линза обеспечивают стократное увеличение размеров пятна контакта. Это исключает сопоставимость измеряемых величин параметров длины с величинами погрешности измерений.

Предварительная обработка результатов эксперимента подтвердила результаты проведенных расчетов.

В пятне контакта эластичного колеса с твердой опорой в ведущем режиме колеса (только для колесных машин) участок трения покоя смещается вперед относительно направления вектора поступательной скорости колеса, то есть в сторону передней части пятна контакта.

В пятне контакта эластичного колеса с твердой опорой в тормозном режиме колеса участок трения покоя смещается назад относительно направления вектора поступательной скорости колеса, то есть в сторону задней части пятна контакта.

В пятне контакта эластичного колеса с твердой опорой участок скольжения появляется на продольной оси пятна контакта, на расстоянии от центра пятна контакта, равном $1/4$ длины пятна контакта. Затем он увеличивается за счет уменьшения участка трения покоя.

Центр участка трения покоя в пятне контакта перемещается в сторону действующего момента на величину, пропорциональную моменту.

Максимальное перемещение центра участка трения покоя соответствует моменту, максимальному по условиям сцепления, и составляет $1/3$ длины пятна контакта для всех видов и состояний твердой опоры. При достижении этого перемещения наступает полное скольжение в пятне контакта, когда участок трения скольжения занимает всю его площадь.

«Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00011»

Список использованной литературы:

1. Балабин, И.В. Автомобильные и тракторные колеса и шины / И.В. Балабин, В.А. Путин, И.С. Чабунин. – МГТУ «МАМИ», 2012. – 920с.
2. Балакина, Е.В. Определение взаимного расположения сил, реакций и зон трения в пятне контакта эластичного колеса с твердой поверхностью / Е.В. Балакина, Н.М. Зотов // Трение и износ. – 2015. – т.36, №1. – С. 36 - 40.
3. Балакина, Е.В. Расчет коэффициента сцепления устойчивого эластичного колеса с твердой опорной поверхностью при наличии боковой силы / Е.В. Балакина // Трение и износ. – 2019. – т.40, №6. – С. 756-765.
4. Зотов В.М. Физический метод оценки коэффициента продольного проскальзывания автомобильного колеса на твердой поверхности / В.М. Зотов и др. // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. - 2018. - №3 (51), С. 338-349.

5. Кристальный, С.Р. Измерительный комплекс для определения эффективности действия электронных систем контроля устойчивости автомобилей / С.Р. Кристальный, М.А. Топорков, В.А. Фомичев, Н.В. Попов // Автотранспортное предприятие. – 2015, № 6, С. 37-41.
6. Работа автомобильной шины / Под ред. В.И. Кнороза. – М.: Транспорт, 1976. – 283 с.
7. Федотов, А.И. Динамический метод диагностики пневматического тормозного привода автомобилей: монография. – Иркутск: Изд-во ИрННТУ, 2015. – 514 с.
8. Федотов, А.И. Математическая модель для исследования тормозного пути автомобиля с АБС на зимних дорогах / А.И. Федотов, В.О. Громалова // Автомобильная промышленность.– 2020.– № 3.– С. 15-21.
9. Федотов, А. И. Механика взаимодействия эластичной шины с цилиндрической поверхностью бегового барабана диагностического стенда / А.И. Федотов, А.В. Бойко // Автомобильная промышленность.– 2014.–№ 10.– С. 33-36.
10. Balakina, E.V. Qualitative Research of Combined Friction in Contact of Elastic Wheel with Solid Surface / E. V. Balakina, D. S. Sarbaev // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2018) (Moscow, Russia, 15-18 May, 2018) / ed. by A. A. Radionov [et al.] ; Moscow Polytechnic University [et al.]. – Cham (Switzerland): Springer, 2019. – P. 773-779. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_80. (<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-95630-5>. – (Book ser.: Lecture Notes in Mechanical Engineering : LNME).
11. Hans B. Pacejka. Tire and Vehicle Dynamics. – Published by Elsevier Ltd, USA, 2012, 632 p.
12. Kubba, A.I., Hall, G.J., Varghese, S., Olatunbosun, O.A., Anthony, C.J. (2018) Modeling of contact patch in dual-chamber pneumatic tires. Tire Science and Technology, USA, Vol. 46(2), p 78-92.
13. Morris de Beer, Colin Fisher, Louw Kannemeyer. Tyre - pavement interface contact stresses on flexible pavements – quo vadis? / 8th Conference on asphalt pavements for Southern Africa, June 2012.
14. Reza N. Jazar. Vehicle Dynamics: Theory and Application. – Springer Science + Business Media, LLC, 2008, 1015 p.
15. Seyedmeysam KHALEGHIAN et al. A technical survey on tire-road friction estimation. Friction, USA, 2017, Vol. 5, No 2, p. 123-146.
16. Svendenius Jakob. Tire Modeling and Friction Estimation. – Department of Automatic Control Lund University, Lund, Sweden, 2007. – 194 p.

Система обоснования свойств надежности и живучести уникальных механических систем¹

А.Ф. Берман¹, О.А. Николайчук¹, А.Ю. Юрин^{1,2}

¹Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН (ИДСТУ СО РАН), 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134.

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Предлагается концепция системы обоснования свойств надежности и живучести уникальных механических систем, отказы которых могут приводить к авариям. Система основана на принципах самоорганизации и обеспечивает возможность рассмотрения нерасчетных воздействий любого происхождения, ошибок при проектировании и эксплуатации на основе использования соответствующих правил формулируемых экспертами. Принципы самоорганизации реализуются механизмом, базирующимся на правилах поэтапно формирующих необходимые задачи, требуемые экспертные системы и вычислительные модули для их решения, а также на правилах непосредственно связывающих отрицательно воздействующие факторы и нейтрализующие их свойства.

Ключевые слова: *прочностная надежность, ресурс, живучесть, безопасность, механизм, правила, экспертные системы, автоматизация.*

Введение. Автоматизация конструирования уникальных механических систем, надежность, живучесть и безопасность которых обеспечивается только прочностным и ресурсным резервированием, требует специфических подходов вследствие отсутствия аналитических зависимостей между основными критериями.

Необходимо отметить, что при рассмотрении подобных систем, исключать из рассмотрения возможность воздействия нерасчетных нагрузок любого происхождения, ошибок при проектировании и эксплуатации, категорически нельзя. Тогда, принятие решений переходит в область высокого уровня неопределенности и требует применения новых методов и средств обоснования и обеспечения свойств надежности и живучести [1-5].

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: проект РФФИ №18-08-00560.

Целью исследования является разработка системы обоснования свойств надёжности и живучести Уникальных Механических Систем (УМС) по критериям прочности и ресурса, основанной на подходе, связывающем совокупность логических правил принятия решений, трансдисциплинарную модель пространства технического состояния УМС и принципы самоорганизации [6-10]. Дальнейшее развитие этого подхода базируется на технологиях онтологического моделирования, продукционных экспертных систем, модельно-управляемого подхода и компонентной разработке программных систем [11,12].

Результат. Для обоснованного назначения коэффициентов запаса, которые обеспечивают корректировку принятых гипотез, несовершенных расчетных схем, возможных отклонений качества изготовления и условий эксплуатации, необходимы дополнительные эмпирические и экспертные знания, которые трудно включить в существующие модели. Эти знания используются в форме правил, которые обеспечивают возможность обоснования уровня коэффициентов, определение вероятных деградиационных процессов, их скорость и вызываемые ими повреждения, а также методы и средства обеспечивающие надежность и живучесть УМС.

Принцип самоорганизации системы обоснования свойств надежности и живучести УМС, обеспечивающий достижение системой целей, реализуется не системой управления, а благодаря взаимодействию компонентов системы между собой, инициируемому исходными данными. Взаимодействие компонентов осуществляется на основе правил, которые описывают связи между целями исследования, функциями компонентов и обрабатываемой информацией.

На рисунке 1 показан механизм самоорганизации системы обоснования свойств УМС. Работа механизма начинается с ввода исходных данных, отражающих воздействующие факторы и технические требования к УМС, сборочным единицам (СЕ) и деталям (Д). Далее, реализуется последовательное взаимодействие компонентов программной системы и выполнение ими своих функций: самоорганизации задач (база знаний 1 и планировщик), аналитических блоков (база знаний 2, планировщик, вычислительные модули и экспертные системы) и непосредственно искомым свойствам рассматриваемого объекта (база знаний 3 и все компоненты).

Функционирование названных компонентов и обеспечение самоорганизации задач осуществляется с помощью соответствующих правил, которые сформулированы экспертами, как на основе общепринятых знаний, так и специальных, которыми они обладают. Правила хранятся в соответствующих базах знаний экспертных систем и вычислительных модулях.

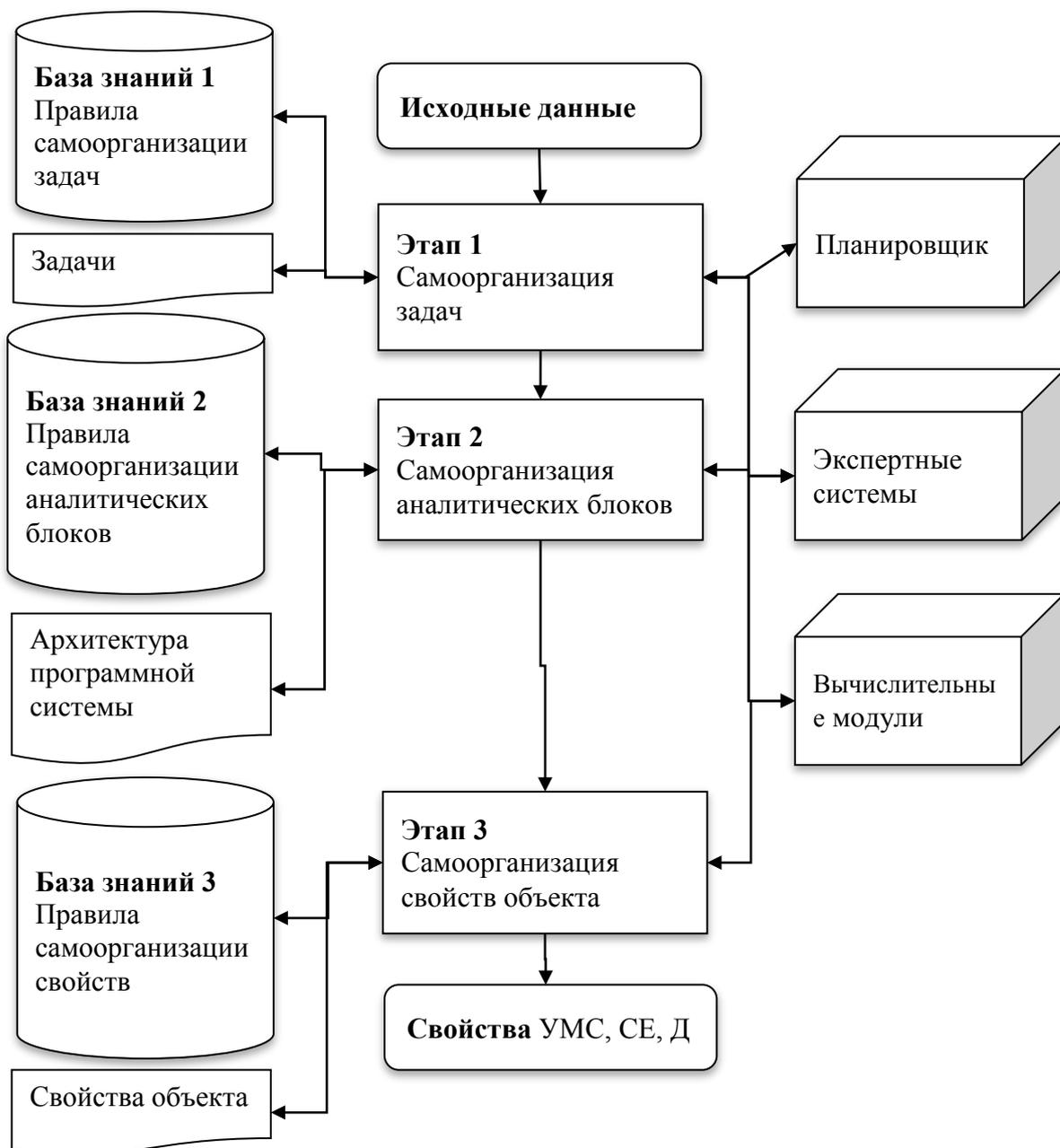


Рис.1. Механизм самоорганизации системы обоснования свойств уникальных механических систем (УМС): СЕ – сборочные единицы, Д – детали

После отработки второго этапа автоматически формируется архитектура программной системы (рис.2). Взаимодействие компонентов между собой обеспечивается блоком «Механизм самоорганизации».

Непосредственное обоснование свойств УМС, СЕ и Д обеспечивается Экспертными Системами (ЭС) и Вычислительными модулями (ВМ) вошедшими в состав аналитических блоков.

Таким образом, сначала, через интерфейс пользователя, исходные данные вводятся в систему. На основании этих данных, выбираются правила, самоорганизующие (формирующие) задачи, решение которых обеспечивает обоснование свойств. Затем, для выбранных задач, также, с

помощью соответствующих правил (правил выбора экспертных систем и вычислительных модулей), выбираются ЭС и ВМ, которые могут решить эти задачи и которые объединяются в аналитические блоки. Затем, аналитические блоки самоорганизуют (обосновывают) требуемые свойства рассматриваемого объекта.

Например, имеется совокупность ЭС, помогающих решать те или иные задачи. Имеются ВМ, решающие формализованные задачи. Теперь из них, в зависимости от цели и научно-технического аспекта решения задачи, формируются аналитические блоки, которые их решают.

Пример. Исходные данные. Воздействующие факторы. *Нагрузка механическая (силовая)* – постоянная. *Контактная среда* – слабоактивная жидкость при температуре Q^0C .

Структурные, Конструктивные и Технические требования к Детали. *Технические требования в соответствии с Техническим Заданием*: Деталь должна выдерживать рабочие нагрузки, при заданной температуре. Ресурс Детали – G-часов (G – некоторая переменная количества часов). *Показатель живучести* – «течь перед разрушением». Обеспечить ограниченную работоспособность и безопасность Детали в состояниях недопустимых повреждений и возможность их выявления приборными и органолептическими методами.

Структура правил из базы знаний 1 самоорганизации Задач, входящих в экспертную систему и формирующих совокупность задач, решение которых обеспечит самоорганизацию свойств детали:

Левая часть правила – *Исходные данные*; Правая часть – *Задачи*.

Примеры правил: ЕСЛИ *Нагрузки Механические* длительные ТО *Задачи* Оценить напряженно-деформированное состояние И Обосновать выбор материала детали И Обосновать коэффициенты запасов прочности, несущей способности и ресурса И Оценить прочность и несущую способность и др.; ЕСЛИ *Воздействие контактной рабочей среды* ТО *Задачи* Выявить возможные деградационные процессы с учетом механического воздействия и определить скорость деградационных процессов И Определить вид и тип параметров повреждения И Рассчитать ресурс и др.

Структура правил из базы знаний 2 самоорганизации Аналитических Блоков: Левая часть правила – *Задача*; Правая часть – *Аналитический Блок*.

Пример правила: ЕСЛИ *Задача* в соответствии с правилом 1 ТО ЭС соответствующие И ВМ соответствующие.

Структура правил из базы знаний 3 самоорганизации свойств детали на основе Экспертных Систем (ЭС) и Вычислительных Модулей (ВМ), входящих в сформированные аналитические блоки: *Левая часть* – *воздействующие факторы*; *Правая часть* – *необходимые действия и свойства*.

Примеры правил для ЭС по обоснованию расчетной схемы: ЕСЛИ деталь имеет некоторую форму Φ_i из $\{\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_F\}$ ТО принимается расчетная схема для плоского напряженно-деформированного состояния. *ВМ расчета НДС*. Расчетные модели в соответствии с расчетной схемой. ЭС по предварительному выбору материала детали. ЕСЛИ нагрузки статические И доступ для оценки технического состояния затруднен И Температура рабочая И Контактная среда слабоактивная ТО сталь низколегированная И жаростойкая И Механические, Физические, Химические свойства. *Вычислительный модуль*. Расчет коэффициентов интенсивности напряжений, коэффициентов запаса и др. ЭС *Определения возможного деградационного процесса и его скорости, вида, типа и параметров повреждений и разрушения*. ЕСЛИ длительные проектные и запроектные постоянные растягивающие напряжения И соответствие и несоответствие контактной среды техническим требованиям ТО возможны деградационные процессы ДП₁, ДП₂, ..., ДП_к И повреждения типа П₁, П₂, ..., П_м. *Вычислительный модуль*. Расчет скорости деградационных процессов в условиях действия проектных и запроектных факторов.

Полученные конструктивные свойства Детали. Материал – низколегированная, жаростойкая сталь. Коэффициент запаса прочности по пределу текучести 1,6; Ресурс – 20000 часов; $K_I < K_{Ic} > 90 \text{ МПа м}^{1/2}$; возможные повреждения: питинги, трещины перпендикулярные максимальным растягивающим напряжениям, трещины приводят к разгерметизации раньше, чем становятся критическими, или становятся визуально определяемыми с запасом 1,3 к критическому размеру трещины.

Заключение. Система обоснования свойств надежности и живучести самоорганизуется благодаря механизму выявления задач, экспертных систем и вычислительных модулей, обеспечивающих их решение.

Механизм состоит из трех этапов. На первом этапе, исходные данные, в том числе требования к создаваемому объекту, сопоставляются с задачами, в решении которых они используются для обоснования свойств удовлетворяющих требованиям. На втором этапе, для решения выявленных задач, выбираются соответствующие экспертные системы и вычислительные модули, использующих эти данные. На третьем этапе, экспертные системы и вычислительные модули осуществляют решение задач на основе соответствующих баз знаний в автоматическом режиме.

Система обеспечивает обоснование свойств надежности и живучести УМС благодаря механизму самоорганизации, включающему альтернативные интеллектуальные (экспертные) и вычислительные системы, обеспечивающие заданные функции на основе правил, сформулированных экспертами и в определенной степени

соответствующие принятой системе разработки УМС. Архитектура системы включает набор компонентов, обеспечивающих как функциональное, так и информационное обеспечение процесса самоорганизации свойств.

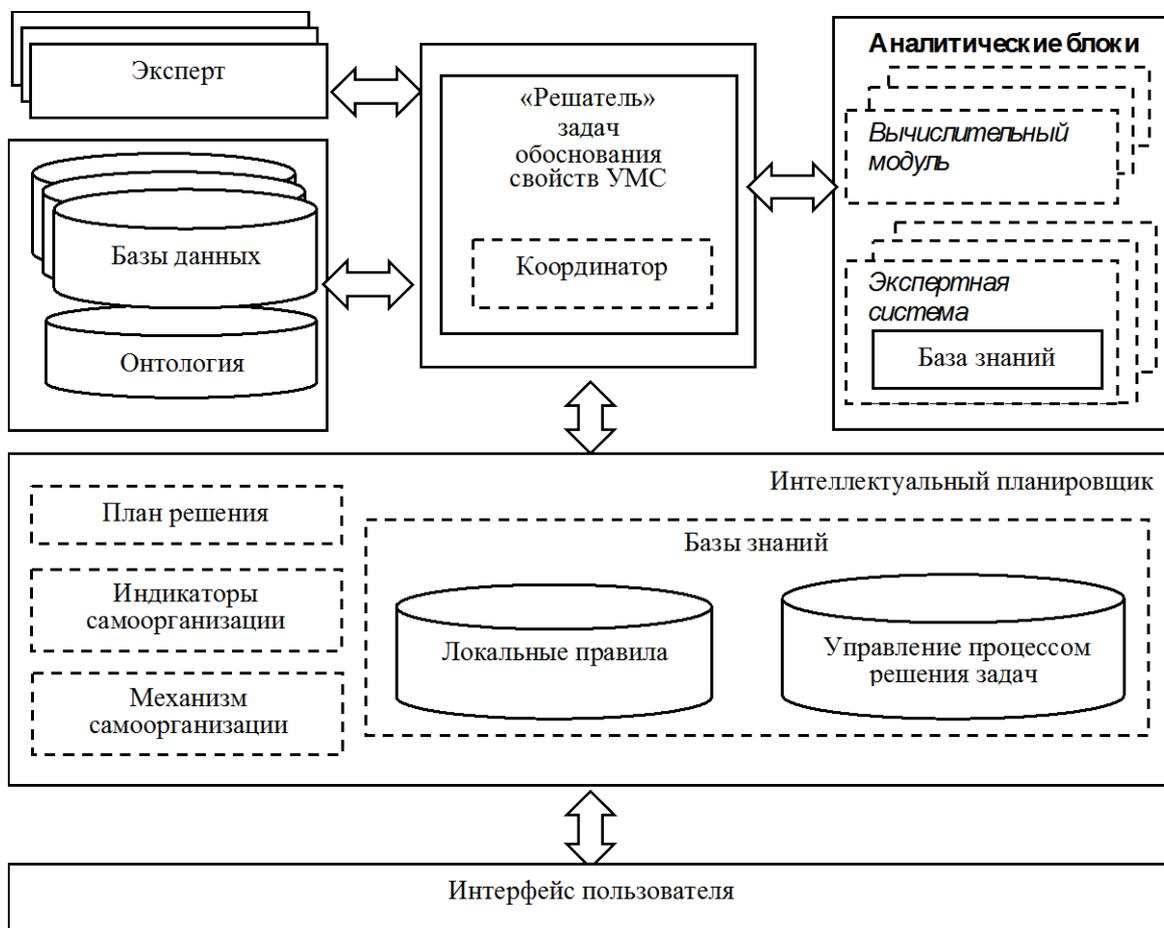


Рис. 2. Архитектура комплексной программной системы обоснования свойств Уникальных Механических Систем (УМС).

