На правах рукописи

ФУНГ ВАН БИНЬ

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПИЛЬНОГО БЛОКА ЛЕСОПИЛЬНОГО СТАНКА

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана

Научный руководитель: Гаврюшин Сергей Сергеевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Подураев Юрий Викторович
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Робототехника и мехатроника» МГТУ Станкин

Хейло Сергей Валерьевич
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Теоретической и прикладной механики, РГУ им. А.Н. Косыгина

Ведущая организация: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН).

Защита состоится « »_____ 2017 года в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141. 06 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенных печатью, просим направлять указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок: 8 (499) 267-09-63

Автореферат разослан « __» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., доцент В.П. Михайлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Развитие современного машиностроительного производства вызывает необходимость использования методов автоматизации на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) разрабатываемой продукции. Одним из эффективных направлений повышения конкурентоспособности изделия является применение концепции управления жизненным циклом изделия (ЖЦИ), которая включает методологию и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП), технической подготовкой производства (АСТПП), а также производствами (АСУП) и т.д. Теоретические основы ЖЦИ изложены в работах отечественных и зарубежных авторов: Агеева В.Н., Ковшова А. Н., Колчина А.Ф., Кондакова А.И., Овсянникова М.В., Павлова В.В., Сердобинцева Ю.П., Скворцова, А. В., Соломенцева Ю.М., Шалумова А.С., Anselmi Immonen, Martin Eigner, Ralph Stelzer и т.д. В рамках концепции ЖЦИ все этапы рассматриваются взаимосвязано в едином информационном пространстве (ЕИП). Специалисты и эксперты могут не только критически проанализировать свои требования, но и оценить их влияние на требования, предъявляемые на других этапах ЖЦИ. С применением концепции управления ЖЦИ, процессы производства ряда стандартных изделий стали более эффективными, что подтверждается усиливающейся тенденцией создания автоматизированных систем (АС) для интеграции различных этапов CAD/CAM/CAE/CNC, например программные комплексы Unigraphic NX, Catia, Pro/E и др.

Вместе с тем, при производстве ряда наукоёмких изделий, наблюдается дефицит специализированных АСТПП и АСУП. Основными причинами этого являются: отсутствие комплексного описания модели изделия в едином информационном пространстве, наличие несогласованностей между отдельными этапами ЖЦИ, а также отсутствие исследований, учитывающих специфику конкретного изделия.

Примером наукоемкого изделия может служить пильный блок (ПБ) лесопильной рамы нового поколения с круговым поступательным движением пильных полотен (Рис. 1). При проектировании конструкции ПБ объективно существует необходимость одновременно удовлетворять целому ряду технических требований. Кроме стандартных требований, таких как прочность, долговечность, жесткость, существуют дополнительные специфические требования характерные для данной конструкции: устойчивость пильных полотен, необходимость отстройки резонансных режимов для пильных полотен, динамическое уравновешивание ПБ. Следует отметить, что к настоящему времени отдельные задачи в полном объеме еще не изучены. Кроме того, при рассмотрении данного изделия в процессе его жизненного цикла, возникает проблема несогласованности, а порой, даже противоречивости требований отдельных этапов.

Очевидно, что проектирование ПБ станка является многокритериальной задачей. Расширение проблемы с увеличением количества рассмотренных

этапов и участвующих специалистов делает постановку задачи, с одной стороны более точной, но с другой стороны более трудоёмкой.

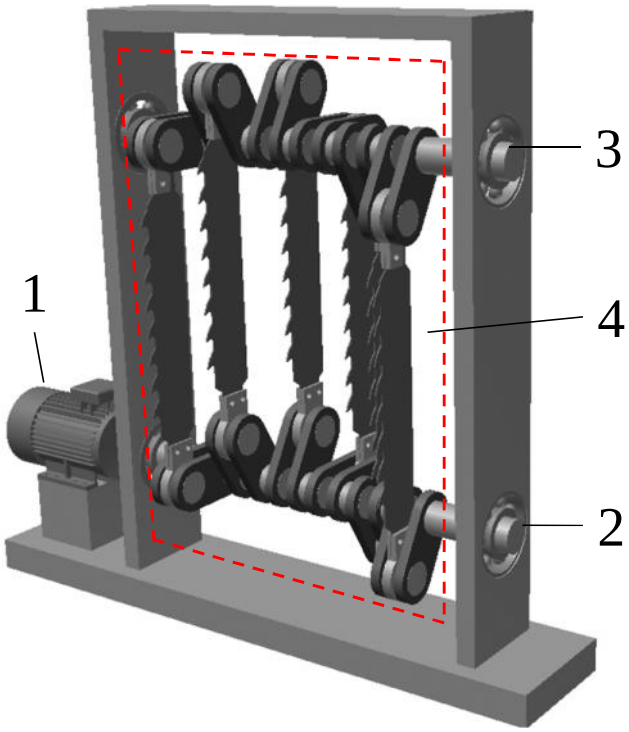


Рис. 1. Принципиальная схема лесопильного станка нового типа
1-двигатель; 2,3-нижний и верхний вал; 4-пильный блок (ПБ)

Задача усложняется за счет увеличения количества параметров математической модели, наложенных ограничений и критериев качества. Для решения поставленной проблемы необходимо применить теорию и методы принятия решений, изложению которых посвящены работы Г. Вагнера, Лотова А.В., Моисеева Н.Н., Подиновских В.В., Статникова Р.Б., Jeffrey W. Herrtann и др.