Логические и вычислительные задачи в примере приведены в упрощенном виде, что не исключает возможности их подробного описания при необходимости. Эксперты участвуют в решении задач при формулировке правил баз знаний (of-line) и on-line.

Разработанный механизм и архитектура комплексной программной системы базируются на логических правилах (продукциях) составляющих основу продукционных экспертных систем. Самоорганизация системы и последующее автоматическое обоснование с ее помощью непосредственно свойств УМС обеспечивается без специфической системы управления требующей больших затрат для разработки и обеспечения собственной надежности.

Список использованной литературы:

1. Махутов Н.А. Критериальная база прочности, ресурса,

надежности, живучести и безопасности машин и человеко-машинных комплексов / Проблемы машиностроения и надежности машин. -2013. № 5. С. 25–36.

2. Махутов Н.А., Резников Д.О. Многоуровневая оценка живучести сложных технических систем с учетом масштабно-структурной иерархии процессов накопления повреждений и разрушения / Безопасность в техносфере. – 2016. №4. С.3-17.

3. Махутов Н.А., Большаков А.М., Захарова М. И. Анализ риска аварий объектов нефтегазовой отрасли в арктических климатических условиях /Заводская лаборатория. Диагностика материалов.-2019.Том85. №2. С.48-54.

4. Берман А.Ф., Малтугуева Г.С., Юрин А.Ю. Поддержка принятия решений при выборе конструкционных материалов для обеспечения безопасной эксплуатации оборудования // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2015. № 11. Том 81. С.73-80.

5. Ботвина Л.Р. О пользе и трудностях междисциплинарных исследований // Физическая мезомеханика. - 2018. Том 21. №6. С.9-16.

6. Берман А.Ф., Николайчук О.А., Юрин А.Ю., Павлов А.И. Принципы информационной технологии решения междисциплинарных задач обеспечения техногенной безопасности на основе самоорганизации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. - 2019. № 2 (14). С. 5-15.

7. От моделей поведения к искусственному интеллекту / Под ред. В.Г. Редько. – М.: КомКнига. - 2006. 315 с.

8. Колесников А.В., Кириков И.А., Листопад С.В. Гибридные интеллектуальные системы с самоорганизацией: координация, согласованность, спор. -М.: ИПИ РАН, -2014. 189 с.

9. Bernon C. Tools for Self-Organizing Applications Engineering/C. Bernon [et al.] // Series Lecture Notes in Artificial Intelligence. V. 2977 / Eds G. Di Marzo Serugendo. Springer, -2004. P. 283–298.

10. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: Теория системного синтеза. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», -2012. 240 с.

11. Дородных Н.О., Юрин А.Ю. Технология создания производственных экспертных систем на основе модельных трансформаций / Под. ред. О.А. Николайчук. – Новосибирск: СО РАН- 2019. 144 с. ISBN 978-5-7692-1646-6. DOI: 10.15372/TECHNOLOGY2019DNO.

12. Pavlov A.I., Stolbov A.B., Dorofeev A.S. The Workflow Component of the Knowledge-based Systems Development Platform // CEUR Workshop Proceedings. Proceedings for the 2nd Scientific-practical Workshop Information Technologies: Algorithms, Models, Systems, 2019, Vol. 2463. P. 47-58. <http://ceur-ws.org/Vol-2463/>.

Теоретические подходы к экономической оценке затрат участников дорожного движения в связи со снижением скорости сообщения

***Р.Н. Горбунов, З.В. Горбунова, Л.Н. Горбунова,
А.И. Карлина, В.С. Колчин***

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

В статье представлены подходы к экономической оценке затрат участников дорожного движения, связанных со снижением скорости сообщения. Рассмотрены способы укрупненной оценки затрат участников дорожного движения, вызванных заторами. Авторами предложены модели собственных и общественных затрат, вызванных конгестией.

Ключевые слова: *экономическая оценка, дорожное движение, улично-дорожная сеть, конгестия, организация дорожного движения.*

Вопрос изучения функционирования улично-дорожной сети городов стоит очень остро [1-12]. Интенсивный рост уровня автомобилизации в условиях малоизменяющейся пропускной способности существующей улично-дорожной сети (далее УДС), особенно в зонах исторической застройки, приводит к снижению скорости сообщения на отдельных участках УДС, с этим связано возникновение понятия «транспортная конгестия».

Сам термин «конгестия» (congestion) заимствован из медицины и применяется преимущественно в иностранной специальной литературе, посвящённой проблемам функционирования городских УДС. При этом он используется в отношении как транспорта, так и элементов транспортной инфраструктуры.

С точки зрения транспортной проблематики перевод термина Congestion на русский язык сложен, поскольку этим термином называют совокупность состояний УДС. Международный центр транспортных исследований (Joint Transport Research Centre) [13] приводит следующие определения термина «транспортная конгестия»:

1. Ситуация превышения спроса на дорожное пространство над предложением.

2. Помехи, оказываемые транспортными средствами друг на друга, в соответствии с зависимостью «скорость-интенсивность» в условиях, когда нагрузка на УДС приближается к величине её пропускной способности.

3. Различие между ожидаемым пользователями качеством функционирования УДС и реальным её состоянием.

Учитывая наличие множества формулировок термина, можно обобщённо свести их к тому, что транспортная конгестия представляет собой состояние загрузки УДС, при котором объёмы дорожного движения приближаются к пропускной способности или превышают её. [14]

Вопрос об экономической оценке транспортной конгестия является очень важным, поскольку такая оценка поможет в принятии решения о необходимости внесения изменений при организации дорожного движения (далее ОДД) на УДС городов и их последствия.

Термин «транспортная конгестия» описывает ситуацию в случае превышения количества автомобилей над пропускной способностью автомобильной дороги, однако ухудшение условий возможно не только в случае такого превышения, но и при меньшей интенсивности движения, а также в случае изменения параметров функционирования УДС (изменения скоростного режима, размещения искусственных неровностей и т.п.). В рамках проводимого исследования рассматривалась не только транспортная конгестия, а в целом ухудшение условий движения и понесённые из-за них затраты.

Понесённые в связи со снижением скорости сообщения затраты складываются из затрат на передвижение в свободных условиях и дополнительных затрат, вызванных ухудшением условий движения. Под затратами в данном исследовании понимаются именно дополнительные затраты.

Затраты несут как участники дорожного движения, так и другие люди, предприятия и окружающая среда.

Затраты подразделяются на собственные затраты, понесённые участниками движения, и общественные затраты, или негативные воздействия, которые несут предприятия, окружающая среда и иные лица, не участвующие в дорожном движении. Структура затрат приведена в таблице 1. При этом следует понимать, что некоторые виды воздействий не всегда и не в полном объёме могут быть скомпенсированы. К затратам (финансовым потерям) также можно отнести недополученную выручку, например, транспортно-логистических компаний, служб такси и иных организаций, производительность которых снижается в следствии ухудшения условий движения транспортных средств на городских УДС.

Таблица 1 – Структура собственных и общественных затрат

Собственные затраты	Общественные затраты
1. Затраты времени на передвижение.	1. Затраты на содержание дорог.
2. Прямые затраты на поездку (топливо или оплата проезда).	2. Экологическое воздействие.
3. Косвенные затраты на поездку	3. Воздействие на психофизическое состояние окружающих (шум, пыль, грязь)

(износ деталей, порча одежды и т.п.). 4. Психофизические затраты. 5. Вероятностные затраты (например, риск опоздания, риск карманной кражи в общественном транспорте и т.п.). 6. Финансовые потери.	и т.п.). 4. Вероятностные затраты (например, риск ДТП и т.п.). 5. Финансовые потери.
--	--

Оценку затрат можно проводить как для каждого участника движения, так и для УДС в целом, а совокупные собственные и общественные затраты могут быть определены согласно (1, 2).

$$Z_{\text{соб}} = Z_{\text{врем}} + Z_{\text{прям}} + Z_{\text{косв}} + Z_{\text{ПФсоб}} + P_{\text{соб}} + \text{НВ}_{\text{соб}} \quad (1)$$

$$Z_{\text{общ}} = Z_{\text{дор}} + Z_{\text{экол}} + Z_{\text{ПФобщ}} + P_{\text{общ}} + \text{НВ}_{\text{общ}} \quad (2)$$

Каждый из представленных показателей может определяться на основе различных подходов и иметь свою размерность, например, временные затраты удобнее оценивать в секундах (минутах, часах), в том время как прямые затраты – в рублях, а экологическое воздействие можно оценивать в м³ загрязняющих веществ.

Расчет совокупных затрат возможен в случае их экономической оценки приведением всех показателей к единой размерности – рублям.

Поскольку в данном исследовании под затратами понимаются дополнительные затраты, $Z_{\text{доп}}$, вызванные ухудшением условий движения, то такие дополнительные затраты являются разницей между фактически понесёнными затратами, $Z_{\text{факт}}$, и потенциальными затратами, которые могли бы быть понесены в случае лучших условий функционирования УДС, например, в случае передвижения автомобилей в свободных условиях, $Z_{\text{с.у.}}$ (3).

$$Z_{\text{доп}} = Z_{\text{факт}} - Z_{\text{с.у.}} \quad (3)$$

Например, временные затраты на передвижение на исследуемом участке УДС, вызванные ухудшением условий движения, представляют собой разность между фактической продолжительностью передвижения и продолжительностью передвижения в свободных условиях, графически могут представлены заштрихованной фигурой, рисунок 1.

Несмотря на кажущуюся простоту, оценка каждого из показателей весьма трудозатратна, поскольку требует сбор и обработку большого количества данных, при оценке из совокупных затрат могут быть исключены отдельные показатели, например, сбор данных, который невозможен или трудозатратен и может проводиться как в совокупности, так и по отдельным показателям.

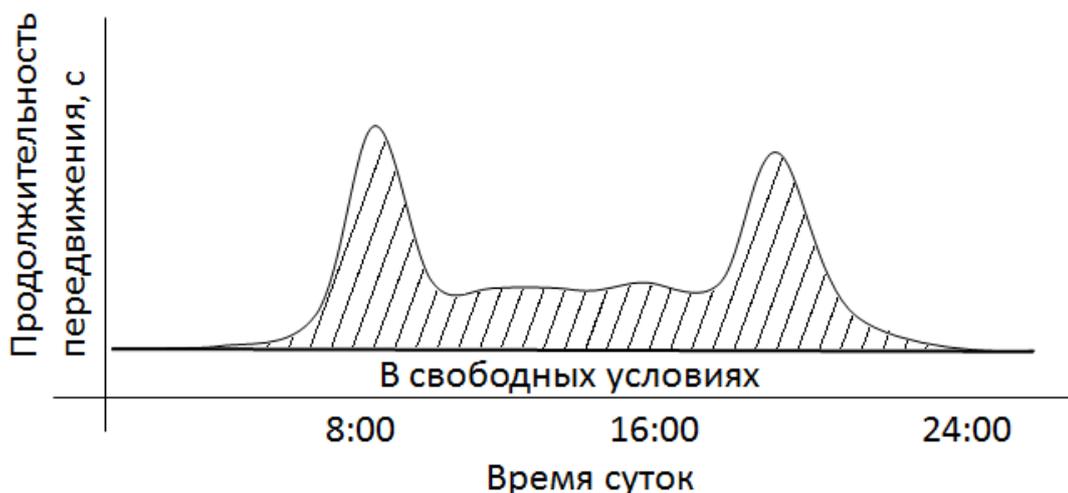


Рис. 1. Временные затраты участников движения, вызванные затруднением условий движения

Совокупные затраты, понесённые при передвижении по УДС всеми участниками по каждому виду затрат, представляют сумму затрат, понесённых каждым участником дорожного движения и суммы затрат, приходящихся на общественное воздействие, и может быть представлен графически (рисунок 2), где N – интенсивность движения автомобилей на участке УДС в течении суток T , а $Z_{уд}$ – удельные затраты, приходящиеся на 1 автомобиль, при этом предполагается, что пиковые значения удельных затрат приходится на пиковые периоды интенсивности. Поскольку процесс передвижения автомобилей является непрерывным, то совокупные затраты будут определяться объёмом фигуры, представленной на рисунке 2, который может быть определён как:

$$Z_{удс} = \iiint dZ_{уд} dN dT \quad (4)$$

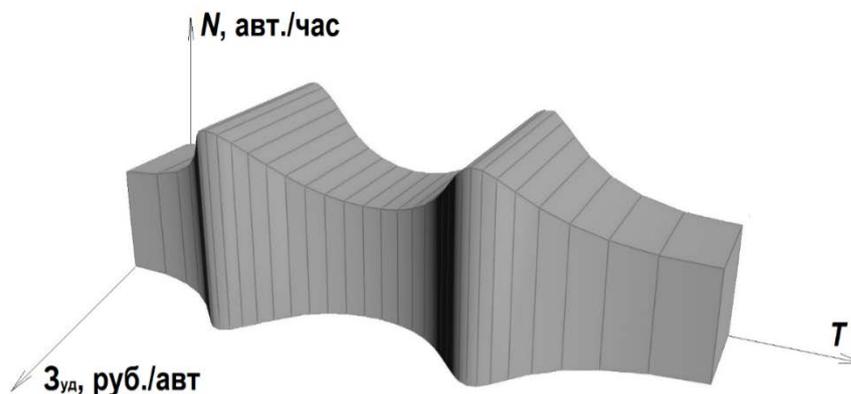


Рис. 2. Совокупные затраты на передвижение на УДС

В дискретной форме совокупные затраты могут определяться как сумма собственных и общественных затрат (5). Такие данные могут быть

получены на основе геоинформационных данных, полученных от участников дорожного движения.

$$Z_{\text{удс}} = \sum_i Z_{\text{соб } i} + \sum_i Z_{\text{общ } i} \quad (5)$$

В случае необходимости расчёта общих затрат, приходящихся на одного участника дорожного движения, возникает ряд вопросов при разделении общественных затрат, поскольку каждый участник оказывает разное влияния, из чего следует, что порядок расчёта доли общественных затрат, приходящихся на 1 участника дорожного движения, требует детального анализа на основе проведения исследований и может быть предметом отдельного исследования.

Оценка собственных затрат интуитивно проводится каждым участником дорожного движения и влияет на выбор времени начала передвижения, а оценка общественных затрат на существующих участках УДС должна осуществляться государственными и муниципальными органами, ответственными за ОДД, и проектными организациями на этапе проектирования новых участков УДС.

Укрупнённая оценка некоторых показателей может проводиться аналитически на основании нормативных или табличных данных. Фактическая оценка может применяться на основе геоинформационных данных, получаемых от участников движения, например, на основе данных проекта платформы «Автодата» [15].

Ухудшение условий движений, в первую очередь, оказывает влияние на временные затраты, их денежная оценка сложна и может проводиться на основе среднего удельного заработка:

$$Z_{\text{врем } i} = \Delta T_i \cdot Z_{\text{П}_{\text{уд.ср.}i}} \quad (6)$$

Кроме того, можно проводить оценку влияния, как в разрезе лиц, участвующих в дорожном движении, так и в разрезе транспортных средств, при этом совокупные затраты каждого участника дорожного движения могут различаться даже в отдельно взятом транспортном средстве.

При оценке затрат также следует обратить внимание, что значение некоторых затрат могут принимать нулевые или отрицательные значения, например, пассажир, отдохнувший во время поездки, будет иметь отрицательное значение психофизических затрат $Z_{\text{пф}}$, а не оплативший проезд в общественном транспорте не будет иметь прямых затрат.

Снижение удельных общественных затрат может достигаться использованием общественного транспорта. Общественные затраты частично перераспределяются на участников движения и компенсируются государству за счёт уплачиваемых налогов и сборов. Тем не менее, психофизическое и экологическое воздействие на население остаётся некомпенсированным, таким образом, люди, не участвующие в дорожном движении, вынуждены нести затраты, вызванные дорожным движением самостоятельно.

Поскольку в большинстве своём передвижение на работу и с работы приходится на часы пик, то существенное влияние на психофизическое состояние людей, а также на продолжительность отдыха оказывает влияние на продолжительность поездки.

Предложенные подходы позволят проводить укрупнённую оценку затрат участников дорожного движения.

Список использованной литературы:

1. Левашев А.Г., Шаров М.И. Развитие критериев оценки качества обслуживания на городском пассажирском транспорте // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 7. – С. 174–178.

2. Dowling R., Ryus P., Schroeder B., Kyte M., and Creasey T. NCHRP Report 825: Planning and Preliminary Engineering Applications Guide to the HCM. – Transportation Research Board, Washington, D.C., 2016. – 259 p.

3. Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS), Edition 2015, (German Highway Capacity Manual). – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Cologne, 2015. – 640 p.

4. Lemke K. The New German Highway Capacity Manual (HBS 2015) // Transportation Research Procedia. – 2016. – vol. 15. – pp. 26–35.

6. Mazloumi, E. Using GPS data to gain insight into public transport travel time variability / E. Mazloumi, G. Currie, G. Rose // Journal of Transportation Engineering. – 2010. – №136. – p. 623-631.

7. Metropolitan Freeway System 2013 Congestion Report [Электронный ресурс]. – Minnesota Department of Transportation, 2014. – 16p. – URL: <http://dot.sta-te.mn.us/rtmc/reports/congestionreport2013.pdf> (Дата обращения: 10.05.2020 г.).

8. Nam, D. Estimation of value of travel time reliability / D. Nam, D. Park, A. Khamkongkhun // Journal of Advanced Transportation 39:1. – 2005. – pp. 39-61.

9. Nichols, K. Hampton roads regional travel time reliability study / K. Nichols // Presentation for the Transportation Technical Advisory Committee Meeting, Agenda Item, 5 June 2013. – 2013. – № 14. – 18 p.

10. Noland, R.B. Travel time variability: a review of theoretical and empirical issues / R.B. Noland, J.W. Polak // Transport Review. – 2002. – vol. 22– pp. 39-54.

11. Olszewski, P. Traffic capacity of the city center / P. Olszewski, W. Suchorevsky // Traffic Eng. and Contr. – 1987. – vol. 28. – №6. – p. 336 – 343.

12. Schroeder B., Trask L. Freeway analysis & software in the HCM 6th edition. – Kittelson & Associates, 2017. – 60p.

13. Managing urban traffic congestion [Электронный ресурс] // OECD Publications, 2007. – 294 p. – URL: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/07congestion.pdf> (дата обращения: 19.05.2020 г.)

14. Горбунов Р.Н., Михайлов А.Ю., Пиров Ж.Т. Оценка уровня обслуживания на основе критериев надёжности // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 10 – с. 188 - 194.

15. В России запустили проект платформы «Автодата» по сбору автомобильных данных [Электронный ресурс] // Коммерсант. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4110014> (дата обращения: 17.05.2020 г.)

УДК 656.1

Исследование эффективности системы обслуживания автомобилей

В.В. Коваленко, Н.Ф. Булгаков, А.В. Горбанева

ФГАОУ ВО Политехнический институт СФУ, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26А, корпус № 15 (Д)

Рассмотрено функционирование системы технического обслуживания в автотранспортном предприятии. Представлена статистика затрат на поддержание надёжности на примере автобусов МАЗ-103 и количества технических воздействий. Одним из направлений совершенствования системы технического обслуживания является определение параметров надёжности автомобиля. Для оценивания эффективности работы применяемой системы технического обслуживания предлагается определение параметра потока отказов, значение которого можно использовать для определения потребности в запасных частях, количестве технических воздействий.

Ключевые слова: профилактики, техническое обслуживание и ремонт, автомобильный транспорт.

Для обеспечения перевозочного процесса подвижным составом необходимо поддержание уровня их технического состояния. На автотранспортных предприятиях (АТП) созданы и работают организационный механизм, управленческая и экономическая структуры обеспечения системы обслуживания подвижного состава. Для автотранспортных средств (АТС), наиболее часто принята, планово-предупредительная система (ППС) технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) имеющая свои нормативы обслуживания [1]. Основными видами обслуживания являются: плановые работы технического обслуживания

№1 и №2, выполняемые в плановом порядке и рекомендованные заводом изготовителем и виды ремонтов: текущий и капитальный. Плановые вид обслуживания выполняются по регламентированной периодичности, с установленной трудоёмкостью и номенклатурой работ. Обслуживание в форме текущего ремонта приводит к срыву планов по перевозкам грузов и пассажиров так как выполняются между плановыми обслуживаниями в случайный момент времени для поддержания технического состояния АТС. С увеличением возраста парка происходит увеличение количества текущих ремонтов и как итог повышение затрат на обслуживание. Опыт наблюдения за обслуживанием автобусов МАЗ-103 в условиях эксплуатации Сибири представлены на рисунке 1 и 2.

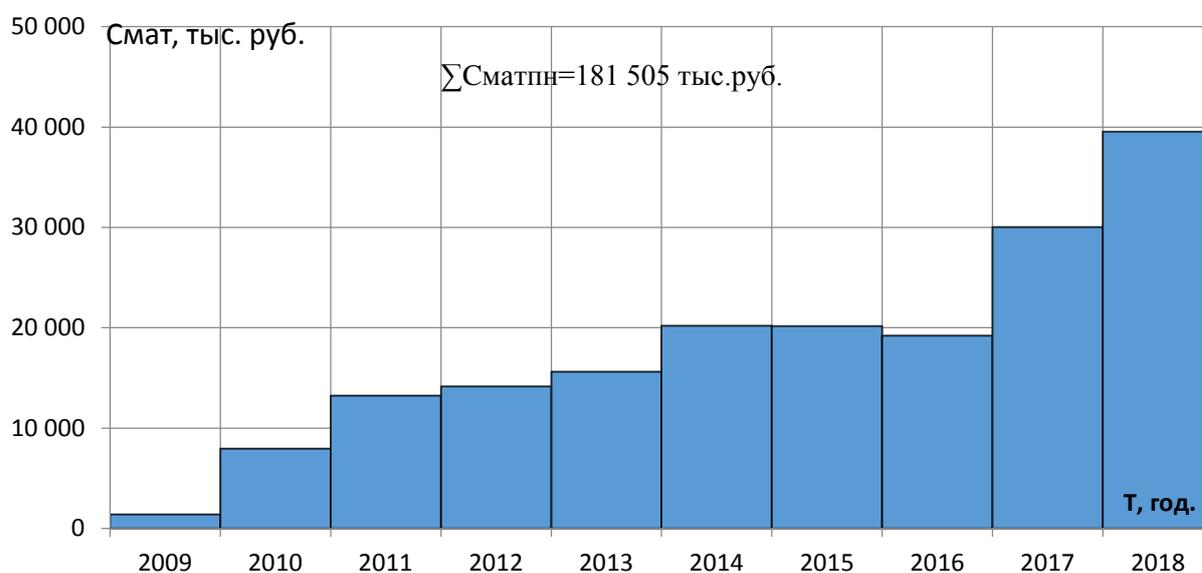


Рис.1. Материальный затраты на обслуживание автобусов МАЗ-103

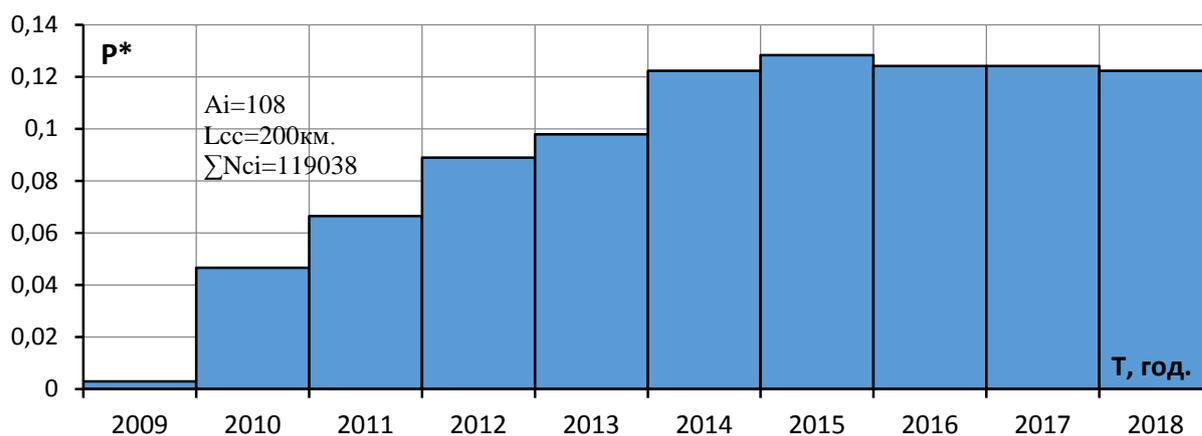


Рис2. Количество технических воздействий (плановых и внезапных) при обслуживании автобусов МАЗ-103

Рост затрат объясняется выполнением работ по капитальному обслуживанию. Количество технических воздействий не возрастает так как работы выполняются более трудоемкие. Одной из причин такой

ситуации является отсутствие знания о закономерностях изменения параметров надежности элементов и систем АТС, применяемые нормативы планового обслуживания не соответствуют современным конструкциям АТС, не учитываются в полной мере изменение условий эксплуатации и система управления ППС на АТП требует своей современной модернизации.

Ученые занимаются исследованиями в области проектирования, изготовления, конструирования и эксплуатации элементов АТС. Предложенные модели исследования уровня надежности элементов АТС, формирование и организация системы ТО и Р АТС представлены в трудах Авдонькина Ф.Н., Высоцкого М.С., Власова В.М., Говорущенко Н.Я., Ефремова В.В., Зарубкина А.В., Зорина В.А., Крамаренко Г.В., Корчагина В.А., Кузнецова Е.С., Кульсеитова Ж.О., Луканина В.Н., Напольского Г.М., Постолига А.В., Резника Л.Г., Тахтамышева Х.М., Шейнина А.М., Труфанова В.М. и других авторов. Эти научные работы составили базу предлагаемых методологических основ контроля и управления техническим состоянием АТС в эксплуатации, отвечающих современным требованиям. В трудах Крамаренко Г.В., Шейнина А.М., Булгакова Н.Ф. и их учениками предложено совершенствование ППС ТО и Р АТС в форме многоступенчатой системы профилактики (МСП) [2]. Данная форма обслуживания формирует систему обслуживания элементов АТС с учетом показателей надежности элементов АТС, тем самым уменьшая потерю выручки при проявлении внезапных отказов АТС и снижая простой.

Одним из вариантов совершенствования системы ТО и Р АТС в АТП является совершенствование информационных технологий АТП для управления системой ТО и Р и формирование МСП. Действующие информационные системы в АТП, в основном, направлены на фиксирование данных. При этом информация о функционировании системы ТО и Р остается на бумажных носителях и в последующем архивируется. Под руководством д-р техн. наук Н.Ф. Булгакова была разработана информационная система «Система профилактики» (ИС СП) функционирующая в системе ТО и Р АТП [3]. Как показывает опыт внедрения ИС некоторые функции дублировали функции производственно-технического отдела (ПТО) АТП, однако впоследствии это оказалось положительным моментом так как ремонтная зона получала обработанную информацию при сбоях в работе ПТО АТП. Одной из возможных функций разработанной ИС СП является формирование данных для определения показателей надежности АТС или её элементов. Значение показателей надежности АТС или её элементов и их изменение нигде не прописан (руководства по эксплуатации или положения) и их значение приходится устанавливать статистическим методом, что усложняет

прогнозирование. Изменение одного из параметров надёжности является показателем функционирования системы ТО и Р это параметр потока отказов.

Параметр потока отказов (средняя частота отказов) определяется как отношение числа отказавших в единицу времени элементов Δn_i к общему числу испытываемых элементов N_0 при условии, что отказавшие элементы заменяются новыми:

$$\omega(L) = \frac{\Delta n_i}{N_0 \Delta L} \quad , \quad (1)$$

где Δn_i - число отказавших в единицу времени элементов; N_0 - общее число испытываемых элементов; ΔL - интервал пробега.

На основе представленной формуле представляется возможным оценить значение параметра потока отказов АТС и установиться его закономерность. На основе данных об эксплуатации автобусов МАЗ-103 из ИС СП были получены данные о количестве отказов и построен график изменения параметра потока отказов (рисунок 3).

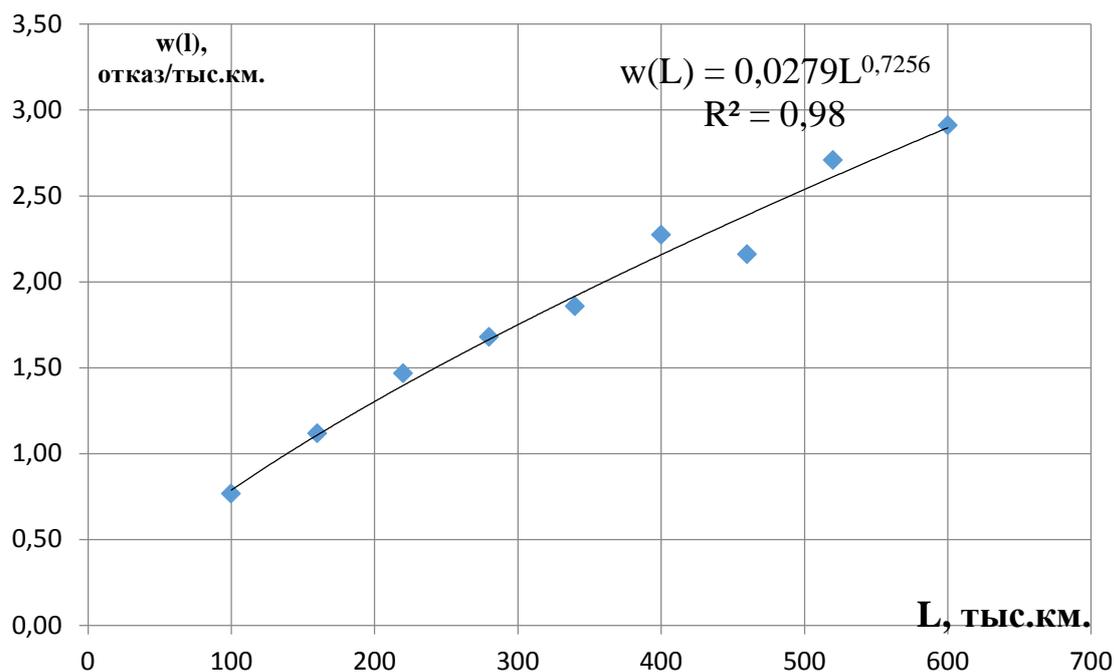


Рис.3. Изменение параметра потока отказов автобусов МАЗ-103

На основе полученных экспериментальных данных была установлена степенная закономерность параметра потока отказов от пробега автобуса МАЗ-103.

$$\omega(L) = 0,0279L^{0,7256} \quad (2)$$

Установленная закономерность параметра потока отказов применяется в дальнейшем для прогнозирования и оценки потребности в запасных частях, трудовых и материальных затратах, определения числа

постов текущего ремонта и т.д. Таким образом, при установившихся значениях параметра потока отказов представляется возможным оценивать эффективность системы профилактики АТС. Например, определение среднего количества постов текущего ремонта при установившемся значении параметра потока отказов можно определить, как:

$$N_{ci} = \omega(L) \cdot \Delta L \cdot A_i \cdot \alpha_i \quad (3)$$

где A_i - списочное количество подвижного состава, ед., α_i - коэффициент технической готовности.

Изучение изменение параметров надежности АТС и его элементов актуальная задача для АТП. Зная значение параметров надежности позволит совершенствовать существующую систему ТО и Р АТС, совершенствовать ППС и разработать МСП АТС в АТП [4].

Список использованной литературы:

1. РД 37.009.026-92 Положение о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автотранспортных средств, принадлежащих гражданам. Утверждено Приказом Департамента автомобильной промышленности Минпрома РФ от 01 ноября 1992 г. №43.

2. Булгаков Н.Ф., Бурхиев Ц.Ц. Управление качеством профилактики АТС. Моделирование и оптимизация. Красноярск: КГТУ, 2002. - 164 с.

3. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2009612900 "Модель проектирования регламента профилактики" авторы: Н.Ф. Булгаков, Л.Н. Сиренко, В.В. Коваленко, зарегистрировано 04 июня 2009 г. – 1 с.

4. N.F. Bulgakov, V.V. Kovalenko, A.V. Gorbaneva and S.N. Shalimov Management of preventive maintenance of vehicles // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering // International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering 27 May to 1 June 2019, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia Volume 632

УДК 62-521

Динамика наведения оптической нагрузки многозвенного манипулятора

Н.Е. Точилкин, А.И. Кимяев, В.В. Шеваль

Рассмотрены уравнения динамики плоского движения многозвенного манипулятора ангулярного типа с целевым оборудованием в виде устройства формирования изображения перемещаемого объекта

наблюдения. Исследованы ограничения на динамику перемещения нагрузки манипулятором с помощью шаговых двигателей. Предложены нелинейные алгоритмы управления слежением за объектом наблюдения с помощью объединения следящих приводов, работающих как один следящий привод многосвязного управления.

Ключевые слова: *роботизированные манипуляторы, нелинейное управление, динамическая точность, видеонаблюдение, объединение следящих приводов*

Во многих областях техники часто возникают задачи сопровождения подвижных объектов полями зрения оптических устройств формирования изображения, расположенных, в свою очередь, на перемещаемых или стационарных носителях. Основными условиями качественной работы систем управления (СУ) комплексов наблюдения (КН), включающих в свой состав и подвижный носитель, являются обеспечение постоянного нахождения объекта наблюдения (ОН) в поле зрения (ПЗ) оптического устройства и четкость получаемого изображения. С точки зрения управления это формирует достаточно жесткие требования к таким показателям качества (ПК) СУ КН, как быстродействие, динамическая точность в квазиустановившихся режимах и плавность обработки ползучих скоростей. Нетривиальность обеспечения указанных ПК подобных СУ заключается в том, что пути обеспечения каждого из них часто являются противоречащими способам обеспечения других ПК.

Пример решения задачи управления подвижным носителем, обеспечивающим направление ПЗ бортового устройства формирования изображения, показан, например, в работе [1], согласно которой для повышения качества управления сигнал рассогласования замкнутой системы сопровождения подвижного ОН формируется автоматически по результатам анализа смежных кадров.

Для получения более информативных ракурсов расположения оптического устройства формирования изображения относительно ОН на подвижных основаниях в качестве механического подвеса используются плоские двухзвенные манипуляторы, как это показано в работе [2], где учтен реактивный момент сил, действующих на основание со стороны манипулятора. При этом предъявляются такие же требования к ПК управления направлением ПЗ, как указанные выше.

Также подобные задачи наблюдения за подвижными объектами решаются в СУ многосвязными манипуляторами, где в качестве рабочего органа используется видеокамера (ВК) [3]. Спектр задач, решаемых такими манипуляторами, широк и может включать работу с радиоактивными веществами в изолированных камерах, обслуживание станков с ЧПУ, проведение высокоточных трехмерных измерений и т.п.

При синтезе СУ КН подобных сложных технических изделий (КН на подвижных и неподвижных носителях) разработчик должен учитывать присущие им особенности:

- сочетание относительных и переносных механических движений;
- многосвязность механической части объекта управления;
- нестационарность параметров объекта управления;
- нелинейный характер зависимостей в объекте управления;
- работа нескольких следящих приводов (СП) на одну нагрузку;
- наличие запаздывания в дискриминаторе сигнала рассогласования, построенного на основе технического анализа получаемых изображений.

На возможность обеспечения требуемых динамических характеристик существенно влияет выбор исполнительных двигателей. Во многих робототехнических задачах находят широкое применение шаговые двигатели (ШД), обладающие заметными достоинствами при решении задач терминального управления при отсутствии дополнительных требований к траектории перемещения. Эти достоинства, в первую очередь, связаны с отсутствием необходимости использования обратной связи (ОС) в условиях задания координат лишь начальной и конечной точек размещения полезной нагрузки робота. Однако при работе ШД на нагрузку может происходить потеря синхронности заданных и реальных шагов [4], что недопустимо в СУ КН, где важными ПК являются динамическая точность и быстродействие, и, следовательно, приводит к необходимости введения ОС по выходным координатам локальных СП. Известными методами управления ШД по замкнутому контуру являются верификация шагов, а также регистрация противо-ЭДС, возникающей в обмотках возбуждения [5]. Недостатками метода верификации шагов является отсутствие возможности контроля скорости вала, а также невозможность компенсации статической ошибки, возникающей в результате действия внешних активных сил и моментов. Последний недостаток относится и к методу регистрации противо-ЭДС.

В данной работе исследован один из новых вариантов построения регулятора для задач траекторного слежения, обеспечивающего следующие требования:

- высокое быстродействие (критичность изделия, на котором используется КН, даже к минимальным потерям изображения);
- низкие значения ошибок слежения за элементами ОН, имеющими достаточно мелкую структуру даже в процессе смены ракурса (критичность изделия, на котором используется КН, даже к минимальным снижениям качества изображения).

Динамические уравнения движения манипулятора.

Рассмотрим механическую подсистему КН на базе манипулятора с пятью степенями свободы (далее – объект управления (ОУ)), рабочим органом которого является ВК, оптическая ось которой должна быть

непрерывно направлена на ОН. Физическая модель механической подсистемы приведена на рисунке 1, где введены следующие обозначения: $Pr_j, j = 0,1,2,3,4$ – управляющие электроприводы; $o_a x_a y_a z_a$ – неподвижная (именуемая далее абсолютной) система координат (СК); $o_0 x_0 y_0 z_0$ – относительная подвижная СК, связанная с приводом Pr_0 . Начала СК $o_a x_a y_a z_a$ и $o_0 x_0 y_0 z_0$ совпадают с ОН, а их вертикальные оси – с осью вращения привода Pr_0 и местной вертикалью. Плоскость $o_0 x_0 y_0$ совпадает с плоскостью, в которой происходит вертикальное движение звеньев ОУ. Пунктирными контурами обозначены полезные нагрузки, перемещаемые соответствующими электроприводами: контур III – нагрузка, перемещаемая приводом Pr_3 , II – приводом Pr_2 , I – приводом Pr_1 ; нагрузкой привода Pr_0 является вся подвижная часть манипулятора, которая на рисунке условно обозначена прямоугольным контуром.

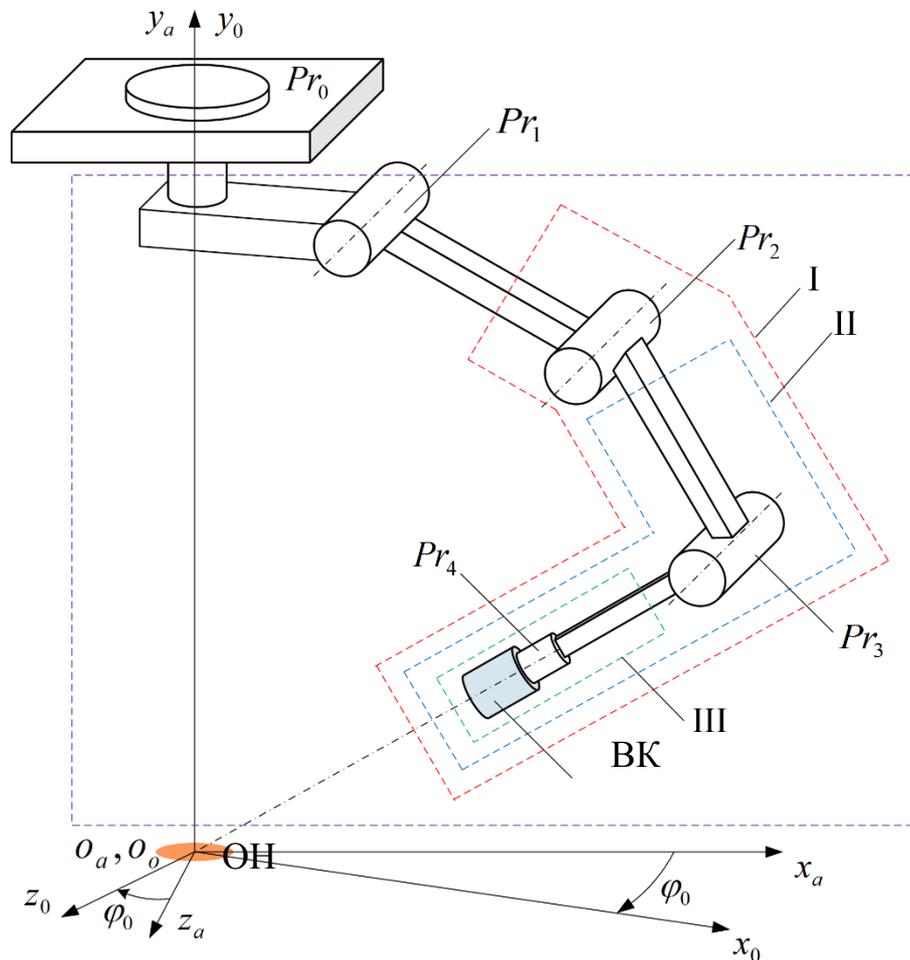


Рис. 3. Физическая модель механической подсистемы

Как указывалось выше, в процессе непрерывного наблюдения особенно важна точность воспроизведения задаваемого извне постоянно меняющегося пространственного положения и ориентации ВК. Поскольку на динамическую точность в задачах прецизионного слежения существенное влияние оказывают перекрестные связи, возникающие в

результате совместной работы локальных СП [6], целесообразно проанализировать это влияние и при необходимости разработать алгоритмы коррекции работы приводов. Важным исследованием в иерархии проектных задач является рассмотрение движения ОУ в вертикальной плоскости $o_0x_0y_0$. В дальнейшем СУ движением ОУ в плоскости $o_0x_0y_0$ будем называть подсистемой СУ КН (ПСУ КН)

Физическая модель ОУ в плоскости показана на рисунке 2, где введены следующие обозначения: $o_i x_i y_i, i = 1, 2, 3$ – относительные подвижные СК, связанные с соответствующими электроприводами Pr_i ; φ_i – относительные углы поворота звеньев манипулятора; φ_i^a – абсолютные углы поворота звеньев манипулятора; φ_d – угловой ракурс оптической оси ВК; R_d – наклонная дальность от ВК до ОН.

Для получения динамических уравнений движения ОУ в плоскости воспользуемся уравнениями Лагранжа 2-го рода [7], приняв в качестве обобщенных координат относительные углы поворота звеньев, а также относительные угловые скорости.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial(T_\Sigma - U_\Sigma)}{\partial \dot{q}_i} \right) = \frac{\partial(T_\Sigma - U_\Sigma)}{\partial q_i}, \quad (1)$$

где T_Σ – кинетическая энергия ОУ, U_Σ – силовая функция, $q_i = \varphi_i$ – относительные углы поворота звеньев, $\dot{q}_i = \dot{\varphi}_i = \omega_i$ – относительные угловые скорости звеньев манипулятора.