Учитывая вышеизложенное, создание комплексной методики автоматизированного управления процессом принятия решений при проектировании наукоемких изделий на основе концепции ЖЦИ, которая позволяет интегрировать основные этапы в едином информационном пространстве является **актуальной задачей**.

Целью работы является создание комплексной методики автоматизированного управления процессом принятия решений при проектировании наукоемких изделий на основе концепции управления ЖЦИ путём обеспечения высокой совместимости и интеграции АСУТП, АСТПП и АСУП на примере пильного блока лесопильного станка нового типа.

Достижение поставленной цели требует решения следующих **задач**:

1. Получение функциональных соотношений, описывающих физическо-механическое поведение ПБ лесопильного станка и используемых для проведения процесса автоматизированного проектирования изделия.

2. Создание многокритериальной модели и алгоритма автоматического расчета критериев качества ПБ по задаваемому вектору управляющих параметрам с учетом функциональных ограничений.

3. Разработка метода визуально-интерактивного анализа (МВИА) для автоматизации управления процессом принятия решений, позволяющего формировать области допустимых значений критериев качества и контролировать их изменения при многокритериальном проектировании наукоемких машиностроительных изделий.

4. Разработка прикладной программы и ее применения для поддержки принятия решений при автоматизированном проектировании ПБ с целью нахождения рациональных вариантов исполнения конструкции.

5. Проектирование и анализ ПБ станка в среде стандартных программных средств по найденным рациональным вариантам и выработка рекомендаций по производству нового станка.

Методы исследования

При выполнении диссертационной работы в рамках системного подхода использовались: компьютерное моделирование и программирование, методы математического анализа, вычислительные методы, теория механизмов и машин, многопараметрический и многокритериальный подход, методы оптимизации, методы принятия решения.

Научная новизна:

1. Разработана комплексная методика автоматизированного управления процессом принятия решений при многокритериальном проектировании сложных наукоемких изделий на основе концепции ЖЦИ, обеспечивающая совместность и интеграцию АСУТП, АСТПП и АСУП.

2. Создана обобщенная многокритериальная модель для автоматизированного исследования ПБ станка, позволяющая по заданному вектору управляющих параметров с учетом конструктивных и технологических ограничений автоматически рассчитать основные критерии качества изделия.

3. Предложен метод визуально-интерактивного анализа (МВИА), позволяющий формировать и контролировать область допустимых значений критериев качества, оценить их взаимовлияние и указать рациональные критериальные ограничения, при которых существуют согласованные варианты исполнения изделия.

4. МВИА реализован в форме специализированной прикладной программы, позволяющей в интерактивном режиме проводить анализ и управлять процессом принятия решений при автоматизированном проектировании ПБ. Найдены рациональные варианты проектирования ПБ и даны рекомендации по его совершенствованию.

Достоверность результатов работы достигается использованием общепринятых достоверных методов, строгостью математических выкладок, основанных на фундаментальных законах механики. Теоретические результаты подтверждаются численными и натурными экспериментами.

Практическая значимость работы:

1. Созданная методика используется для проектирования и совершенствования конструкции ПБ лесопильного станка и также других наукоемких машиностроительных изделий.

2. Предлагаемый МВИА предоставляет лицам принимающим решение удобный и наглядный инструмент, позволяющий обоснованно осуществлять выбор и назначение пороговых значений для критериев качества с целью нахождения рациональных вариантов проектируемой наукоемкого изделия или технологического процесса.

3. Разработанная математическая модель внедрена для автоматизированного исследования и анализа ПБ станка, позволяющая в полной мере описать функциональные характеристики изделия.

4. Найденные рациональные варианты проектирования ПБ используются для создания более качественной и конкурентоспособной конструкции многопильного станка нового типа.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на ежегодном международном научном симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова февраль 2015 г., февраль 2016 г., февраль 2017 г.; на международной конференции МИКМУС-12/2015, Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН; на Международной школе молодых ученых и специалистов, МГТУ СТАНКИН 5/2016; на XVI-ой Международной конференции CAD/CAM/PDM – 2016, ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН; на научном семинаре кафедры МТ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана – 2017.