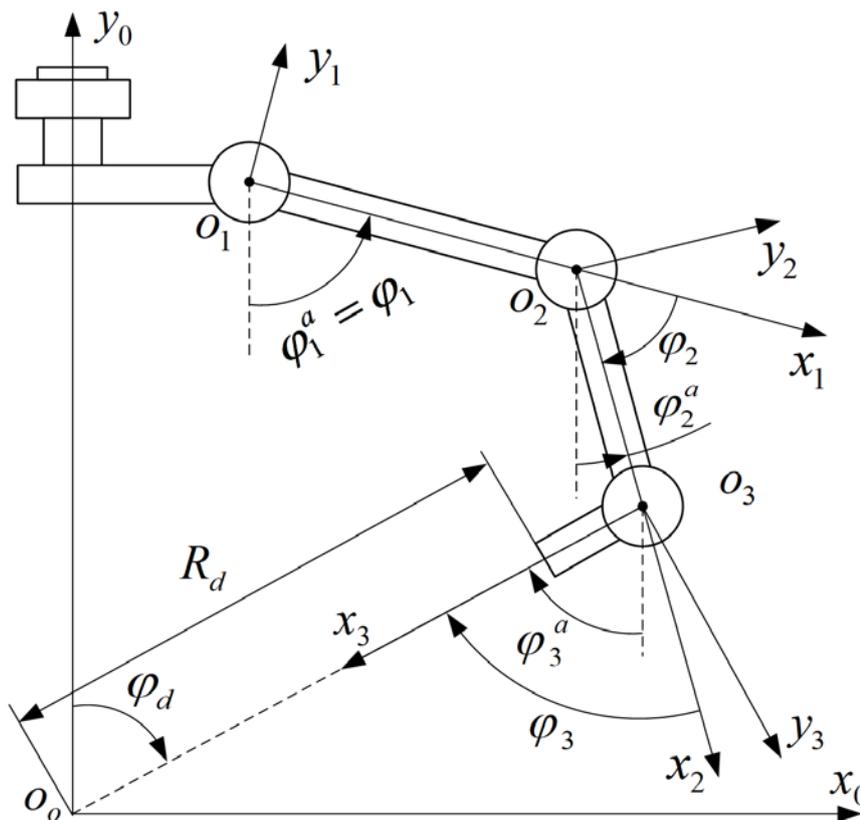


Рис.4. Физическая модель механического подвеса ОУ в плоскости

Кинетическая энергия.

Кинетическая энергия ОУ определяется как сумма кинетических энергий полезных нагрузок соответствующих приводов.

$$T_{\Sigma} = T_{\Sigma 1} + T_{\Sigma 2} + T_{\Sigma 3}, \quad (2)$$

где $T_{\Sigma 1}$ – кинетическая энергия нагрузки привода Pr_1 , $T_{\Sigma 2}$ – нагрузки привода Pr_2 , $T_{\Sigma 3}$ – нагрузки привода Pr_3 .

Кинетическая энергия $T_{\Sigma 1}$ определяется вращательным движением нагрузки привода Pr_1 вокруг оси o_1 .

$$T_{\Sigma 1} = \frac{1}{2} \bar{\Omega}_1^T J_{\Sigma 1} \bar{\Omega}_1, \quad (3)$$

где $\bar{\Omega}_1 = \bar{\omega}_1$ – вектор абсолютной угловой скорости нагрузки, $J_{\Sigma 1} = f(\varphi_2, \varphi_3)$ – момент инерции нагрузки относительно оси o_1 .

Нагрузка, перемещаемая приводом Pr_2 , участвует в сложном движении, поэтому для нахождения кинетической энергии необходимо учитывать ее переносную и относительную скорости, векторы которых показаны на рисунке 3 а, где введены следующие обозначения: $\text{ЦМ}_{\Sigma k}$, $k = 2, 3$ – центр масс полезной нагрузки привода Pr_k ; $\bar{R}_{\text{ЦМ}_{\Sigma k}}$ – вектор, соединяющий ось вращения привода Pr_k и $\text{ЦМ}_{\Sigma k}$; \bar{V}_{o_k} – линейная скорость перемещения СК $o_k x_k y_k$; $\bar{V}_{\text{ЦМ}_{\Sigma k}}^{\text{отн}}$ – линейная скорость перемещения $\text{ЦМ}_{\Sigma k}$ относительно СК $o_k x_k y_k$; $\bar{\Omega}_k$ – абсолютная угловая скорость перемещения СК $o_k x_k y_k$.

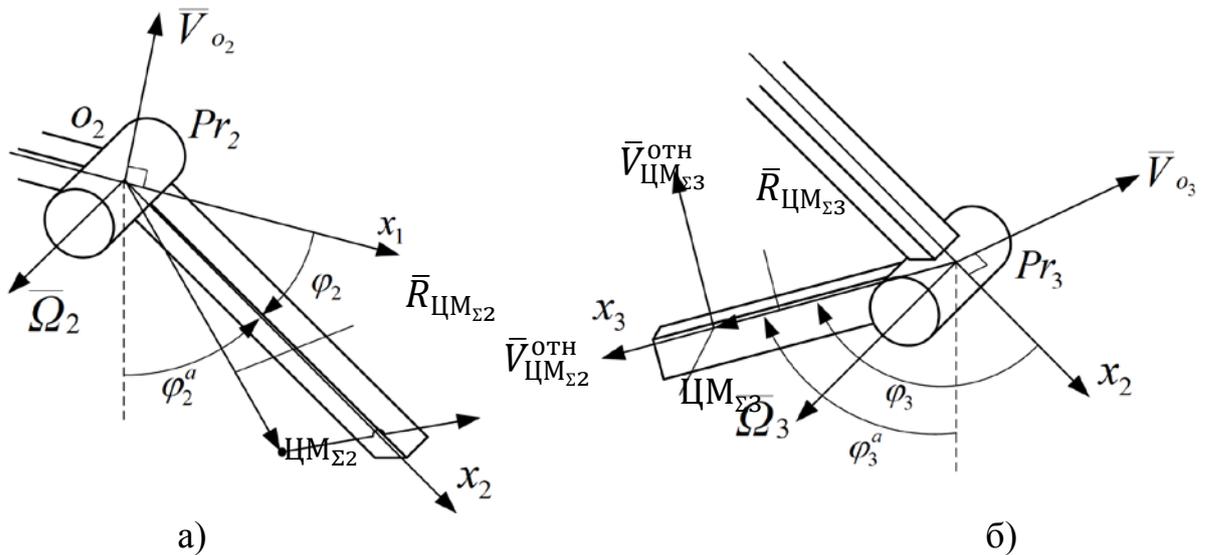


Рисунок 5 – Схемы расположения векторов скорости

Кинетическая энергия нагрузки привода Pr_2 имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
T_{\Sigma 2} &= \frac{1}{2} m_{\Sigma 2} |\bar{V}_{o_2} + \bar{V}_{\text{ЦМ}_{\Sigma 2}}^{\text{отн}}|^2 \\
&= \frac{1}{2} \bar{V}_{o_2}^T m_{\Sigma 2} \bar{V}_{o_2} + m_{\Sigma 2} (\bar{V}_{o_2} \cdot \bar{V}_{\text{ЦМ}_{\Sigma 2}}^{\text{отн}}) + \frac{1}{2} \bar{\Omega}_2^T J_{\Sigma 2} \bar{\Omega}_2,
\end{aligned} \tag{4}$$

где $m_{\Sigma 2}$ – масса нагрузки, $\bar{\Omega}_2 = \bar{\omega}_1 + \bar{\omega}_2$ – абсолютная угловая скорость перемещения СК $o_2 x_2 y_2$, $J_{\Sigma 2} = f(\varphi_3)$ – момент инерции нагрузки относительно оси o_2 .

Аналогичным образом определяется кинетическая энергия нагрузки привода Pr_3 , также участвующей в сложном движении (рисунок 3 б).

$$\begin{aligned}
T_{\Sigma 3} &= \frac{1}{2} m_{\Sigma 3} |\bar{V}_{o_3} + \bar{V}_{\text{ЦМ}_{\Sigma 3}}^{\text{отн}}|^2 \\
&= \frac{1}{2} \bar{V}_{o_3}^T m_{\Sigma 3} \bar{V}_{o_3} + m_{\Sigma 3} (\bar{V}_{o_3} \cdot \bar{V}_{\text{ЦМ}_{\Sigma 3}}^{\text{отн}}) + \frac{1}{2} \bar{\Omega}_3^T J_{\Sigma 3} \bar{\Omega}_3,
\end{aligned} \tag{5}$$

где $m_{\Sigma 3}$ – масса нагрузки, $\bar{\Omega}_3 = \bar{\omega}_1 + \bar{\omega}_2 + \bar{\omega}_3$ – абсолютная угловая скорость перемещения СК $o_3 x_3 y_3$, $J_{\Sigma 3} = const$ – момент инерции нагрузки относительно оси o_3 .

Силовая функция.

Силовая функция ОУ определяется как сумма элементарных работ активных моментов сил по перемещению соответствующих полезных нагрузок.

$$U_{\Sigma} = \int dA_{\Sigma} = \int dA_{\Sigma 1} + \int dA_{\Sigma 2} + \int dA_{\Sigma 3}, \tag{6}$$

где $dA_{\Sigma i}$ – элементарная работа по перемещению полезной нагрузки привода Pr_i .

Среди активных моментов, действующих на ОУ, выделим моменты, развиваемые электроприводами ПСУ КН, а также моменты, создаваемые силами тяжести, действующими на полезные нагрузки приводов. Схема действия сил и моментов показана на рисунке 4, где введены следующие обозначения: $\bar{G}_{\Sigma i}$ – вектор силы тяжести, действующий в точке ЦМ $_{\Sigma i}$, M_i – вращательный момент, развиваемый приводом Pr_i .

Соотношения для работ активных моментов имеют следующий вид:

$$dA_{\Sigma 1} = ((\bar{M}_1 + \bar{M}_{G_{\Sigma 1}}) \cdot d\bar{\varphi}_1) = ((\bar{M}_1 + [\bar{G}_{\Sigma 1} \times \bar{R}_{\text{ЦМ}_{\Sigma 1}}]) \cdot d\bar{\varphi}_1) \tag{7}$$

$$dA_{\Sigma 2} = ((\bar{M}_2 + \bar{M}_{G_{\Sigma 2}}) \cdot d\bar{\varphi}_2) = ((\bar{M}_2 + [\bar{G}_{\Sigma 2} \times \bar{R}_{\text{ЦМ}_{\Sigma 2}}]) \cdot d\bar{\varphi}_2) \tag{8}$$

$$dA_{\Sigma 3} = ((\bar{M}_3 + \bar{M}_{G_{\Sigma 3}}) \cdot d\bar{\varphi}_3) = ((\bar{M}_3 + [\bar{G}_{\Sigma 3} \times \bar{R}_{\text{ЦМ}_{\Sigma 3}}]) \cdot d\bar{\varphi}_3) \tag{9}$$

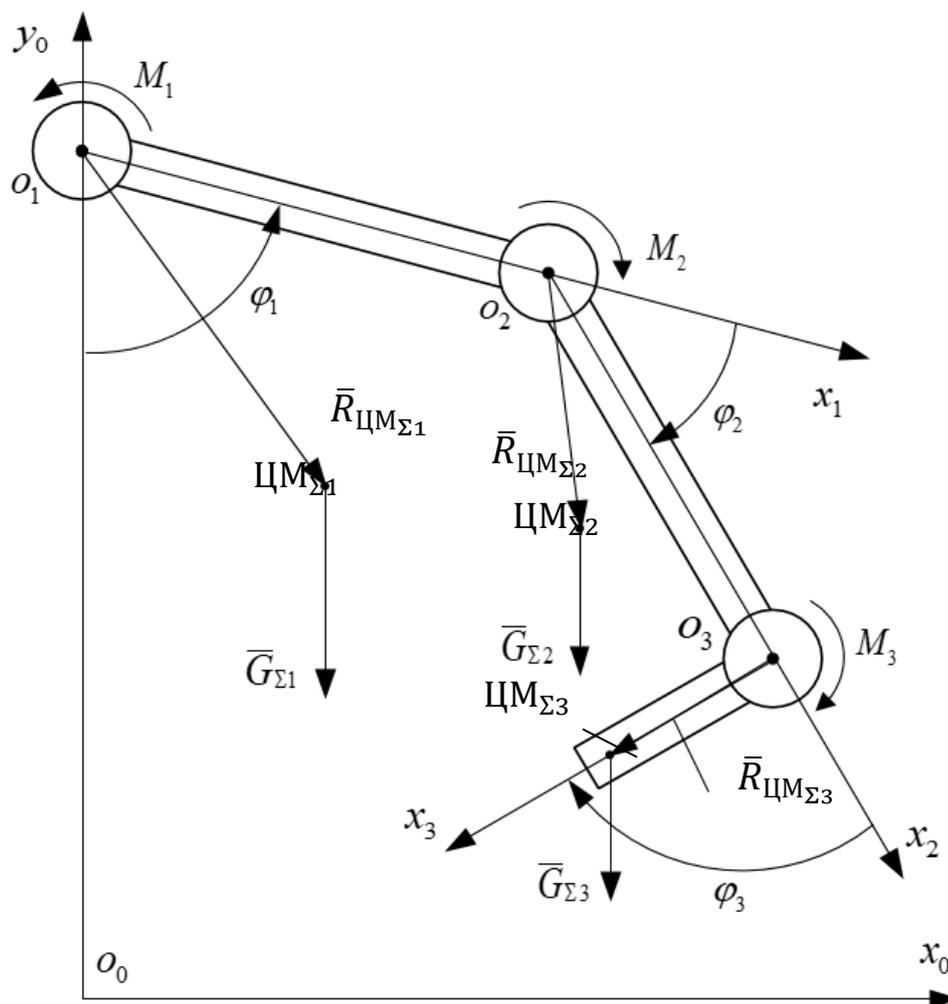


Рис.6. Схема действия сил в подсистеме

Составление и решение уравнений Лагранжа 2-го рода.

В процессе исследования в среде компьютерной математики *Wolfram Mathematica* был разработан скрипт-файл для расчета координат центров масс полезных нагрузок приводов ПСУ КН, моментов инерций нагрузок, кинетических энергий и силовых функций согласно выражениям (2) – (9). Также данный скрипт-файл осуществляет расчет функции Лагранжа, ее дифференцирование по обобщенным координатам и скоростям и формирование уравнений Лагранжа 2-го рода для приводов Pr_1 , Pr_2 и Pr_3 манипулятора. Решение этих уравнений относительно угловых ускорений приводов $\varepsilon_i = \ddot{\varphi}_i$ далее будем называть динамическими уравнениями движения ОУ.

Поскольку ОУ имеет три степени свободы, были определены три уравнения динамики для каждой из них. Динамическое уравнение по первой степени свободы, полученное с помощью упомянутого скрипт-файла, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_1 = & M_1 + g\text{Sin}[\phi_1]m_1R_{c1} - (J_{\Sigma 2} + J_{\Sigma 3})\varepsilon_2 - J_{\Sigma 3}\varepsilon_3 + \\
& + m_2(g\text{Sin}[\phi_1]R_1 + 2g\text{Sin}[\phi_1 + \phi_2]R_{c2} + \\
& + R_{o2}(R_{\text{цм}\Sigma 2}(-\text{Cos}[\phi_1]\varepsilon_2 + \text{Sin}[\phi_1]\omega_1^2) - \\
& - \text{Cos}[\phi_1](2\omega_1 + \omega_2)\dot{R}_{\text{цм}\Sigma 2})) + \\
& + m_3(g\text{Sin}[\phi_1]R_1 + 2g\text{Sin}[\phi_1 + \phi_2]R_2 + \\
& + 3g\text{Sin}[\phi_1 + \phi_2 + \phi_3]R_{c3} - \text{Cos}[\phi_1]R_{\text{цм}\Sigma 2}R_{o2}\varepsilon_2 - \\
& - R_{o3}(R_{o3}\varepsilon_2 + \text{Cos}[\phi_1 + \phi_3]R_{\text{цм}\Sigma 3}(2\varepsilon_2 + \varepsilon_3)) + \\
& + \text{Sin}[\phi_1]R_{\text{цм}\Sigma 2}R_{o2}\omega_1^2 + \text{Sin}[\phi_1 + \phi_3]R_{\text{цм}\Sigma 3}R_{o3}\omega_1^2 - \\
& - \text{Sin}[\phi_1 + \phi_3]R_{\text{цм}\Sigma 3}R_{o3}\omega_2^2 + 2\text{Sin}[\phi_1 + \phi_3]R_{\text{цм}\Sigma 3}R_{o3}\omega_1\omega_3 + \\
& + \text{Sin}[\phi_1 + \phi_3]R_{\text{цм}\Sigma 3}R_{o3}\omega_2\omega_3 + \text{Sin}[\phi_1 + \phi_3]R_{\text{цм}\Sigma 3}R_{o3}\omega_3^2 - \\
& - 2\text{Cos}[\phi_1]R_{o2}\omega_1\dot{R}_{\text{цм}\Sigma 2}(\omega_1 + \omega_2) - (2R_{o3}(\omega_1 + \omega_2) + \\
& + \text{Cos}[\phi_1 + \phi_3]R_{\text{цм}\Sigma 3}(2(\omega_1 + \omega_2) + \omega_3))\dot{R}_{o3})/ \\
& / (J_{\Sigma 1} + J_{\Sigma 2} + J_{\Sigma 3} + \\
& + (m_2 + m_3)R_{o2}(2\text{Cos}[\phi_1]R_{\text{цм}\Sigma 2} + R_{o2}) + \\
& + 2\text{Cos}[\phi_1 + \phi_3]m_3R_{\text{цм}\Sigma 3}R_{o3} + m_3R_{o3}^2),
\end{aligned} \tag{10}$$

где g – ускорение свободного падения; m_i – масса i -го звена; R_{ci} – расстояние от оси o_i до центра масс i -го звена; R_i – длина i -го звена; R_{oi} – расстояние от оси o_1 до оси o_i .

Динамическое уравнение движения по второй степени свободы имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_2 = & (M_2 - (J_{\Sigma 2} + J_{\Sigma 3})\varepsilon_1 - J_{\Sigma 3}\varepsilon_3 + m_2(2g\text{Sin}[\phi_1 + \phi_2]R_{c2} + \\
& + R_{o2}(\text{Sin}[\phi_1]R_{\text{цм}\Sigma 2}\omega_1^2 - \\
& - \text{Cos}[\phi_1](R_{\text{цм}\Sigma 2}\varepsilon_1 + \omega_1\dot{R}_{\text{цм}\Sigma 2}))) + \\
& + m_3(g(2\text{Sin}[\phi_1 + \phi_2]R_2 + 3\text{Sin}[\phi_1 + \phi_2 + \phi_3]R_{c3}) + \\
& + R_{\text{цм}\Sigma 2}R_{o2}(-\text{Cos}[\phi_1]\varepsilon_1 + \text{Sin}[\phi_1]\omega_1^2) - \\
& - \text{Cos}[\phi_1]R_{o2}\omega_1\dot{R}_{\text{цм}\Sigma 2} + \\
& + R_{o3}\left(-R_{o3}\varepsilon_1 + (\omega_1 + \omega_2)\left(\frac{dR_{o3}}{d\phi_2}(\omega_1 + \omega_2) - 2\dot{R}_{o3}\right)\right) + \\
& + R_{\text{цм}\Sigma 3}(R_{o3}(-\text{Cos}[\phi_1 + \phi_3](2\varepsilon_1 + \varepsilon_3) + \\
& + \text{Sin}[\phi_1 + \phi_3](\omega_1 + \omega_3)(2(\omega_1 + \omega_2) + \omega_3)) + \\
& + \text{Cos}[\phi_1 + \phi_3]\left(\frac{dR_{o3}}{d\phi_2}(\omega_1 + \omega_2)(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3) - \right. \\
& \left. - (2(\omega_1 + \omega_2) + \omega_3)\dot{R}_{o3}\right)))/ \\
& / (J_{\Sigma 2} + J_{\Sigma 3} + m_3R_{o3}(2\text{Cos}[\phi_1 + \phi_3]R_{\text{цм}\Sigma 3} + R_{o3})),
\end{aligned} \tag{11}$$

где

$$\frac{dR_{o3}}{d\phi_2} = - \frac{R_1 R_2 \sin[\phi_2]}{\sqrt{R_1^2 + R_2^2 + 2R_1 R_2 \cos[\phi_2]}} \quad (12)$$

Динамическое уравнение движения по третьей степени свободы имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_3 = & \frac{1}{J_{\Sigma 3}} (M_3 - J_{\Sigma 3}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + \\ & + \frac{dR_{\text{цм}\Sigma 2}}{d\phi_3} \cos[\phi_1] m_2 R_{o2} \omega_1 (\omega_1 + \omega_2) + \\ & + m_3 (3g \sin[\phi_1 + \phi_2 + \phi_3] R_{c3} + \\ & + \frac{dR_{\text{цм}\Sigma 2}}{d\phi_3} \cos[\phi_1] R_{o2} \omega_1 (\omega_1 + \omega_2) + \\ & + R_{\text{цм}\Sigma 3} (-R_{o3} (\cos[\phi_1 + \phi_3] (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + \\ & + \sin[\phi_1 + \phi_3] \omega_2 (\omega_1 + \omega_2)) - \\ & - \cos[\phi_1 + \phi_3] (\omega_1 + \omega_2) \dot{R}_{o3})), \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$\frac{dR_{\text{цм}\Sigma 2}}{d\phi_3} = \frac{-\sin[\phi_3] m_3 (m_3 R_2 + m_2 R_{c2}) R_{c3}}{(m_2 + m_3)^2 R_{\text{цм}\Sigma 2}} \quad (14)$$

Примечания:

1 В выражениях (10) – (14) обозначения греческих букв соответствуют принятым в *Wolfram Language* ($\varphi_i = \phi_i$);

2 В выражениях (10) – (14) для всех векторов верно соотношение $|\bar{R}| = R$.

Построение имитационной модели.

В процессе исследования рассматривался вариант построения КН с манипулятором, в состав которого входят электроприводы на базе биполярных ШД, замыкаемые по абсолютным углам поворота с помощью датчиков наклона. В плоской задаче положение ВК однозначно описывается ее дальностью до ОН R_d и угловым ракурсом ее оптической оси φ_d , причем $\varphi_d = \varphi_3^a$ (см. рисунок 2). Требуемые координаты ВК должны быть преобразованы в командные значения абсолютных углов φ_1^k , φ_2^k и φ_3^k для трех замыкаемых приводов согласно кинематической схеме ОУ путем решения обратной кинематической задачи (ОКЗ). Приняв $R_d = const$, можно исследовать динамику движения ОУ в объединении СП (ОСП) при вынужденном движении. Обобщенную структуру ПСУ КН можно изобразить в виде, показанном на рисунке 5, где введены следующие обозначения: ШП_{*i*} – шаговые приводы; θ_i – угловые рассогласования (ошибки) СП; θ_n – ошибка наведения. Блоки f_i представляют собой динамические уравнения, полученные в выражениях (10), (11) и (13). В блоке «задатчик» осуществляется решение ОКЗ,

алгоритм которого описан в [8].

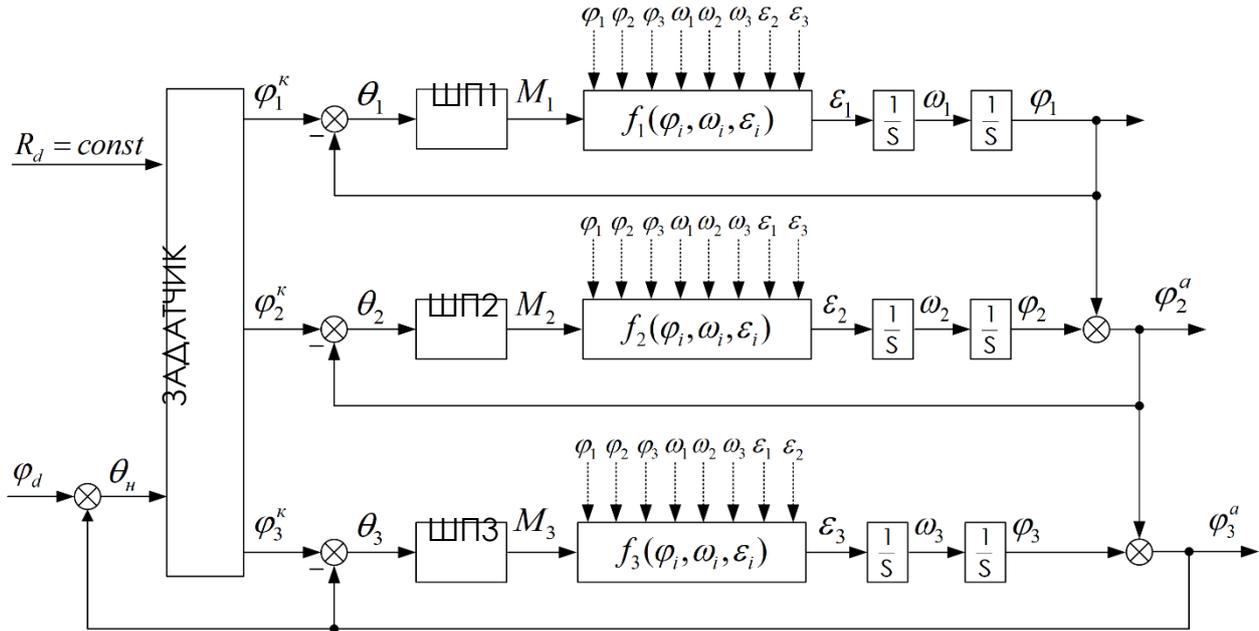


Рис. 7. Структура ПСУ КН

Для составления имитационной модели привода на базе биполярного ШД была использована математическая модель ШД, представляющая собой систему нелинейных уравнений, описанную в [9]. На практике функционирование ШД осуществляется с помощью драйвера, формирующего управляющее напряжение для обмоток возбуждения двигателя. Для имитации формирования управляющих напряжений в соответствии с [10] была разработана математическая модель драйвера, поддерживающего микрошаговый режим работы, описываемая следующими выражениями:

$$U_A = A \sin \left[\frac{2\pi(n + D)}{4D} \right] \quad (15)$$

$$U_B = A \sin \left[\frac{2\pi n}{4D} \right], \quad (16)$$

где U_A, U_B – управляющие напряжения обмоток A и B двигателя; A – амплитуда управляющего напряжения; D – величина делителя шага; n – значение управляющего целочисленного счетчика шагов, соответствующее текущим значениям напряжений:

$$n_{i+1} = n_i + 1 \quad (17)$$

Частота переключения счетчика определяет частоту управляющих напряжений, т.е. частоту шагов ротора ШД, что соответствует скорости его вращения. Таким образом, в состав ШП входит ШД, драйвер и управляющий счетчик.

Принцип построения системы, замкнутой по положению, основан на уменьшении сигнала рассогласования до нулевого значения в случае ее

устойчивости. Рационально использовать рассогласование, которое содержит информацию как о позиционной координате, так и о скорости ее изменения, в виде входного сигнала счетчика в рассматриваемой системе. В ШП при уменьшении рассогласования до нулевого значения напряжения, формируемые драйвером, должны «зафиксироваться» на последних принятых значениях. Это означает, что и счетчик в данном положении должен зафиксироваться на каком-то последнем значении. Таким образом, при уменьшении сигнала рассогласования до нуля, счетчик считает до некоторого максимального значения, пропорционального командному углу φ^k (или максимальному рассогласованию). Ввиду вышесказанного рационально формировать управляющий счетчик согласно следующему выражению:

$$n = \left\lfloor K \int \theta dt \right\rfloor, \quad (18)$$

где K [Гц/В] – коэффициент пропорциональности между угловым рассогласованием, выраженным в электрическом напряжении, и частотой счетчика, именуемый далее коэффициентом усиления (КУ).

Согласно структуре, показанной на рисунке 5, приведенным данным и выражениям, была составлена имитационная модель ПСУ КН в среде *MATLAB Simulink*, блок-схема которой приведена на рисунке 6.

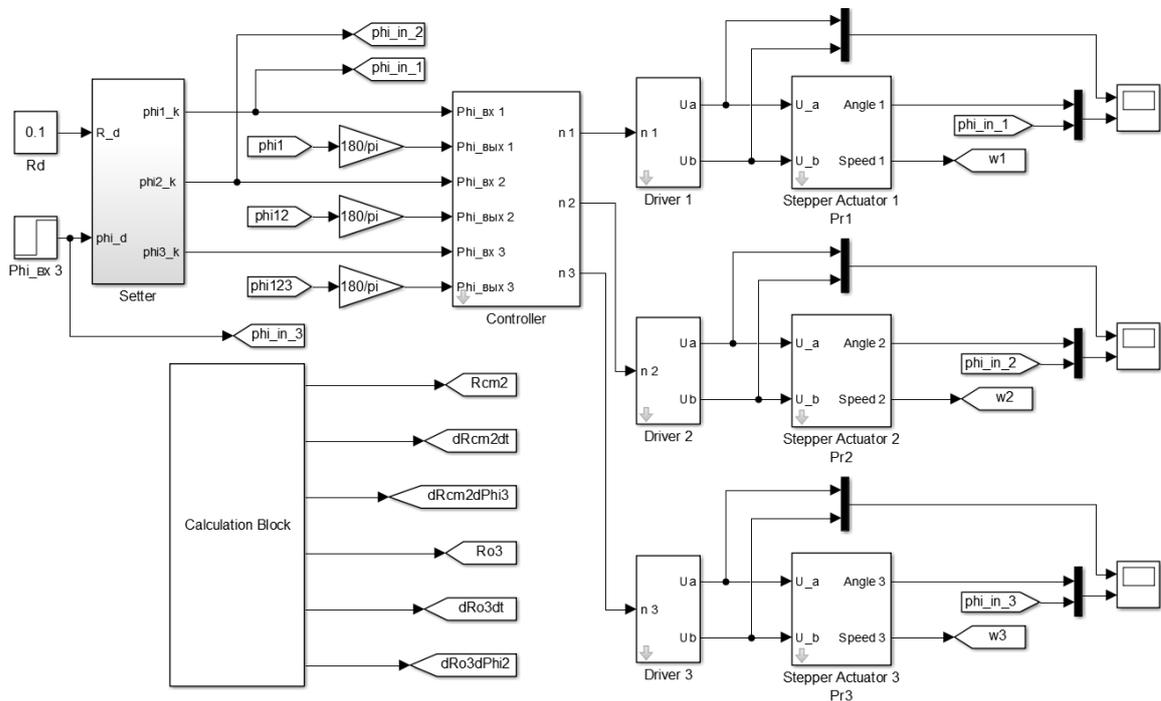


Рис.8. Имитационная модель ПСУ КН в среде *MATLAB Simulink*

Блок *Setter* осуществляет решение ОКЗ согласно [8]; блок *Controller* формирует три управляющих счетчика согласно выражению (18); блоки *Driver* согласно (15) – (16) формируют значения управляющих напряжений для ШП, описанных блоками *Stepper Actuator*; в *Calculation Block* осуществляется расчет параметров динамических уравнений.

Динамические уравнения (10) – (14) учтены в блоках *Stepper Actuator* согласно структуре ПСУ КН (рисунок 5).

В качестве массогабаритных параметров ОУ были приняты характеристики манипулятора американского производства AR2 [11], снабженного следующими исполнительными двигателями [12]:

- Pr_1 – NEMA 23HS22 – 2804SS – HG50 (*Stepper Actuator 1*);
- Pr_2 – NEMA 17HS15 – 1684S – HG50 (*Stepper Actuator 2*);
- Pr_3 – NEMA 17LS19 – 1684E – 200G (*Stepper Actuator 3*).

В процессе моделирования было принято, что значение дальности ВК до ОН составляет $R_d = 0,1$ м.

КУ K_i , значения которых определяются разработчиком, по сути, определяют добротность каждого локального СП и могут быть подобраны таким образом, чтобы подсистема обладала требуемыми ПК. Одной из задач имитационного моделирования было исследование влияния КУ на переходный процесс ПСУ КН.

Результаты моделирования при отработке ПСУ КН скачкообразного входного воздействия с амплитудой $\varphi_d = 5^\circ$ при различных наборах значений КУ приведены на рисунке 7.

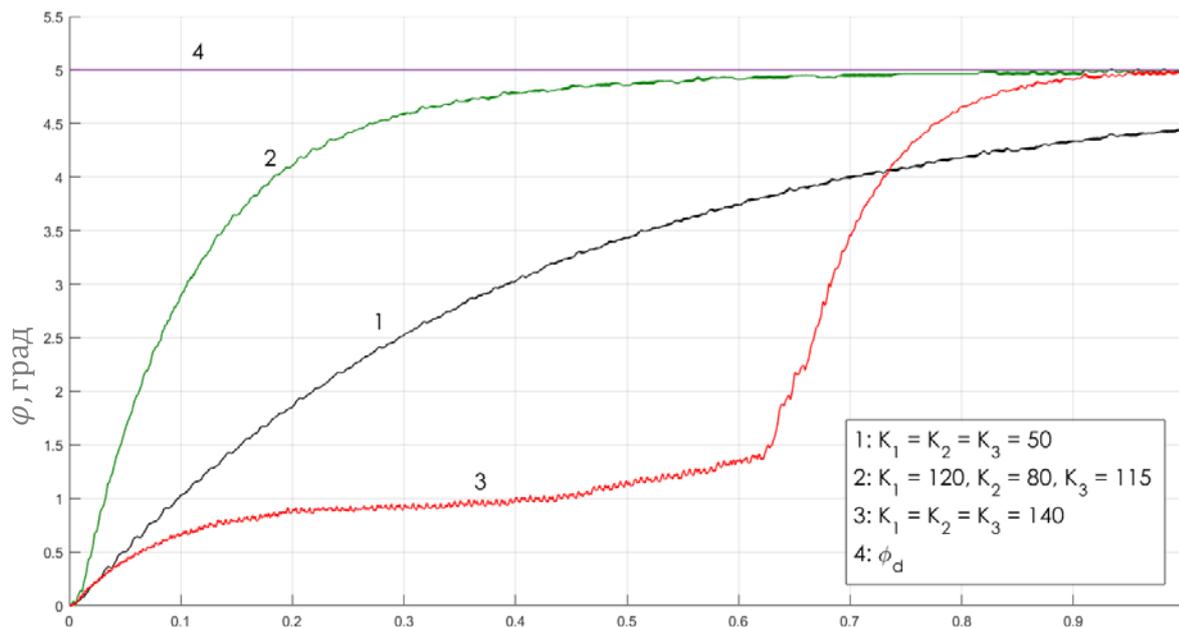


Рис.9. Отработка ПСУ КН скачкообразного входного воздействия

Как можно видеть из полученных эпюр, при повышении КУ быстродействие ПСУ КН возрастает. Слишком сильное увеличение коэффициента может приводить к явлению самоторможения двигателей, что видно из переходного процесса при коэффициентах усиления, равных 140 Гц/В. Данное явление проявляется в тех случаях, когда частота переключения управляющих напряжений превышает скоростные возможности двигателя, обусловленные его инерционной нагрузкой [4].

Экспериментальным путем были найдены рациональные (с точки зрения максимального быстродействия без вхождения в зону потери синхронизма) значения КУ:

$$\begin{cases} K_1 = 120 \text{ Гц/В} \\ K_2 = 80 \text{ Гц/В} \\ K_3 = 115 \text{ Гц/В} \end{cases} \quad (19)$$

Для исследования динамической точности вынужденного движения ПСУ КН был рассмотрен процесс обработки входного сигнала, меняющего свое значение в диапазоне $\varphi_d = 5 \dots 10^\circ$, т.е. величина начального рассогласования составляет 5° . В таком случае исследуется поведение динамической точности как композиции из таких ПК, как быстродействие и динамическая точность в квазиустановившихся режимах. Результаты моделирования приведены на рисунке 8.

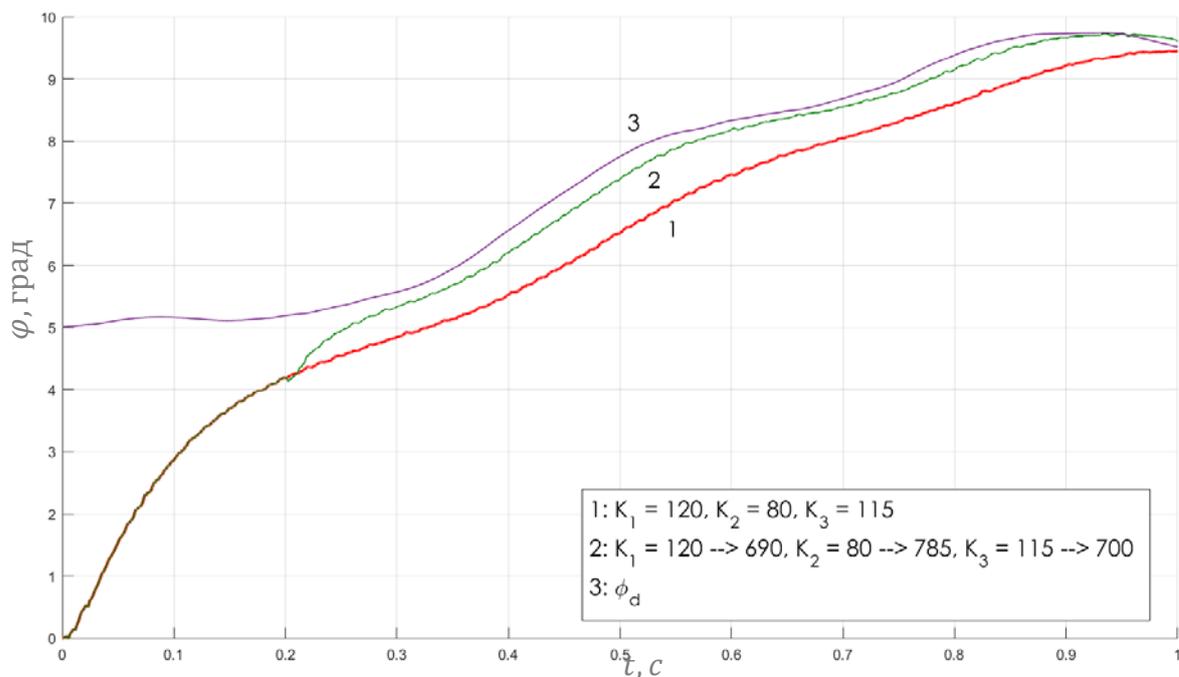


Рис.10. Обработка ПСУ КН переменного входного воздействия

При принятых ранее рациональных значениях КУ ПСУ КН быстродействие ограничивается требованием непопадания в зону потери синхронизма, но после того сигнал рассогласования, а соответственно, и скорость изменения его становятся меньше определенного порога (примерно на 0,2 сек). Появляется возможность релейным образом поменять значения КУ на более высокие, повысив в данной зоне сигнала рассогласования быстродействие и динамическую точность в квазиустановившемся режиме. Переходя к переменной структуре ПСУ КН [13], будем рассматривать обработку входных сигналов при условии, согласно которому в области больших отклонений ($|\theta_H| \geq 1^\circ$) значения КУ соответствуют принятым в выражении (19), а в области малых

отклонений ($|\theta_n| < 1^\circ$, т.е. примерно после 0,2 сек) – повышенным значениям, которые также были определены экспериментально:

$$\begin{cases} K_1 = 690 \text{ Гц/В} \\ K_2 = 785 \text{ Гц/В} \\ K_3 = 700 \text{ Гц/В} \end{cases} \quad (20)$$

Результаты моделирования работы ПСУ КН в режиме переключения КУ приведены в виде эпюры 2 на рисунке 8.

На рисунке 9 приведены эпюры ошибок наведения ПСУ КН, определяемых как разность между входным и выходным сигналами:

$$\theta_n = \varphi_d - \varphi_3^a \quad (21)$$

Для количественной оценки динамической точности ПСУ КН была использована интегральная оценка динамической ошибки θ_n , определяемой как площадь под ее эпюрой:

$$\bar{\Delta}_\theta = \int_0^T |\theta_n| dt \quad (22)$$

Эпюры интегральных оценок динамических ошибок приведены на рисунке 10.

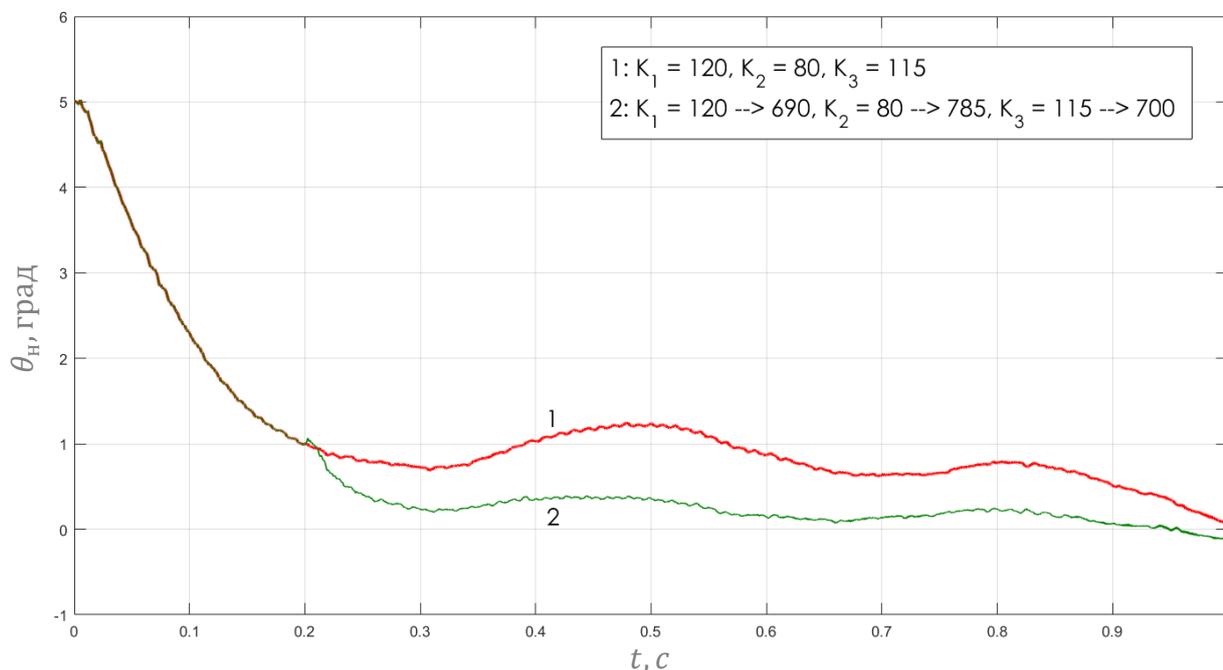


Рис.11. Эпюры ошибок наведения

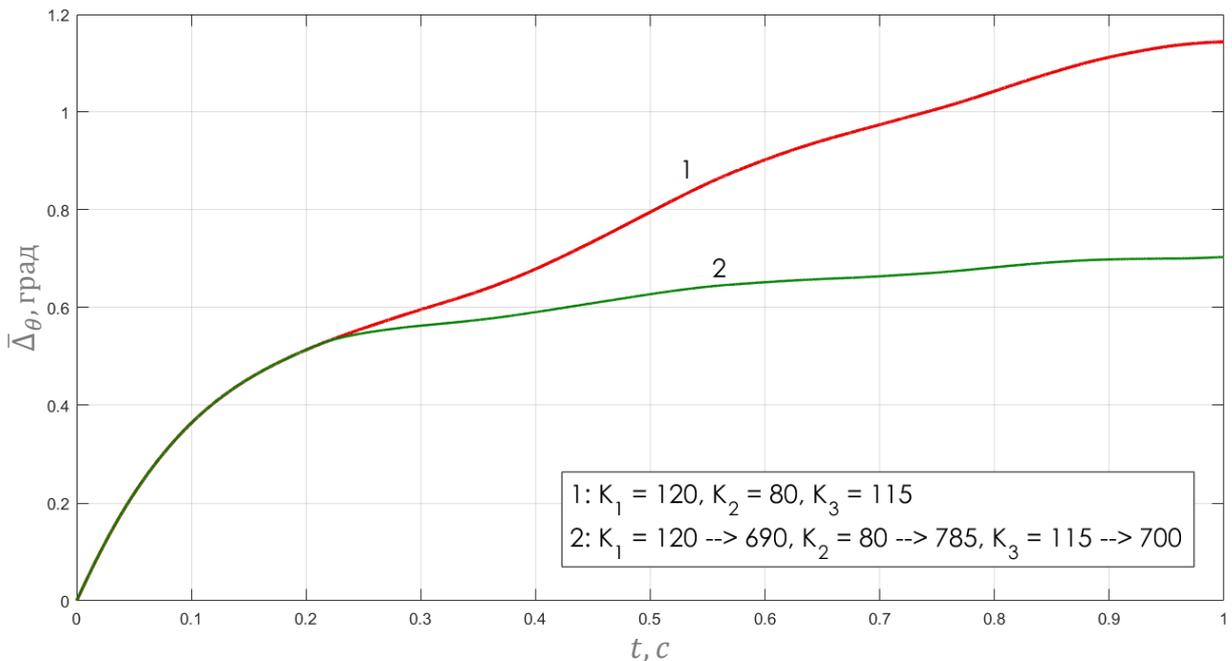


Рис.12 Интегральные оценки динамических ошибок ПСУ КН

Как видно из рисунка 10, релейное переключение значений КУ в области малых рассогласований способствует снижению динамической ошибки. Поскольку быстродействие ШП ограничивается пороговой частотой шагов ротора двигателя, рабочую область привода при заданном максимальном рассогласовании можно разделить не только на два, но и на большее количество участков, в каждом из которых будут функционировать свои рациональные КУ. Таким образом, на каждом участке ШП будет работать с максимально возможной частотой, что позволит повысить быстродействие и динамическую точность ПСУ КН.