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 9 научных работ, из них 3 статьи в Перечне рецензируемых научных изданий – ВАК РФ и 1 статья в Перечне международных научных изданий в системе Web Science и Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 146 наименования и приложения. Работа изложена на 157 страницах, содержит 62 рисунка и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, приведена постановка задач и краткая аннотация содержания работы по разделам, дана оценка научной новизны и практической значимости полученных результатов и сформулированы защищаемые положения.

В первой главе приведён обзор современных систем автоматизации CAD/CAM/CAE/PDM/PLM для АСУТП, АСУП и АСТПП в области машиностроения. Приведен обзор современных лесопильных станков. Анализируются основные преимущества многопильного станка с круговым поступательным движением пильных полотен. Выделяются существующие научно-технические проблемы и возможные несогласованности между этапами жизненного цикла ПБ лесопильного станка нового типа. Отмечены недостатки подхода использования стандартных отдельных АС на различных этапах ЖЦИ и актуальность создания специализированной АС управления процессом принятия решений при проектировании конкретного наукоемкого продукта. Отмечена необходимость создания единой методики автоматизированного управления процессом многокритериального проектирования ПБ станка на основе концепции ЖЦИ, обеспечивающей высокую совместность и интеграцию АСУТП, АСТПП и АСУП.

Во второй главе изложена единая методика автоматизированного управления процессом многокритериального проектирования наукоемкого изделия, обеспечивающая высокую совместность и интеграцию разных этапов подготовки производства. Задачи управления многокритериальным

проектированием отличаются от стандартных задач многокритериальной оптимизации участием и непосредственным взаимодействием специалистов в процессе принятия решений с целью получения рациональных согласованных вариантов.

Рис. 2. Модель синтеза пильного блока лесопильного станка

Предложена упрощённая модифицированная модель ЖЦ пильного блока, так называемая «модель синтеза» (Рис. 2). Основное отличие данной модели от существующих моделей состоит в наличии центрального этапа синтеза, предназначенного для сбора и обработки данных, связанных с различными этапами ЖЦИ. В данной модели отличены наиболее важные функциональные характеристики ПБ, а также представлены главные участники ЖЦИ, взаимодействующие в едином информационном пространстве.

Рис. 3. Формулировка задачи синтеза на основе многопараметрического и многокритериального подхода

Специалисты в разных областях вместе участвуют в процессе решения задачи синтеза, результатом которого является согласованное решение, удовлетворяющее всех участников ЖЦ станка.

В результате синтеза, устраняются проблемы несогласованности. Задача синтеза формулируется на основе многопараметрического и многокритериального подхода (Рис. 3), согласно которому параметры, характеризующие изделие на всех этапах ЖЦ делятся на три группы. Во-первых, это управляющие параметры, значения которых нужно найти при решении задачи синтеза. К данной группе относятся конструктивные и технологические параметры. Во-вторых, критерии качества, которые характеризуют требования к проектируемому изделию (производительность, масса и т.д.). И, в-третьих, неизменяемые параметры (физико-механические свойства материалов и т.д.).

В третьей главе проанализированы основные соотношения, используемые для постановки задачи многокритериального проектирования ПБ. Основным рабочим узлом многопильного станка является пильный модуль, схема и расчетная модель которого представлены на Рис. 4. Для обеспечения требуемой жёсткости полотна и устранения нежелательных сжимающих напряжений на режущей кромке, полотно предварительно растягивается силой F_0 с эксцентриситетом натяжения e_1.

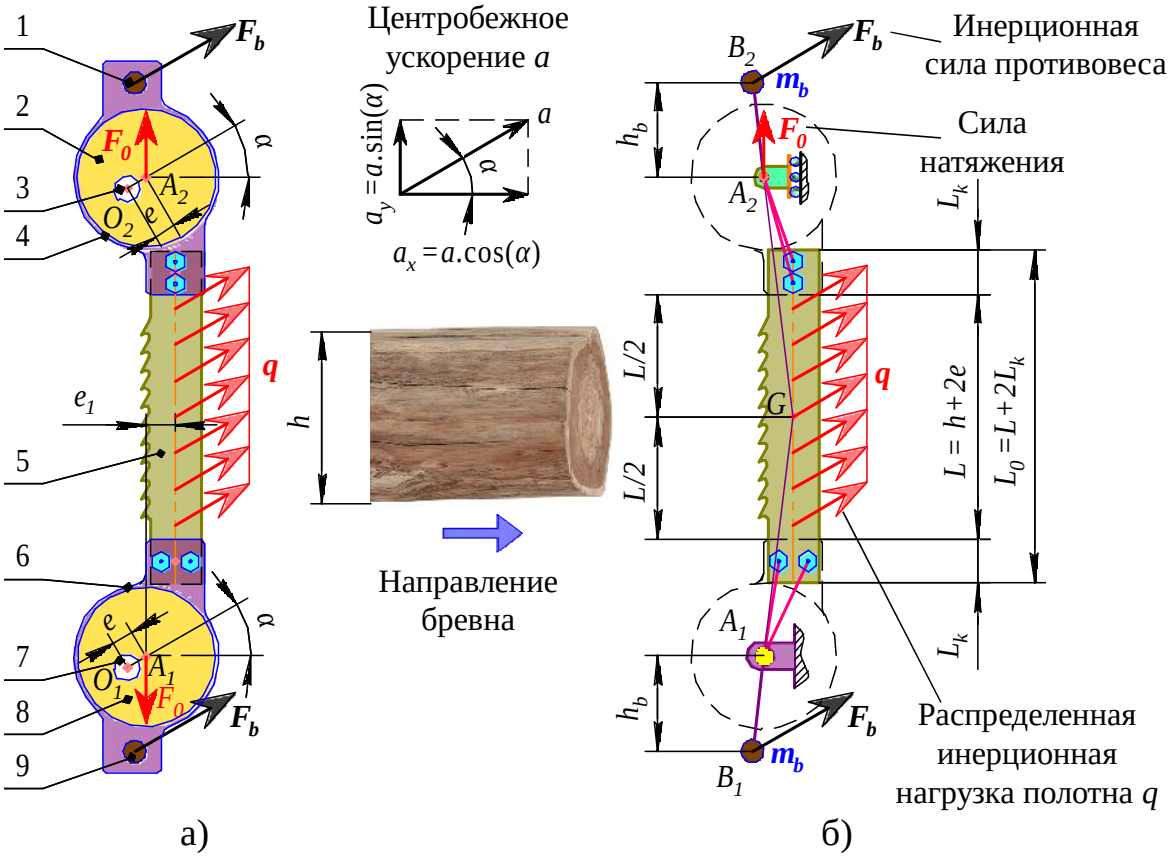


Рис. 4. Схема и расчетная модель пильного модуля
а) Схема пильного модуля, б) Расчетная модель пильного модуля.
1, 9 - верхний и нижний противовес; 2, 8 - верхний и нижний эксцентрик;
3, 7- верхний и нижний вал; 4, 6 - верхняя и нижняя корпусная деталь; 5 – полотно.

Пильный модуль можно рассматривать как шарнирный параллелограммный механизм. При круговом поступательном движении пильного модуля все материальные точки движутся по сходным круговым

траекториям с радиусом e, скоростями $v = e\left(\frac{2\pi n}{60}\right)$ и центробежными ускорениями $a = e\left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2$. Где n – частота вращения валов станка и e – эксцентриситет кругового движения (Рис. 4). На пильное полотно действует распределенная инерционная нагрузка q, которая приводит к возникновению изгибающих моментов в пильном полотне. Вследствие чего, полотно может потерять свою плоскую форму. В главе проведен анализ устойчивости плоской формы полотна под действием инерционных нагрузок. Согласно требованию устойчивости пильного полотна, рабочая скорость n ограничивается критической частотой $n_{cr,}$ при которой возникает потеря устойчивости плоской формы полотна. С целью повышения производительности станка и качества обработки, критическую частоту желательно максимизировать.

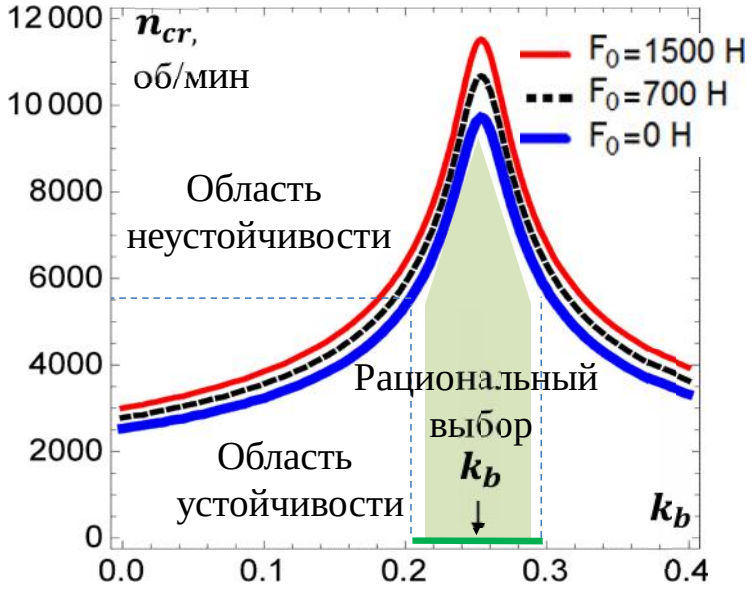


Рис. 5. Область устойчивости плоской формы полотна под действием инерционных сил

Предложена процедура расчета критической частоты n_{cr} в зависимости от силы натяжения F_0 и массы противовеса m_b в соответствие с реальным условием закрепления пильного полотна при холостом режиме. Разработанная зависимость критической частотой n_{cr} от безразмерного коэффициента $k_{b,}$ характеризующего массу m_b противовеса представлена на Рис. 5.