Обсуждение результатов.

1 Проведенное в данной работе исследование объектов управления сложной технической системы объединения следящих приводов, являющегося, по сути, многосвязной системой, позволило определить методику редукции описания механической части этой сложной системы.

2 Показано, что широко используемые в робототехнике шаговые двигатели при возникновении задачи отслеживании движущихся целей (объектов наблюдения) могут накладывать ограничения на быстродействие системы, снижая тем самым интегральную динамическую точность.

3 Поскольку критерием выбора коэффициента усиления для конкретного следящего привода на основе шагового двигателя является возможность достижения предельной частоты его работы, рациональным вариантом управления можно считать разбиение рабочего углового диапазона вращения вала шагового двигателя на области, каждой из которых соответствует свой коэффициент усиления. В областях больших начальных рассогласований следует выбирать максимально возможный коэффициент усиления, при котором не будет появляться эффект

самоторможения ротора двигателя. В областях малых рассогласований при этих же коэффициентах частота переключения управляющих напряжений, а значит, и скорость вращения вала привода падает, и их следует повышать, руководствуясь требованиями к заданной динамической точности.

Тем самым в работе было обосновано нелинейное управление объединением следящих приводов, позволяющее при определенных условиях снизить влияние указанного выше ограничения, повысив динамическую точность слежения за объектом наблюдения.

Список использованной литературы:

1 Алгоритмы управления летающим роботом при слежении за подвижным объектом / Буй Ван Шон, А. Б. Бушуев, Г. М. Шмигельский [и др.] // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, №8. – С. 593 – 600.

2 Система управления беспилотным летательным аппаратом, оснащенный робототехническим манипулятором / А.А. Маргун, К.А. Зименко, Д.Н. Базылев, А.А. [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – №6. – С. 54 – 62.

3 Universal Robotics A/S: сайт. – URL: <https://www.universal-robots.com/> (дата обращения: 4.04.2020).

4 А.С. Метелев. Резонанс шаговых двигателей и анализ методов борьбы с ним. – Текст: электронный // Всероссийская научно-техническая конференция студентов Студенческая научная весна 2016: Машиностроительные технологии: материалы конференции – Москва, 2016. – URL: studvesna.ru?go=articles&id=1702 (дата обращения: 1.04.2020).

5 Frank J. Bartos. Closed-Loop Stepper Motion Alternative. – Текст: электронный // Control Engineering: Интернет-портал. – URL: <https://www.controleng.com/articles/closed-loop-stepper-motion-alternative/> (дата обращения: 1.04.2020).

6 Осмоловский П. Ф. Итерационный принцип построения многоканальных систем автоматического управления // ДАН СССР, 1968, Т. 181. №1

7 А.А. Яблонский. Курс теоретической механики. Часть II. Динамика / А.А. Яблонский – Москва: Издательство «Высшая школа», 1966. – 411 с.

8 Мусатов А.Е. Разработка и имитационные исследования объединения двух следящих приводов системы пространственного перемещения видеокамеры: дипломная работа. Москва, МАИ, 2020.

9 Т. Кенио. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987 – 200 с. ил.

10 В. Фортуна, С. Сергеев. Микрошаговый режим работы

шагового двигателя, дробление шага – Текст: электронный // Электропривод: Интернет-портал. – URL: https://electroprivod.ru/microstepping_mode.htm (дата обращения: 4.04.2020).

11 Annin Robotics: сайт. – URL: <https://www.anninrobotics.com/> (дата обращения: 28.03.20)

12 Шеваль В.В., Дорохов Е.И., Земцов В.И., Исаков С.А. Двухзонные следящие системы // «Энергоатомиздат», М.: 1984 г. – 88 с. ил.

МЕХАНИКА КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

УДК 629.7.062

Обследование подвижности населения на основе данных сотового оператора

А.Б. Бутузова, Е.А. Потылицын, И.В. Юшкова

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

В статье представлены результаты обработки данных сотового оператора на примере микрорайона Юбилейный г. Иркутск

Ключевые слова: *транспортный спрос, характеристика застроек, сотовая связь, подвижность населения.*

Во все времена возможность передвижения населения являлось основной проблемой особенно в крупных городах. Возможность свободно перемещаться побуждает людей к свободному передвижению и вследствие развития общества в целом.

Основная цель изучения подвижности населения- определение куда, как, на чем, сколько по времени и зачем перемещаются люди. Передвижение – перемещение людей от пункта отправления до пункта назначения. Потребность в передвижениях основана на возможностях, предоставляемых транспортом, и побуждает общество к дальнейшему развитию. Качественная модель, основанная на соответствующем наборе данных, создает подходящую совокупность исходных данных для концепции, проектирования и результатов оценки. Это, в свою очередь, позволяет обеспечить более обоснованное проектирование и оценку транспортных проектов.

Обследования подвижности населения могут быть национальными и региональными. Региональные обследования отвечают целям конкретного исследования в конкретном городе. Результаты опросов, проведенных в разных городах, сложно сравнивать между собой. Во время национальных опросов собирают данные в стране по регионам и городам с единой целью и по единой методике. В настоящее время национальные обследования, проведенные в разных странах, тоже непросто сопоставлять и сравнивать между собой. Коммерческие компании заказывают или проводят своими силами транспортные обследования в маркетинговых целях. Выявляя наиболее популярные маршруты и места и, наоборот, «мертвые точки», где размещать рекламу бессмысленно. Инициировать исследования могут и ученые для изучения отдельных аспектов подвижности населения. Такие исследования позволяют накапливать теоретическую базу.

Для изучения современной мобильности важны источники получения данных, которые связаны с цифровыми технологиями [6]. С развитием цифровых

технологий появилось множество способов определить местонахождение человека:

- мобильный телефон;
- операционные системы;
- мобильные приложения;
- геометки в соцсетях;
- финансовые транзакции.

Источников данных и самих данных много, но они не могут служить достоверной информацией. Большие данные не всегда отражают все население. Из выборки выпадают все, кто не пользуется мобильными сервисами и технологическими возможностями.

Применение различных методов исследования мобильности – обычная практика в многих странах, городах, районах, которая обеспечивает сбор важной информации для развития транспортных систем. Финансовые и организационные ограничения влияют на количество и качество собранных данных. Существующие методики нужно постоянно адаптировать к быстроразвивающимся технологиям и быстромеменяющемуся характеру мобильности населения, которая становится более интермодальной [2;3].

Одним из новых источников данных для изучения подвижности населения становятся данные сотовых операторов. Так как телефон стандарта GSM постоянно обменивается информацией с ближайшей базовой станцией, посылая ей сигнал о своем месте расположения, то сеть всегда "знает", где находится каждый абонент и может послать ему вызов. Оператор связи может получить эту информацию и сказать, в зоне какой базовой станции находится абонент. Реальная точность определения местоположения колеблется от нескольких сотен метров до нескольких километров.

В Транспортной лаборатории ИРНТУ ведется исследование транспортного поведения населения с помощью данных сотового оператора.

Сотовый оператор делит весь город на зоны, так называемые Zone Identification (ZID) – это идентификатор зоны, участок поселения размерами 500*500 метров, на территории которого происходит регистрация абонентов в заданный интервал времени (рисунок 1).

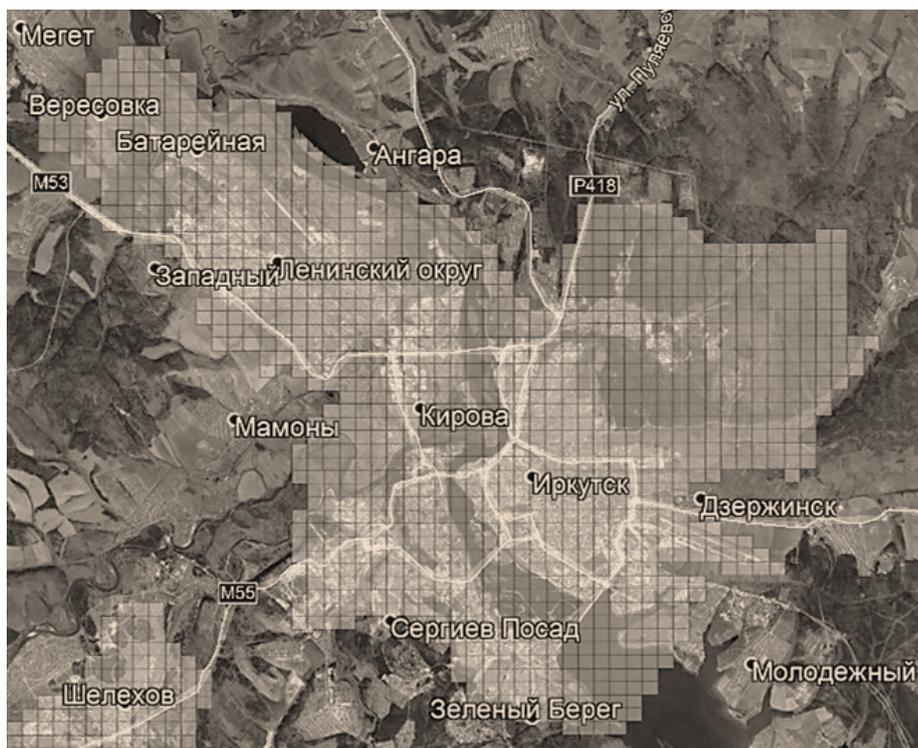


Рис.1. Зонирование г. Иркутск

По каждому такому квадрату существует массив данных о зафиксированных абонентах в определенный промежуток времени. На основании полученной выборки проводится анализ суточного распределения абонентов внутри квадрата (рисунок 2). В административный район города могут попадать несколько таких квадратов.

	A	B	C	D	E	F	G
1	dt	zid	gender	age	cnt		
2	14.10.2019 0:00	219752869	female	18-24	19		
3	14.10.2019 0:00	219752869	male	>65	4		
4	14.10.2019 0:00	219752869	female	45-54	38		
5	14.10.2019 0:00	219752869	female	>65	9		
6	14.10.2019 0:00	219752869	female	25-34	43		
7	14.10.2019 0:00	219752869	female	35-44	46		
8	14.10.2019 0:00	219752869	male	18-24	11		
9	14.10.2019 0:00	219752869		>65	1		
10	14.10.2019 0:00	219752869	male	55-64	4		
11	14.10.2019 0:00	219752869	female	55-64	16		
12	14.10.2019 0:00	219752869	male	35-44	24		
13	14.10.2019 0:00	219752869	male	45-54	12		
14	14.10.2019 0:00	219752869	male	25-34	26		
15	14.10.2019 0:10	219752869	male	18-24	9		
16	14.10.2019 0:10	219752869	female	55-64	17		
17	14.10.2019 0:10	219752869	male	>65	4		
18	14.10.2019 0:10	219752869	male	25-34	27		
19	14.10.2019 0:10	219752869	female	45-54	40		
20	14.10.2019 0:10	219752869	female	35-44	46		
21	14.10.2019 0:10	219752869	female	18-24	19		

Рис.2. Пример массива данных сотового оператора

Первые результаты обработка данных сотового оператора представлены на примере микрорайона «Юбилейный» г. Иркутска.

Поселки были построены в начале 50-х годов. Микрорайон зарождался с нескольких многоэтажек, которые были окружены лесом. Со временем бараки, в которых жили строители плотины, сносились, а на их месте строились панельные пятиэтажные дома. Ввод в эксплуатацию первого многоэтажного дома состоялся 31 декабря 1969 года. В микрорайоне больше 200 домов, пять детских садов, две школы. Его отличают примыкающие к домам лесной массив и дачные поселки [4].

Также в Юбилейном микрорайоне есть областная больница. В Юбилейном микрорайоне располагается торговый центр «Юбилейный», который притягивает к себе жителей всего города.

В микрорайоне присутствует достаточное количество других магазинов, а также досуговых центров, поликлиник и многого другого. Можно сделать вывод, что микрорайон Юбилейный является самостоятельным районом, в котором есть все необходимое для его жителей.

По данному микрорайону были получены 10 ZID – ячеек (рисунок 3). По каждой ячейки была сделана выборка для одного рабочего и одного выходного дня (рисунок 4).



Рис. 3. Микрорайон «Юбилейный» г. Иркутск

На основании выборки было получено суточное распределение внутри района

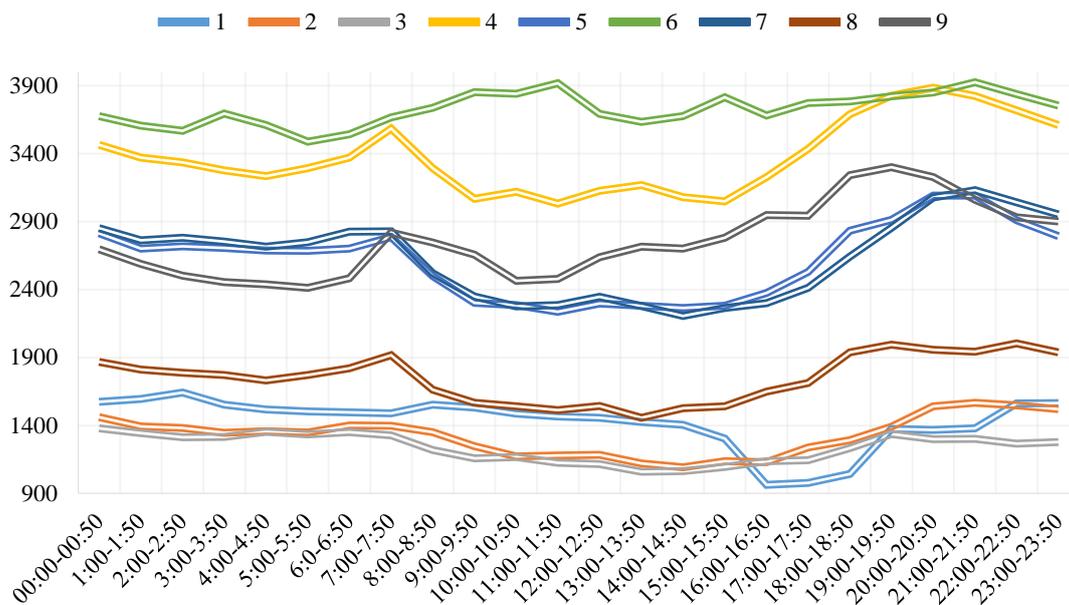


Рис.4. Пример суточного распределения абонентов внутри микрорайона «Юбилейный»

Как видно из рисунка 4., линии распределения плавные и нет резких спадов или роста числа абонентов в течении суток.

Если рассматривать каждый квадрат отдельно, можно отметить колебания по числу абонентов в течении суток (рисунок 5).

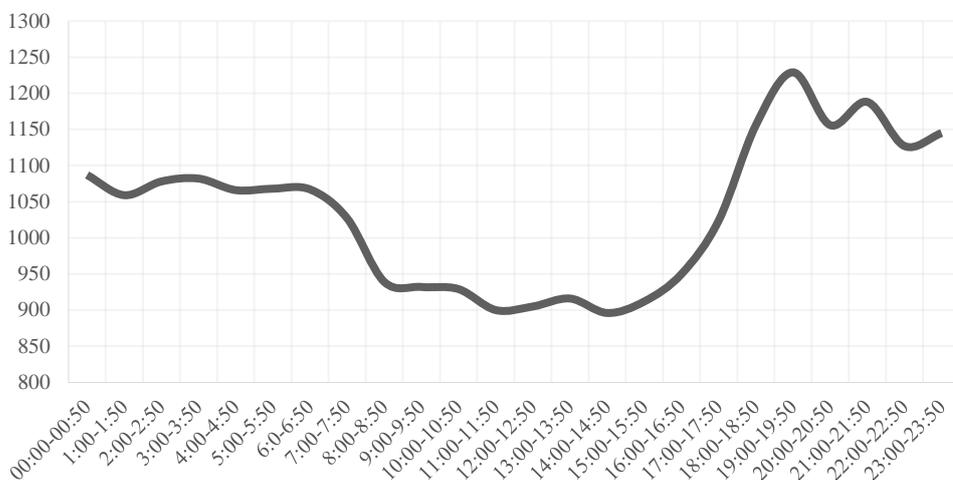


Рис.5. Пример суточного распределения абонентов внутри одного квадрата

Как видно из рисунка 5, в утреннее и вечерне – ночное время наблюдается наибольшее число зафиксированных абонентов. Из чего может следовать, что в данном квадрате преобладает жилая застройка. На рисунке 6 представлено соотношение жилой и нежилой застроек в квадрате.

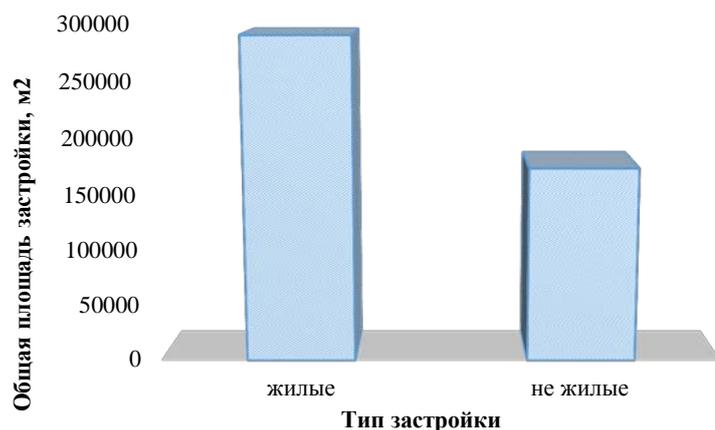


Рис.6. Пример соотношения типа застроек в квадрате

Кроме суточного распределения числа абонентов, получена половозрастная структура абонентов в районе (рисунок 7).