Показано, что при увеличении силы натяжения F_0 значение критической частоты увеличивается. При рациональной балансировке пильного модуля противовесами $0{,}2<k_b<0{,}3$, происходит «компенсация» изгибающего момента, вызываемого распределённой инерционной нагрузкой q и инерционной силой противовесов F_b (Рис. 4 и Рис. 5). За счет этого обеспечивается устойчивость пильного полотна при повышенной частоте вращения валов.

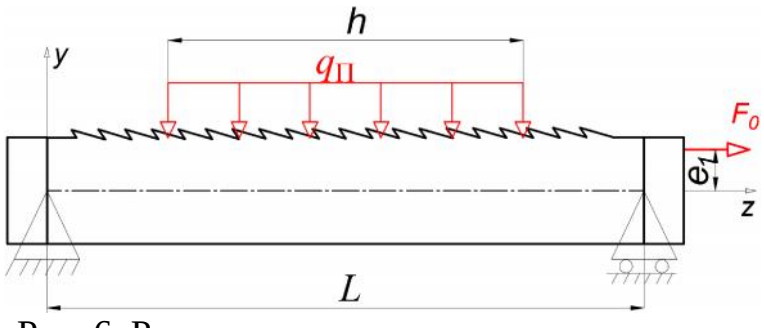


Рис. 6. Рачетная модель полотна при пилении

Во втором пункте главы рассмотрена устойчивость плоской формы полотна при пилении, характеризующаяся величиной критической силы $P_{cr} = q_{пcr}h$ (Рис. 6).

Где h - высота пропила и $q_{пcr}$ – критическая распределённая нагрузка при пилении. Для обеспечения устойчивого пиления, критическая сила P_{cr} должна быть не меньше требуемого усилия пиления P_0: $P_{cr} \geq P_0$. Для повышения точности пиления, критическую силу желательно максимизировать. Автором получено аналитическое соотношение для определения критической силы P_{cr} в зависимости от силы натяжения F_0 и эксцентриситета натяжения e_1.

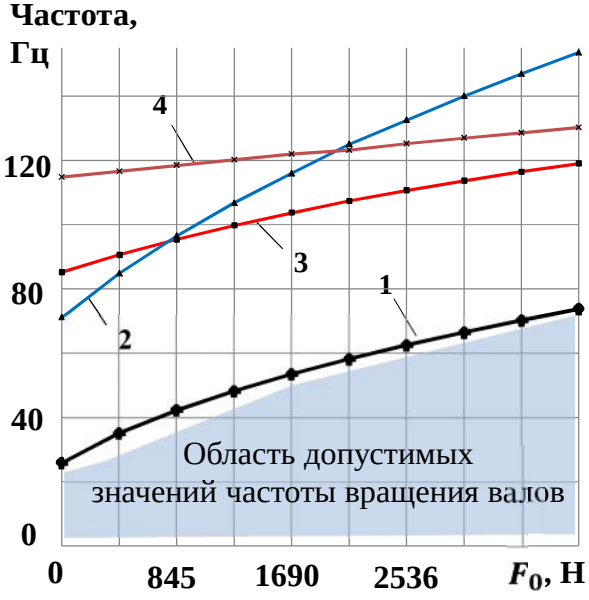


Рис. 7. Зависимость спектра частот колебаний пильного полотна от усилия центрального натяжения F_0. 1-первая, 2-вторая, 3-третья, 4- четвертая форма

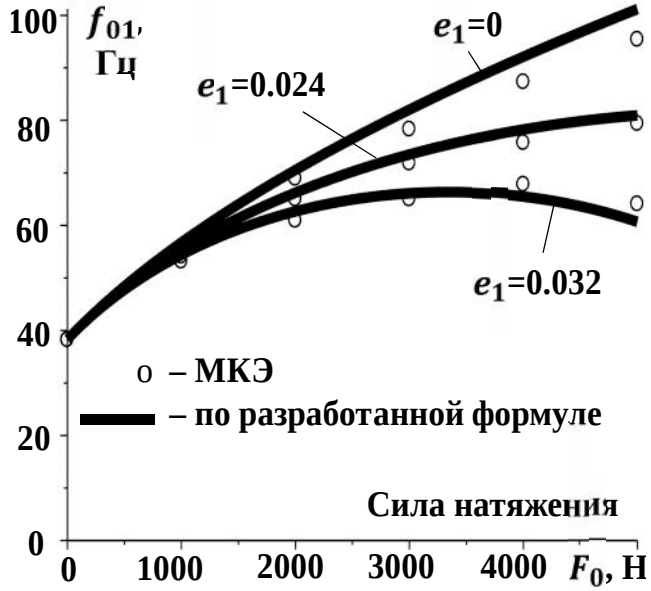


Рис. 8. Зависимость низшей собственной частоты колебания полотна от силы натяжения F_0 при различных значениях эксцентриситета e_1

В третьем пункте главы проанализированы динамические характеристики пильного модуля, в частности - зависимость спектра частот собственных колебаний полотна от усилия его натяжения (Рис. 7).

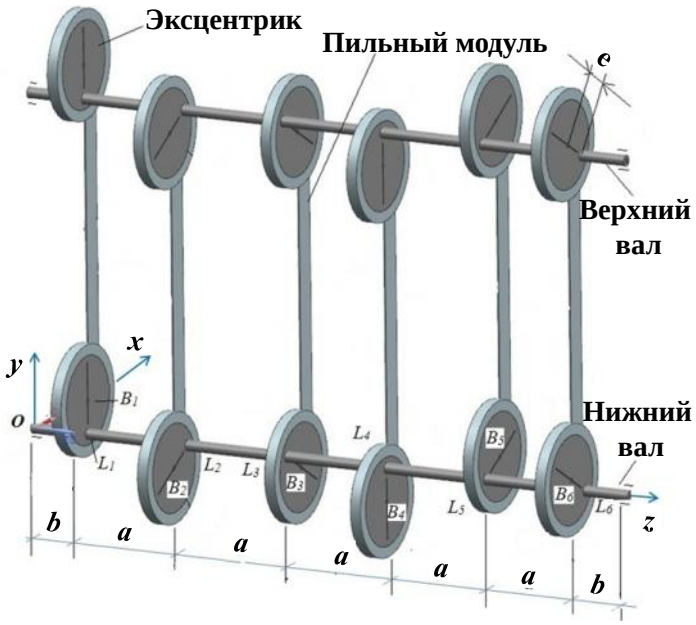


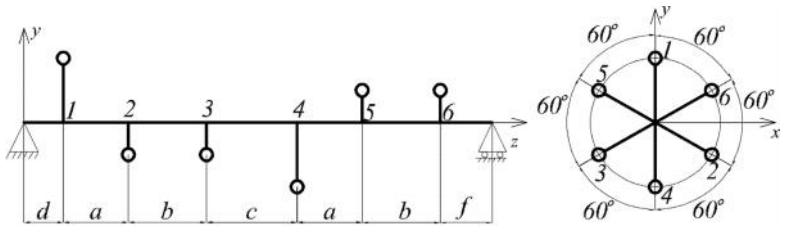
Рис. 9. Схема пильного блока

Наиболее важной является низшая (первая) собственная частота колебания пильного полотна f_{01}. Ограничение для отстройки резонансных режимов пильных полотен представлено в виде: $n \leq 60 \cdot f_{01}$ [об/мин]. С целью повышения производительности станка, следует максимизировать значение низшей частоты колебания f_{01}. Разработана аналитическая формула для автоматизированного расчета собственной частоты колебания пильного полотна в зависимости от силы натяжения F_0 и эксцентриситета e_1 (Рис. 8.).

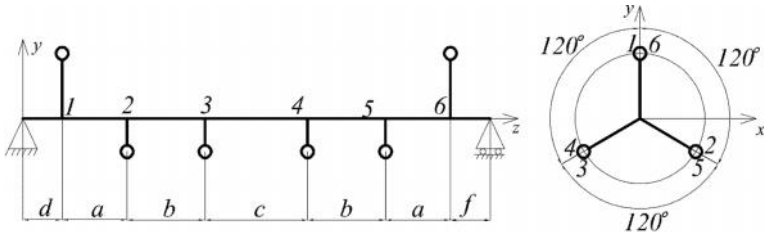
Для расчета пильного полотна на прочность, жёсткость и долговечность используются стандартные методики.

При рассмотрении задачи уравновешивания пильного блока, состоящего из 6 пильных модулей (Рис. 9), найдены три самоуравновешенных варианта конструкции ПБ (Рис. 10). Исследование методом конечных элементов показало, что схема 3 является наиболее рациональной схемой по критерию минимальных прогибов.