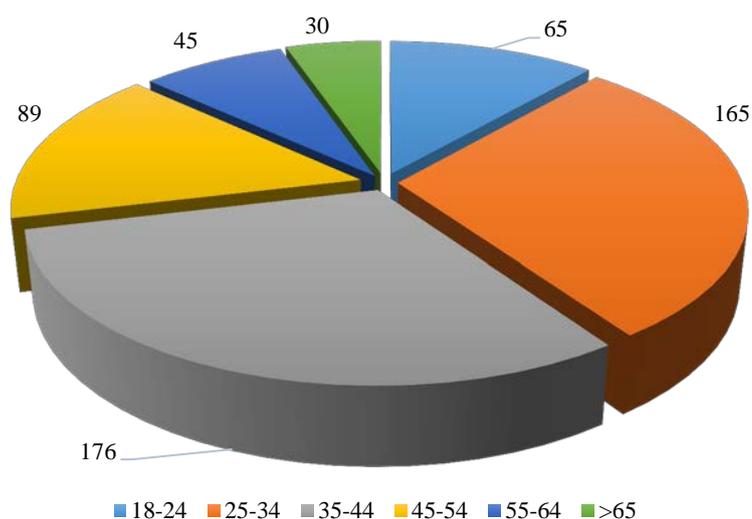
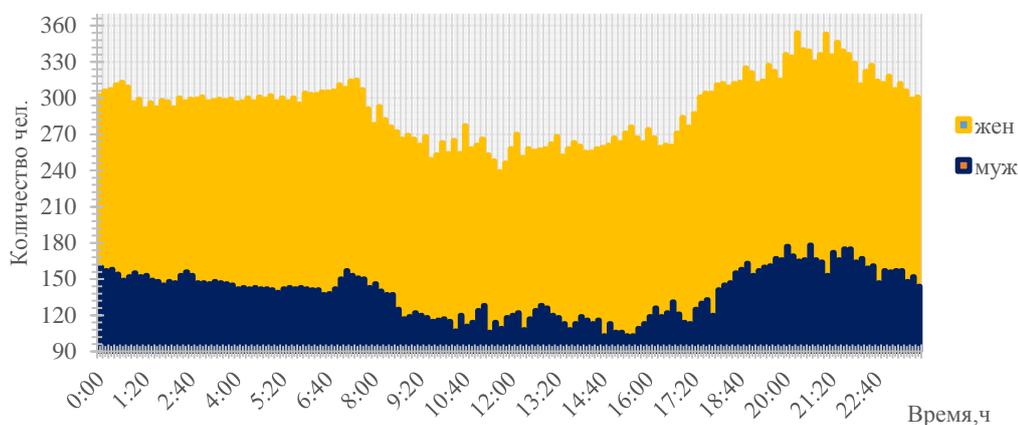


Рис.7. Пример половозрастной структуры абонентов в квадрате

Например, из рисунка 7 следует, что в представленном квадрате преимущественно больше представительниц женского пола. А преобладающая возрастная группа от 25 до 44 лет.

Полученные данные могут позволить:

- определить районную численность проживающего и работающего населения;
- выявить районы с максимальным количеством посещений;
- выявить районы концентрации мест проживания, мест приложений труда и объектов культурно- массового тяготения;
- определить количество передвижений между районами.

Результатом исследований станет методика оценки транспортного спроса на основе данных сотовых операторов.

Список использованной литературы:

1. Keemin Sohn ; Daehyun Kim. Dynamic Origin–Destination Flow Estimation Using Cellular Communication System. IEEE Transactions on Vehicular Technology (Volume: 57 , Issue: 5 , Sept. 2008). doi: 10.1109/TVT.2007.912336

2. Государственно-частное партнерство как механизм развития автоматизированных цифровых систем /Марусин А.В., Аблязов Т.Х. /Транспорт Российской Федерации, № 3 (82). СПб, 2019. С. 4-6.

3. Использование данных операторов мобильной связи для оптимизации маршрутной сети общественного транспорта мегаполисов/ Федоров В. А. / Технические науки в России и за рубежом: материалы IV Междунар. науч. конф. (г. Москва, январь 2015 г.)/М.: Буки-Веди, 2015. — С. 75-81. — URL <https://moluch.ru/conf/tech/archive/124/7016/>

4. Микрорайон Юбилейный в Иркутске/ Режим доступа – URL <https://snews.ru/news/mikrorayon-yubileynyy-v-irkutske-otmetil-50-letie>

5. Моделирование транспортных систем / Брайловский Н.О., Грановский Б.И. / М.: Транспорт, 1978. – 125 с.

6. Оптимизация планирования и управления транспортными системами / Васильев Е.М., Игудин В.Н. / М.: Транспорт, 1987. – 208 с.

УДК 656.02

Влияние распределения транспортных потоков на скорость сообщения на двух полосных регулируемых сегментах городских улиц

Ж. Т. Пиров

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова

Целью выполняемых исследований является разработка методики оценки качества организации дорожного движения на регулируемой улично-дорожной сети.

Выполняемого нами исследования принято решение выявить закономерности влияния на скорость сообщения распределения

транспортных потоков по направлениям движения на замыкающем сегмент пересечении, включая эффект наличия или отсутствия конфликта левоповоротного движения. Рассмотреть широкий диапазон сочетаний длины сегмента и распределения транспортных потоков по направлениям движения на замыкающем пересечении возможно лишь с применением микромоделирования и для этого выбрана программа VISSIM.

Ключевые слова: сегмент городской улицы, скорость сообщения, скорость движения в свободных условиях, уровень обслуживания.

Пиров Жахонгир Тиллоевич, аспирант кафедры автомобильного транспорта, тел.: 89016512456, e-mail: *Vilia-7@mail.ru*

В настоящее время при оценке условий движения транспортных потоков и качества организации дорожного движения (ОДД), а также надежности функционирования УДС широко используется понятие сегмент, под которым понимается сочетание перегона улицы и замыкающего его пересечения (нерегулируемого, регулируемого или кольцевого) [1, 2, 9-11]. При этом сегмент является базовым элементом анализа как улично-дорожной сети (УДС), так и ее участков (рис. 1).

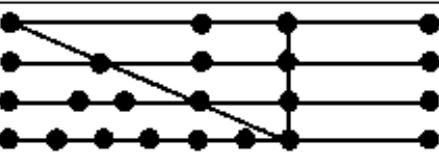
	Узел (Point) – перекресток
	Перегон (Link) – связь между двумя узлами (перекрестками)
	Сегмент (Segment) - связь и ее узлы
	Секция (Section) – сочетание нескольких одинаковых сегментов
	Линейный участок (Facility) – сочетание нескольких разных сегментов
	Коридор (Corridor) – сочетание параллельных линейных участков
	Сеть или участок сети (Areawide Analysis) – совокупность сегментов, секций, линейных участков, коридоров расположенных на данной территории

Рис. 1. Обобщённое представление структуры УДС – Quality/Level of Service Handbook 2013 [11]

Исследование влияния длины сегмента и распределения транспортных потоков на скорость сообщения.

Задачей следующих этапов продолжаемого исследования стало установление зависимостей, характеризующих влияние дорожных условий на скорость сообщения S_T и уровень обслуживания LOS .

Скорость сообщения на сегменте улицы S_T (км/ч) определяется как [10]

$$S_T = \frac{3,6 L_{seg}}{t_r + d}, \quad (1)$$

где L_{seg} – длина сегмента, включая пресечение (рисунок 2), м; t_r – продолжительность движения при проезде сегмента, с; d – продолжительность задержки, с.

Соотношение продолжительности движения t_r и задержки d зависит от протяженности сегмента и уровня загрузки пересечения (см. рис. 2). С уменьшением длины сегмента и увеличением уровня загрузки пересечения зона влияния пересечения (т.е. зона снижения скорости и накопления очереди перед стоп - линией) занимает все большую часть перегона улицы, что соответственно ведет к снижению скорости сообщения S_T .

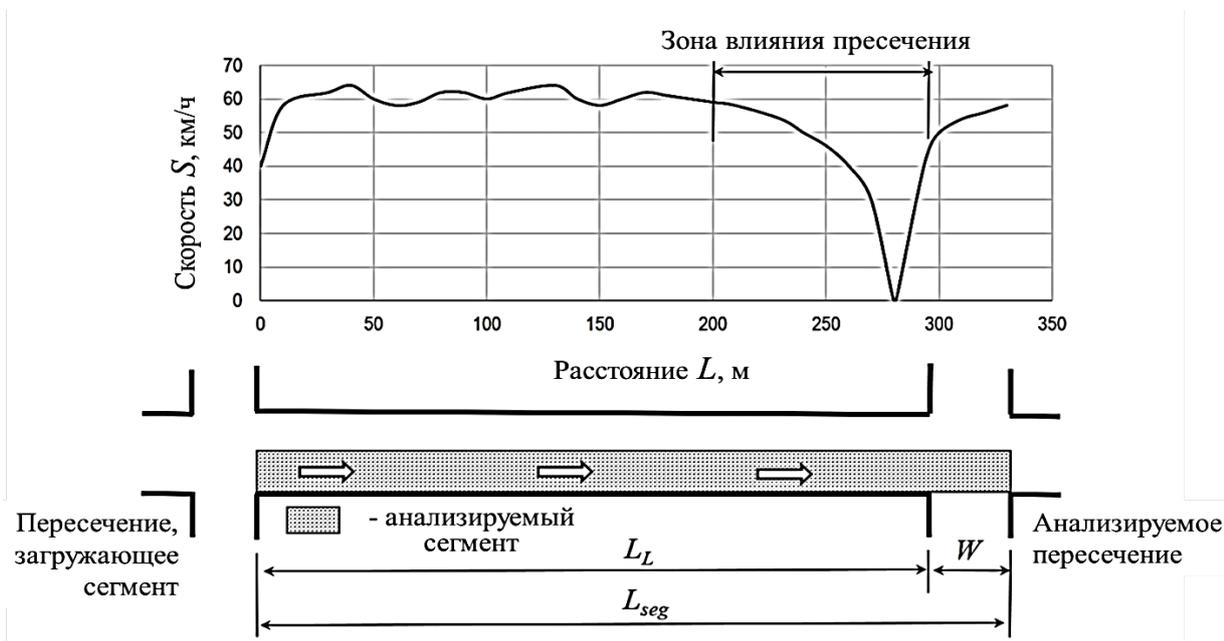


Рис. 2. График «расстояние – скорость» сегмента с регулируемым движением и схематичное представление сегмента: L_L - длина перегона; W - протяженность перекрестка; L_{seg} - длина сегмента

Средняя задержка d , входящая в состав уравнения (1), определяется аналитически на основе методики, представленной в НСМ 2000, НСМ

2010, HCM 6th [10] и адаптируемой к условиям других стран. Другая составляющая – продолжительность движения при проезде сегмента t_r определяется на основе эмпирических зависимостей «скорость – дорожные условия», полученных для условий движения городов США. В американских руководствах [9, 10] влияние длины сегмента на скорость рассматривается для свободных условий движения

$$S_f = S_{fo} f_L, \quad (2)$$

где S_f – скорость в условиях свободного потока, миль/ч, S_{fo} – базовая скорость в условиях свободного потока, миль/ч, f_L – коэффициент учитывающий расстояние между светофорными объектами (регулируемыми перекрестками);

Для коэффициента f_L получена следующая эмпирическая зависимость

$$f_L = 1,02 - 4,7 \frac{S_{fo}^{-19,5}}{\max(L_s, 400)} \leq 1,0, \quad (3)$$

где S_{fo} – базовая скорость в условиях свободного потока, миль/ч, L_s – расстояние между перекрестками (длина перегона), футов.

Кроме влияния протяженности сегмента изучены влияние состава транспортного потока, ширины полос движения и т.д. [3, 6, 8, 12]. Поэтому на данном этапе выполняемого нами исследования принято решение выявить закономерности влияния на скорость сообщения S_T распределения транспортных потоков по направлениям движения на замыкающем сегменте пересечения, включая эффект наличия или отсутствия конфликта левоповоротного движения.

Рассмотреть широкий диапазон сочетаний длины сегмента и распределения транспортных потоков по направлениям движения на замыкающем пересечении на основе практических данных очень сложно. Возможное решение этой задачи – применение микромоделирования и для этого выбрана программа VISSIM [15]. Пакет основан на модели Вейдемана (Wiedemann's Car following model) позволяющей моделировать, в том числе, маневры смены полос движения на многополосных проезжих частях [7]. Специалисты отмечают [5], что значения средней задержки на регулируемых пересечениях, получаемые при использовании пакета VISSIM, наиболее близки к расчетным значениям методики руководств HCM 2000, 2010. Следует также отметить, что микромоделирование с использованием VISSIM уже применялось в исследованиях влияния интенсивности движения на скорость сообщения [12-14].

Влияние длины сегмента и распределения потоков по направлениям движения на замыкающем сегменте перекрестке рассмотрено для следующих условий:

- двухполосные сегменты протяженностью от 200 до 2000 м;

- фазы регулирования с конфликтом левоповоротного потока и без конфликта (рисунок 3);
- длительность цикла регулирования 90 с и относительная длительность зеленого сигнала для рассматриваемого сегмента 40%;
- распределение транспортных потоков на замыкающем пересечении: вправо – 10%; прямо от 80% до 30%; влево от 10% до 60%;
- скорость движения в свободных условиях 60 км/ч (т.е. разрешаемая скорость);
- интенсивность движения на перегоне 1620 авт/ч;
- продолжительность моделирования 16,6 мин (1000 с).

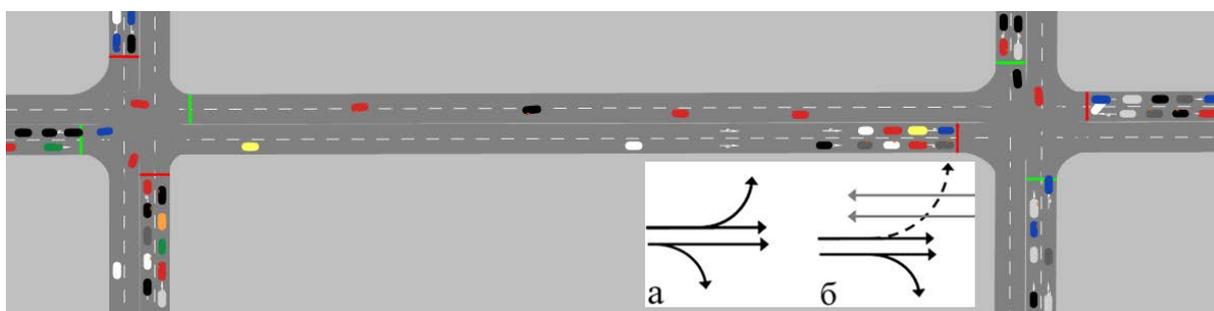


Рис. 3. Рассмотренные варианты фаз регулирования, обслуживающих транспортный поток на замыкающем сегмент пересечении: а – без конфликта левоповоротного движения с прямым потоком б – с конфликтом

Длительность цикла 90 с и относительная длительность зеленого сигнала 40% были выбраны как широко распространенные в практике организации движения.

Полученные результаты моделирования значений скорости сообщения (рис. 4 и 5) позволяют делать следующие выводы:

- в условиях отсутствия конфликта (рис. 3а) на скорость сообщения большее влияние оказывает длина сегмента. У сегментов длиной 200-300 м скорость на 30-40% чем у сегментов протяженностью более 1000 м (рис. 4);

- при наличии конфликта (рис. 3б) на скорость сообщения оказывает более значительное влияние доля левоповоротного движения. Так при увеличении этой доли до 60% скорость сообщения снижается 80-90% (рис. 5). Тем самым доказывается правильность предположения необходимости учета распределения потоков по направлениям движения при оценке уровня обслуживания.

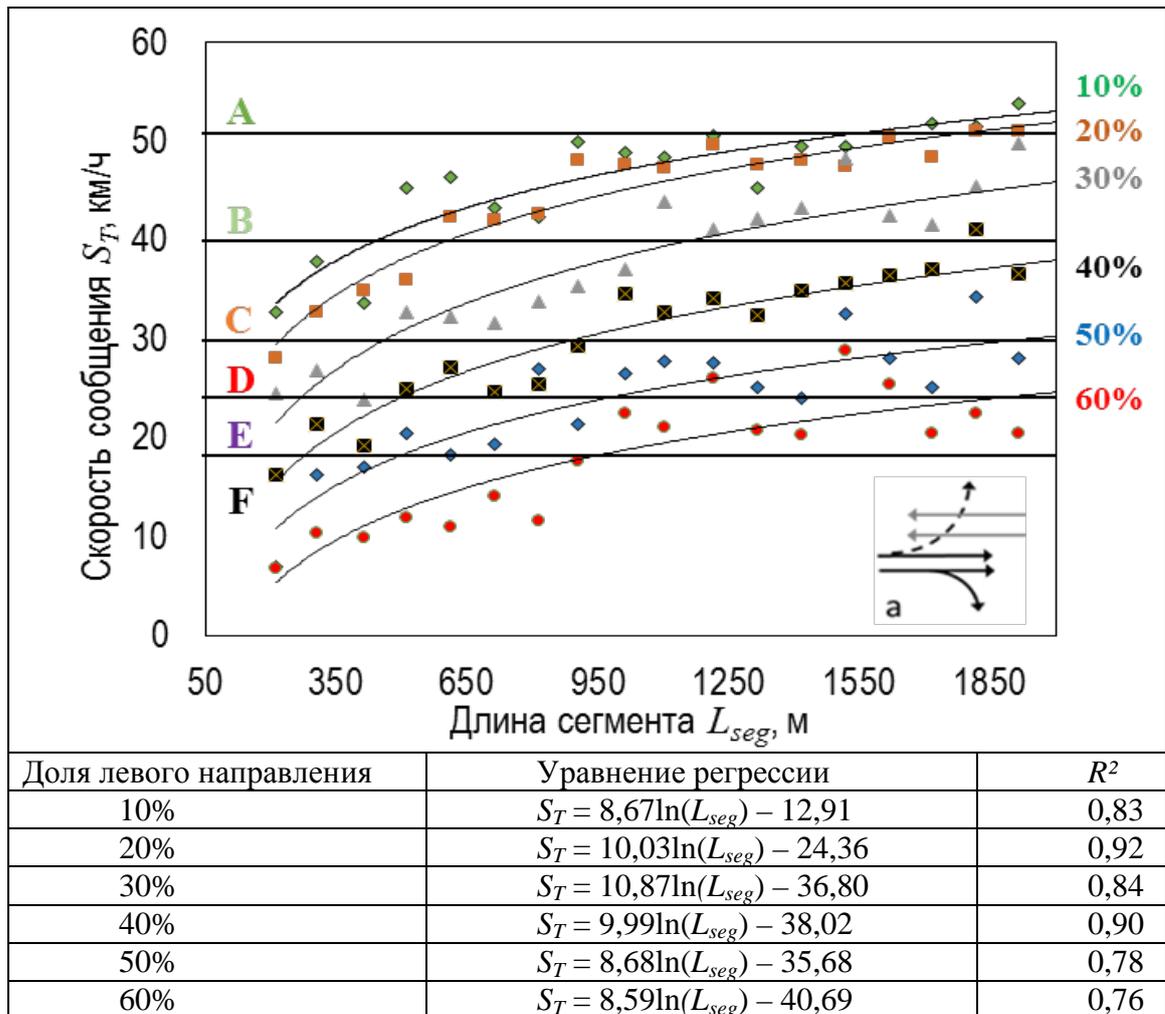


Рис. 5. Результаты моделирования скорости сообщения S_T и зависимости «длина сегмента - скорость» в случае фазы с конфликтом (рис. 3а).

Кроме зависимостей «длина сегмента - скорость» для средних значений доли левоповоротного потока $\alpha = 35\%$ рассчитаны значения коэффициента снижения скорости как отношение скорости сообщения S_T к разрешаемой скорости 60 км/ч

$$f_L = S_T / 60. \quad (4)$$

Далее для коэффициента были f_L получены следующие зависимости: фаза без конфликта левоповоротного потока (рис. 3а)

$$f_L = 0,199 \ln(x) - 0,636. \quad (5)$$

фаза с конфликтом левоповоротного потока (рис. 3б)

$$f_L = 0,198 \ln(x) - 0,866. \quad (6)$$

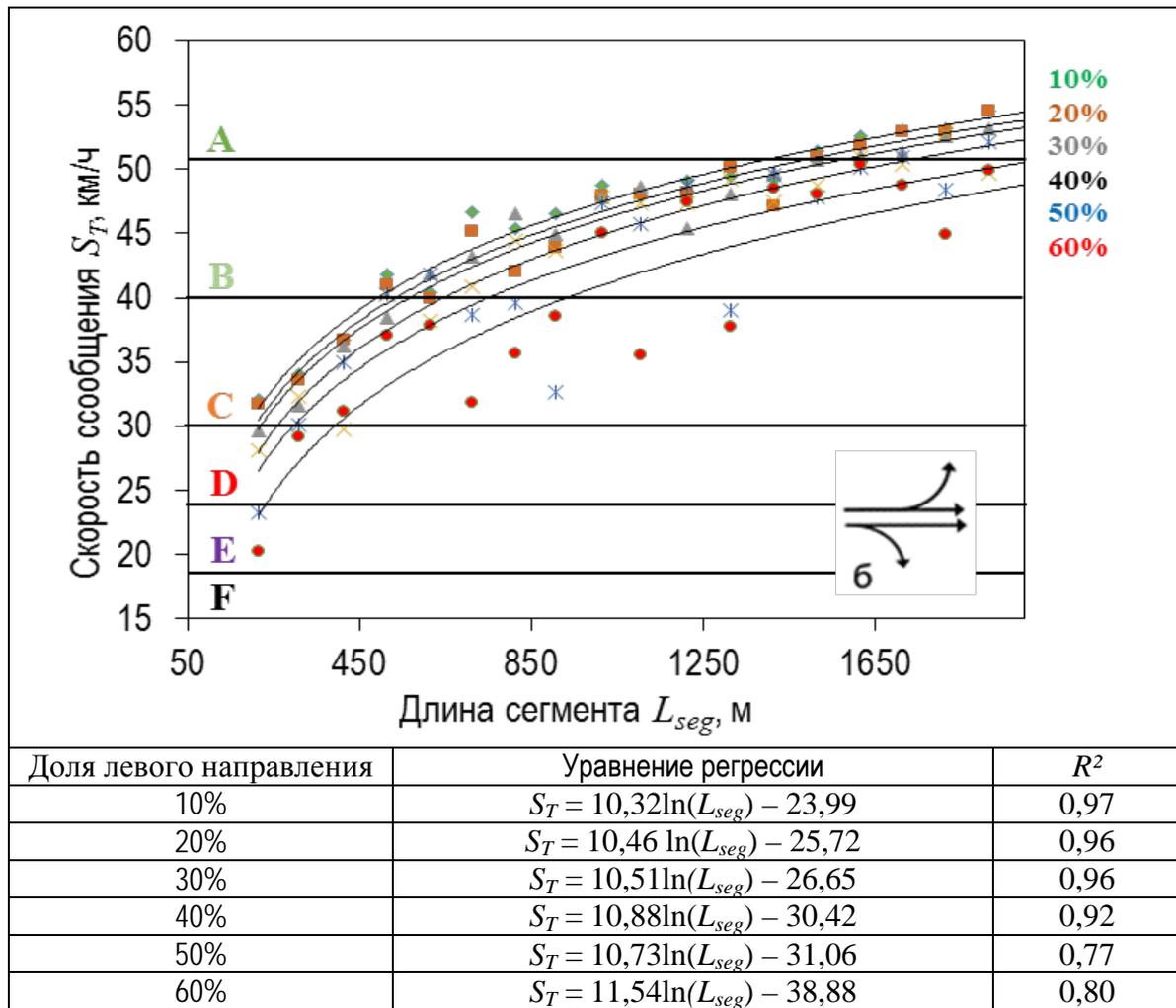


Рис. 4. Результаты моделирования зависимости скорости сообщения S_T от доли левоповоротного потока в случае фазы без конфликта (рис. 3б)

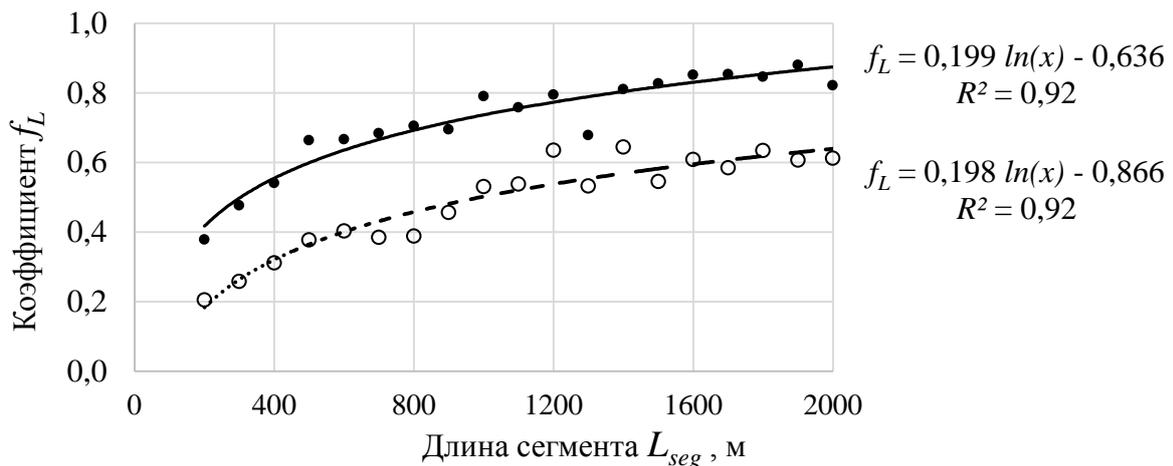


Рис. 6. Зависимость коэффициента снижения скорости сообщения f_L от длины сегмента L_{seg}

Экспериментально полученные зависимости коэффициента снижения скорости f_L (рис. 6) имеют достаточно высокие показатели статистической значимости ($R^2 = 0,92$) и поэтому могут использоваться в

практике. Это позволяет делать вывод, что значения коэффициентов снижения скорости, учитывающие особенности организации движения на сегменте улицы со светофорным регулированием, можно определить на основе микромоделирования.