а) схема 1 – существующий образец



б) схема 2



в) схема 3 - рациональная схема

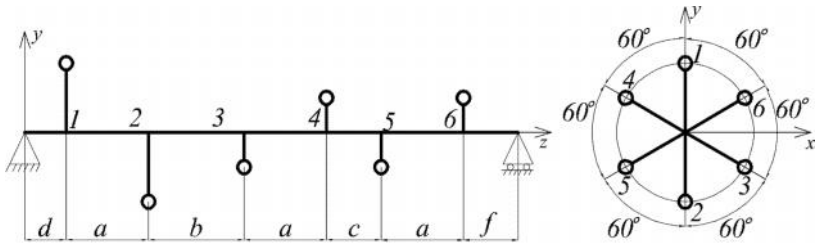


Рис. 10. Три варианта самоуравновешенных валов для пильного модуля

Четвёртая глава посвящена описанию математической модели ПБ и методу визуального интерактивного анализа, предназначенному для автоматизированного исследования многокритериальной модели и поддержки принятия решений при проектировании наукоемкого изделия.

Таблица 1.

Управляющие параметры

Обозн.	Исх. обозн.	Мин. Знач.	Макс. Знач.	Разм.	Назначение
α_1	e	0.03	0.035	м	Эксцентриситет кругового движения
α_2	b	0.06	0.1	м	Ширина пильных полотен
α_3	t	1	2	мм	Толщина пильного полотна
α_4	e_1	0	0.08	м	Эксцентриситет натяжения
α_5	h_b	0.1	0.2	м	Расстояние h_b
α_6	m_b	0	1	кг	Масса противовеса
α_7	F_0	500	2000	Н	Величина силы натяжения
α_8	n	2000	3000	об/мин	Частота вращения валов

На основе соотношений, разработанных в третьей главе, создана комплексная математическая модель ПБ. Модель позволяет в достаточной мере

описать функциональные характеристики станка. Она содержит 8 управляющих параметров, 9 функциональных ограничений и 9 критериев качества (Таблица 1÷Таблица 3). Модель включает в себя формулы и алгоритмы, позволяющие по заданному вектору управляющих параметров автоматически провести вычисление всех критериев качества станка с учетом функциональных ограничений (Рис. 11).

Таблица 2.

Функциональные ограничения

Обозн.	огран.	Назначение
f_1	≤ 0	Условие для отстройки резонансных режимов полотен
f_2	≥ 0	Условие устойчивости плоской формы пильного полотна под действием инерционных сил при рабочей частоте вращения
f_3	≤ 0	Условие балансировки пильного модуля
f_4	≥ 0	Условие на величину силы натяжения полотна
f_5	≥ 0	Условие прочности полотна
f_6	≥ 0	Условие долговечности полотна
f_7	≥ 0	Условие жесткости полотна
f_8	≥ 0	Условие устойчивости плоской формы полотна при пилении
f_9	≥ 0	Условие на величину собственной частоты колебания

Таблица 3.

Критерии качества

Обозн.	Разм.	Назначение
$Ф_1$	кг	Суммарная масса полотна и противовесов
$Ф_2$	м	Габаритный размер
$Ф_3$	Гц	Собственная частота колебания пильного модуля
$Ф_4$	об/мин	Критическая частота вращения валов
$Ф_5$	Н	Сила натяжения полотна
$Ф_6$	об/мин	Рабочая частота вращения
$Ф_7$	Н	Устойчивая способность полотна при резании
$Ф_8$	Н/мм	Начальная жесткость полотна
$Ф_9$	мм	Толщина полотна

Для управления процессом многокритериального проектирования ПБ с целью нахождения рациональных согласованных решений, удовлетворяющих требованиям всех участников ЖЦ станка, автором предложен метод визуально-интерактивного анализа. Основная идея метода заключается в использовании современных методов однокритериальной оптимизации в качестве инструмента для нахождения допустимых решений многокритериальной проблемы.

МВИА включает следующие шаги (Рис. 11 и Рис. 12):

1. Формирование диапазонов управляющих параметров [minα_i, maxα_i]; функциональных ограничений и критериев качества $Ф_i$, i =1…*M*. Где *M* – количество критериев качества.
2. Решение задачи однокритериальной оптимизации для каждого критерия отдельно, и нахождение предельных наихудших MAX$Ф_i$ и наилучших MIN$Ф_i$

значений. Для удобства, максимизируемые значения критериев берутся с отрицательными знаками.