Выполненный этап исследования подтвердил гипотезу о влиянии на скорость сообщения S_T неравномерности распределения транспортных потоков по направлениям движения на замыкающем пересечении, включая эффект наличия или отсутствия конфликта левоповоротного движения, что можно рассматривать как принципиально новый результат.

На следующих этапах следует рассмотреть: влияние распределения транспортных потоков на сегментах с 3 и 4 полосами движения. Полученный в результате набор коэффициентов снижения скорости может стать основой экспресс метода оценки скорости сообщения и уровня обслуживания на регулируемых сегментах городских улиц и дорог.

Список использованной литературы:

1. Горбунов Р. Н., Михайлов А. Ю., Пиров Ж. Т. Оценка уровня обслуживания на основе критериев надежности // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – № 10. – С. 188-194.

2. Пиров Ж.Т., Михайлов А.Ю. Оценка скорости движения в свободных условиях для определения уровня обслуживания транспортных потоков на сегментах городских улиц и дорог // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2019. № 2 (57). С. 16-25.

3. Пиров, Ж.Т. Сегмент при оценке качества организации дорожного движения на УДС (на примере г. Душанбе) / Организация и безопасность дорожного движения Материалы XII Национальной научно-практической конференции с международным участием «Организация и безопасность дорожного движения». Отв. ред. Д.А. Захаров. Тюмень. Издательство: Тюменский индустриальный университет (г. Тюмень) 2019. – С. 289–294.

4. Пиров, Ж.Т. Анализ организации дорожного движения в городе Душанбе / Ж.Т. Пиров, А.М. Умирзоков, А.А. Соибов, Х.Б. Хусейнов // Вестник ИрГТУ № 6. 2017.– С. 142 –148.

5. Bassani M. and Sacchi E. (2012) Calibration to Local Conditions of Geometry-based Operating Speed Models for Urban Arterials and Collectors // Procedia - Social and Behavioral Sciences, Vol 53. pp. 822 – 833 (In Eng.).

6. Bloomberg L, Dale J. (2000) Comparison of Vissim and Corsim Traffic Simulation Models on a Congested Network. // Transportation Research Record, Vol 1727. pp. 52-60. (In Eng.).

7. CHEN Tianzi, JIN Shaochenb, YANG Hongxu (2013) Comparative Study of VISSIM and SIDRA on Signalized Intersection // Social and Behavioral Sciences, Vol 96. pp. 2004 – 2010 (In Eng.).
8. Deshpande R., Gartner N.H., Zarrillo M.L (2015) Urban Street Performance. Level of Service and Quality of Progression Analysis // Transportation Research Record, Vol 2173. pp. 57-63 (in Eng).
9. Fellendorf M., Vortisch P. Validation of the Microscopic Traffic Flow Model VISSIM in Different Real-World Situations. Available at: <https://trid.trb.org/view/689890> (accessed 10.12.2019) (In Eng.).
10. Gundolf J. Impact of Different Lengths of Urban Road Segments on Speed-Volume Relationship Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-43985-3_15 (accessed 10.12.2019) (In Eng.).
11. Highway Capacity Manual 2000 // TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2000. 1207 p. (In Eng.).
12. NCHRP Report 825 Planning and Preliminary Engineering Applications Guide to the Highway Capacity Manual // TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2016. 259 p. (In Eng.).
13. Quality/Level of Service Handbook 2013 // State of Florida, Department of Transportation, 2013. 212 p. (In Eng.).
14. Tian Z., Urbanik T., Engelbrecht R., Balke K. (2000) Variations in Capacity and Delay Estimates from Microscopic Traffic Simulation Models // Transportation Research Record , Vol 1802. pp. 23-31(In Eng.).
15. VISSIM 5.30-05 User Manual PTV // Planung Transport Verkehr AG, 2011. (In Eng.).

УДК 629.3.083.4

Эффективность применения экскаваторов в строительстве

Худченко А.С., Сериков К.А.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

В статье рассматривается история возникновения и хронология процесса развития экскаваторов в мировом сообществе. Область применения и виды выпускаемых на сегодняшний момент экскаваторов. Рассмотрены виды сменного рабочего оборудования, которые могут быть применены.

Ключевые слова: эксплуатация, экскаваторы, драглайн, обратная лопата, прямая лопата, строительство, сменное рабочее оборудование, рабочее оборудование.

Появлению первого экскаватора способствовало активное железнодорожное строительство в США, а также нехватка рабочей силы при этом. Американца Отиса в 1832-1836гг разработал и создал модель первого парового экскаватора на железнодорожном ходу, с ковшом объёмом 1,14 куб.м, двигателем мощность которого составляла 15 л.с., а средняя производительность 45-50 куб. м/час. Первым покупателем экскаватора стала Англия в 1842 году, а через год четыре экскаватора были направлены в Россию для строительства Николаевской железной дороги. Но так как их не захотели использовать при строительстве, то в 1848 году их продали в Нижний Тагил - для добычи руды.

Россия, до конца 19 века продолжала пользоваться рабочей силой и все землеройные работы выполнялись вручную. И только уже при строительстве Транссибирской магистрали начали использовать американские землеройные машины.

В 1902 году на Путиловском заводе был построен первый русский неполноповоротный экскаватор на железнодорожном ходу. Оснащался он сменным ковшом 2,3 м³ и 1,5 м³. Весом в 65-75 тонн экскаватор обладал производительностью 100-290 м³/час. В России к 1917 году их было построено 35 единиц, а строились и использовались машины такого типа до 30-х годов.

В настоящее время ни одна стройка в стране не обходится без экскаваторов. Их высокая производительность, способность работать в любых условиях, надёжность, качество и разнообразие выполняемых ими земляных работ обеспечили этим машинам широкое применение в различных областях народного хозяйства. Однако потребность в них в связи с большим строительством в последнее время так велика, что ежегодно на заводах изготавливается более 40000 экскаваторов.

Область их применения в строительстве практически не ограничена. Там, где есть доступ для этой машины, земляные работы будут выполняться с высоким темпом и качеством.

В сельском хозяйстве широкое применение получили многофункциональные экскаваторы-погрузчики, которые могут выполнять работы на складах с сыпучими грузами, а также для уборки территорий, погрузки сена или соломы с полей. Если рассматривать, коммунальные предприятия и их хозяйство, то они применяют преимущественно колесные экскаваторы для работы в массивах города, где постоянно возникает необходимость перемещения экскаватора с одного объекта на другой.

Для работы в стесненных условиях востребованы мини-экскаваторы, которые могут работать в труднодоступных местах. Так же экскаваторы используют для очистки водоемов, разработки каналов, при пересадки взрослых высокорослых растений. Для этих целей разработаны специальные одноковшовые экскаваторы на гусеничном ходу.

В настоящее время производится множество разновидностей экскаваторов, а также сменных рабочих органов, для различных видов работ. Основными видами экскаваторной техники являются:

- *Одноковшовый экскаватор.*
- *Многоковшовый экскаватор.*
- *Шагающий экскаватор.*
- *Траншейный экскаватор.*
- *Экскаватор-дреноукладчик.*
- *Экскаватор непрерывного действия.*
- *Роторный траншейный экскаватор.*
- *Цепной траншейный экскаватор.*
- *Драглайн.*

Сменное рабочее оборудование экскаваторов разнообразно и всегда зависит от типа производства.

Например, прямая лопата разрабатывает грунт выше уровня стоянки: ковш, укрепленный на рукояти, копает в направлении от экскаватора, т. е. «от себя». Различают маятниковые и напорные прямые лопаты.

Также используется в качестве сменного рабочего оборудования обратная лопата которая предназначена для разработки грунта ниже уровня стоянки: ковш, укрепленный на рукояти, копает в направлении к



Рис. 1. Одноковшовый экскаватор

экскаватору т. е. «на себя». Помимо упомянутого оборудования на экскаваторах применяется:

- прямая лопата со створчатым ковшом;
- обратная лопата;
- боковая обратная лопата;
- погрузочное оборудование;
- планировочное оборудование;
- землеройно-планировочное оборудование с телескопической стрелой;
- землеройно-планировочное оборудование со смещаемой осью копания;
- драглайн;
- боковой Драглайн;
- канатный грейфер;
- жесткий грейфер;
- крановое оборудование;
- копер.

Например, рабочее оборудование грейфер похож на большой железный черпак, который прицепляют к стреле экскаватора, либо крана который используют для захватывания и выгрузки такого материала как песка, гравия, грунта, металлолома. По конструкции различают три типа грейферов: одноканатные, двухканатные и моторные. В большинстве случаев в промышленном и гражданском строительстве применение получили двухканатные грейферы, которые наиболее лучше заполняются, чем моторные и двухканатные типы грейферов.

В составе сменного рабочего оборудования механических экскаваторов следует выделить драглайн. Рабочее оборудование драглайн отличается достаточно большим радиусом действия, а также глубиной копания. Это оборудование состоит из стрелы, подъемного и стрелового канатов, а также ковша с подвеской. Данная канатная система даёт возможность показать основное преимущество драглайна даже перед гидравлическими экскаваторами - возможность работать в глубоких выемках и планировать откосы с большими рабочими отметками. Эксплуатационная производительность ($\text{м}^3 / \text{ч}$) одноковшового экскаватора:

$P_{\text{э}} = n \cdot q \cdot K_{\text{н}} \cdot K_{\text{в}} / K_{\text{р}}$, где q – вместимость ковша, м^3 ; $K_{\text{н}}$ – коэффициент наполнения ковша ($K_{\text{н}} = 1 \dots 1,3$); $K_{\text{р}}$ – коэффициент разрыхления грунта ($K_{\text{р}} = 1,15 \dots 1,4$); $K_{\text{в}}$ – коэффициент использования экскаватора по времени в течение рабочей смены; n – число циклов за час работы; $n = 3600 / T_{\text{ц}}$ (где $T_{\text{ц}}$ – продолжительность цикла работы экскаватора, с).

Повышение производительности одноковшовых экскаваторов состоит в сокращении за счет наиболее перспективных, выгодных технологических схем продолжительности цикла, а также правильном выборе и, если необходимо своевременной замены рабочего

оборудования. Рациональное соотношение вместимости ковша и грузоподъемности машин самосвалов существенно сокращает время технологических перерывов на замену транспортных средств при работе экскаватора с погрузкой грунта.

Экскаваторы, конечно же являются, вне всякого сомнения, основными машинами, используемыми на строительных площадках и за их пределами для производства земляных работ, перегрузки сыпучих и кусковых материалов, а также при выполнении других работ. главенствующую роль практически на любой стройке позволяют ему играть, простота, надежность и универсальность.

Список использованной литературы:

1. Беркман И.Л., Раннев А.В., Рейш А.К. «Универсальные одноковшовые строительные экскаваторы» Москва, 2007 г. - 235 с.
2. Зангиев А.А. Эксплуатация экскаватора одноковшового - М: КолосС, 2011 год.
3. Набоких В.А. Эксплуатация и ремонт электрооборудования экскаваторов. Уч. ВПО.- М.: Форум. 2010 год.
4. Раннев А. В., Полосин М. Д. «Устройство и эксплуатация дорожно-строительных машин», М., Издательский центр «Академия», 2010 г.
5. Шестопалов К.К. Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование: Учебное пособие. - М.: Издательский центр "Академия", 2005.

Данные авторов

А

Азенштейн Екатерина Борисовна, студент ИРНИТУ, тел.: 89246265431, e-mail: azkotya@mail.ru

Б

Балакина Екатерина Викторовна, д.т.н., профессор кафедры техническая эксплуатация и ремонт автомобилей, тел.: 89023117847, e-mail: fahrgestell2011@yandex.ru

Берман Александр Фишелевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, 8(914)892-5548, e-mail: bafbam@mail.ru.

Бутузова Александра Борисовна, доцент кафедры автомобильного транспорта, тел.: 8 950 111 6232, e – mail: alexa.kurpiyanova@gmail.com

Булгаков Николай Федорович, д-р. техн. наук, профессор кафедры Транспорт, тел.: 89080115553, e-mail: bnf-atf@mail.ru.

Бутенко Юлия Ивановна, к.т.н., доцент кафедры «Романо-германские языки», тел. 89661978585, e-mail: iuliiabutenko2015@yandex.ru

Болотова Елизавета Евгеньевна, магистр, тел. 89853432295, e-mail: bolotovaee@mail.ru

Бадамшин Ильдар Хайдарович, профессор кафедры авиационных двигателей; adbadamshin@ugatu.ac.ru

Беломестных Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, тел.: 89641171354, e-mail: berkut1@mail.ru.

Г

Горбунов Роман Николаевич, аспирант кафедры автомобильного транспорта ИРНИТУ, тел.: 89501111031, e-mail: gorbunow@list.ru.

Горбунова Зинаида Васильевна, кандидат экономических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта ИРНИТУ, e-mail: flocean@mail.ru.

Горбунова Любовь Николаевна, студент магистерской программы «Финансовая экономика» МИЭФ НИУ ВШЭ, e-mail: Ingorbunova@edu.hse.ru.

Горбанева Анастасия Валерьевна, аспирант кафедры Транспорт, тел.: 89233398818, e-mail: anastasia1993.05@mail.ru

Гаврилова Анна Олеговна, студентка группы СМ-17-1 кафедры самолетостроения и эксплуатации авиационной техники, тел.: 89648038519, e-mail: vbr2604@mail.ru;

Груздев Александр Сергеевич, студент ИРНИТУ, тел: 89149406443, e-mail: gruzdev-as@yandex.ru

Д

Дрожжин Сергей Николаевич, ст. преподаватель кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, тел.: 89501265123, e-mail: drozhzhin_sn@mail.ru

Ж

Журавлёв Диомид Алексеевич, дтн, профессор кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, тел. 89021719546, email: dio@istu.edu

К

Карлина Юлия Игоревна, научный сотрудник научно-исследовательской части, аспирант, тел. 89148798505, email: karlinigor@mail.ru

Кольцов Владимир Петрович, д.т.н., профессор кафедры технологий и оборудования машиностроительных производств, kolcov@istu.edu

Колчин Василий Савельевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта ИРНИТУ, e-mail: kolchin@istu.edu.

Коваленко Василий Васильевич, ст. преподаватель кафедры Транспорт, тел.: 89233398818, e-mail: kovvas-atf@mail.ru

Коваль Алексей Петрович, аспирант ИРНИТУ, тел: 89500519246, e-mail: ya.koval-alexey@yandex.ru

Коптев Анатолий Никитович, профессор кафедры эксплуатации авиационной техники, д.т.н., профессор, тел. 89608081808, email: eat@ssau.ru

Л

Ле Чи Винь, к.т.н, доцент кафедры технологий и оборудования машиностроительных производств, e-mail: vinh_istu@mail.ru;

М

Москвитин Виктор Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, тел.: 89648136554, e-mail: mvn.irk@yandex.ru

Мясников Алексей Юрьевич, начальник бригады «Бортовые кабельные сети» Самарского филиала конструкторского бюро ПАО «Туполев». Аспирант Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва. e-mail: lesha-myasnikov@yandex.ru.

Мясникова Юлия Витальевна, ассистент кафедры эксплуатации авиационной техники, тел.: 89276067967, email: myasnikova.yuv@ssau.ru

Марков Семён Петрович, студент группы СМ-17-1 кафедры самолетостроения и эксплуатации авиационной техники, тел.: 8 964 803 85 19, e-mail: vbr2604@mail.ru;

Н

Николайчук Ольга Анатольевна, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, 8(914)882-8155, e-mail: nikoly67@mail.ru.

Нгуен Минь Хоанг, студент кафедры технологий и оборудования машиностроительных производств, nguuenhoangirk@gmail.com.

О

Опарина Татьяна Александровна, студент гр. ИНБ-16-1, тел. 89148760181, email: martusina2@yandex.ru

Орлов Дмитрий Алексеевич, обучающийся кафедры технологий и оборудования машиностроительных производств, e-mail: dimos9813@gmail.com

П

Потылицын Евгений Андреевич, аспирант доцент кафедры автомобильного транспорта, тел.: 8 9148990640, e-mail: potilycin_j@mail.ru.

Р

Ракицкая Валентина Борисовна, старший преподаватель кафедры технологий и оборудования машиностроительных производств, e-mail: rvb@istu.edu;

Распопина Вера Борисовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры самолетостроения и эксплуатации авиационной техники, тел.: 89648038519, e-mail: vbr2604@mail.ru

С

Сарбаев Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры техническая эксплуатация и ремонт автомобилей, тел.: 89054822052, e-mail: sards93@gmail.com

Сергиенко Иван Васильевич, аспирант кафедры техническая эксплуатация и ремонт автомобилей, тел.: 89275235073, e-mail: sergienko-1993@mail.ru.

Сидняев Николай Иванович, профессор, д.т.н., заведующий кафедрой «Высшая математика», тел. 84992636640, e-mail: sidnyaev@yandex.ru

Сериков Константин Алексеевич, студент группы СДМ-16-1, кафедры строительных, дорожных машин и гидравлических систем, тел. 89647361002

Ф

Фалеев Сергей Юрьевич, студент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, e-mail: s.faleeff@gmail.com.

Фролов Дамир Александрович, студент группы СМ-17-1 кафедры самолетостроения и эксплуатации авиационной техники, тел.: 89648038519, e-mail: vbr2604@mail.ru

Х

Худченко Александр Сергеевич, старший преподаватель, кафедры строительных, дорожных машин и гидравлических систем, тел. 89647306144, e-mail: Alex122809@rambler.ru

Ш

Шубин Павел Григорьевич, студент группы ММб-16-1, тел.: 89148739885 e-mail: akbarik41@gmail.com

Шеметов Лев Игоревич, студент группы СМ-17-2 кафедры самолетостроения и эксплуатации авиационной техники, тел.: 89648038519, e-mail: vbr2604@mail.ru;

Ю

Юрин Александр Юрьевич, кандидат технич. наук, заведующий лабораторией ИДСТУ СО РАН, доцент кафедры автоматизированных систем ИрННТУ, 8(914)884-0743, e-mail: j80@yandex.ru.

Юшкова Ирина Валерьевна, студент группы ЛИМб-16 кафедры автомобильного транспорта, e – mail: irina.yushkova@tl-istu.com

Научное издание

АВИАМАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ СИБИРИ

**Сборник статей
XIV Международной научно-технической конференции**

(г. Иркутск, 21–26 сентября 2020 г.)

Подписано в печать 15.09.2020. Формат 60 x 90 / 16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 13.
Тираж 300 экз. Зак. 157 д/п.

Отпечатано в типографии издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83