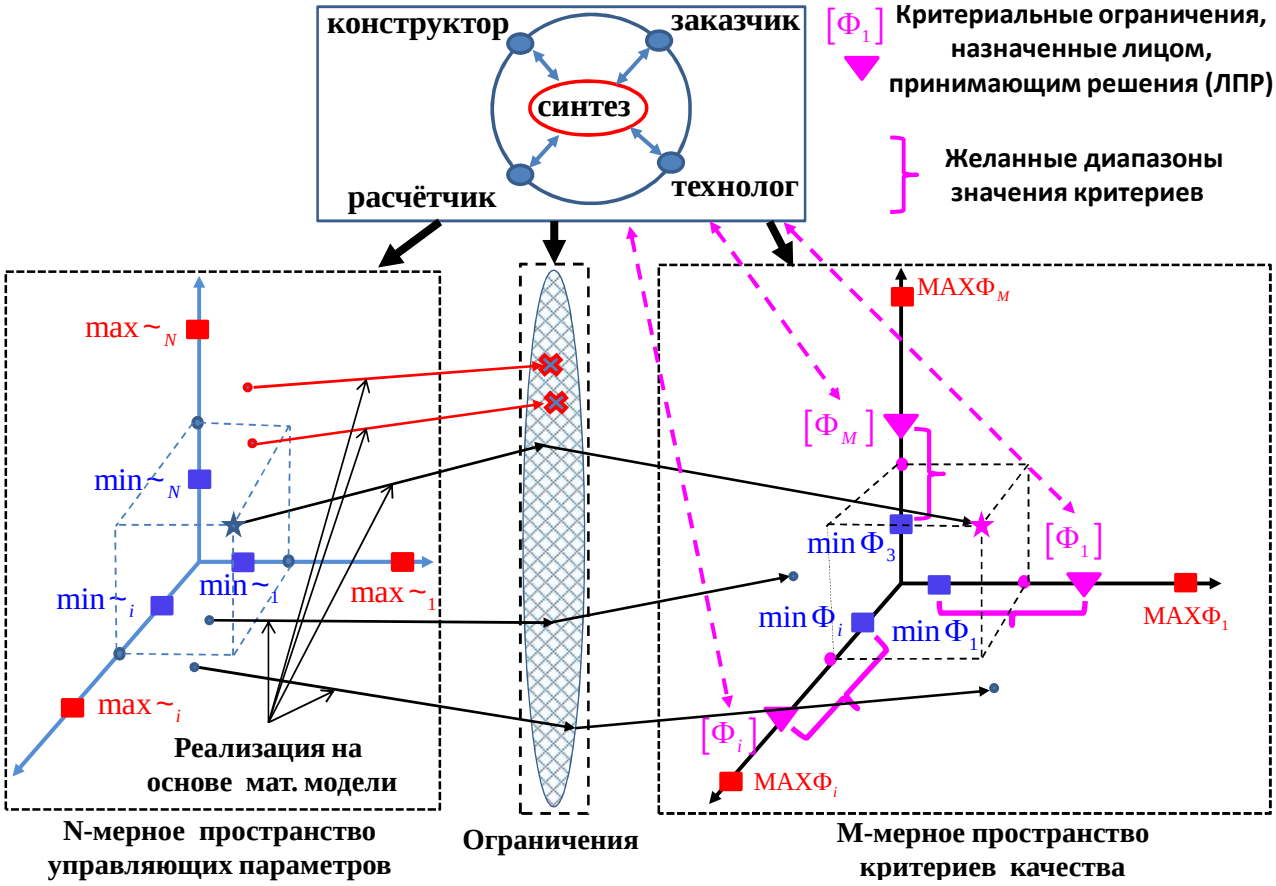


Рис. 11. Модель многокритериального синтеза ЖЦ пильного блока станка

3. Определение порядка значимости критериев.
4. Назначение в порядке значимости ограничений для критерия [Φ_i] лицом, принимающим решение (ЛПР) и решение задачи однокритериальной минимизации для всех оставшихся менее значимых критериев.
5. Проверка, удовлетворяют ли найденные минимальные значения $\min\Phi_i$ оставшихся критериев требованиям специалистов. Если нет, делается уступка для назначенного критерия. Если да, то назначается ограничение для последующего критерия.

Значение критериев								
	$МАХФ_1$	$МАХФ_2$		$МАХФ_i$		$МАХФ_{M-1}$	$МАХФ_M$	Предельные наихудшие значения
	...	...		...		...	...	
	$[Ф_1]$	$[Ф_2]$		$[Ф_i]$		$[Ф_{M-1}]$	$[Ф_M]$	Критериальные ограничения [Φ_i], назначенные ЛПР
	...	...	...		...	...	...	
Направление улучшения	$\min Ф_1$	$\min Ф_2$		$\min Ф_i$		$\min Ф_{M-1}$	$\min Ф_M$	Лучшие значения критериев с учетом критер. ограничений
	...	...		...		...	...	
	$МИНФ_1$	$МИНФ_2$		$МИНФ_i$		$МИНФ_{M-1}$	$МИНФ_M$	Предельные наилучшие значения

Критерия качества

Рис. 12. Интерактивная таблица. Максимизируемые значения критериев берутся с отрицательными знаками

6. Повторяются шаг 4 и 5 до задания ограничений для (M-1) критериев.

7. На основе заданных (*M*-1) критериальных ограничений, находятся рациональные согласованные решения.

Использование МВИА предоставляет следующие возможности:

- Контроль информации об областях значений критериев и их изменении в процессе решения.
- Визуальное представление с помощью интерактивной таблицы, позволяющие оценить «стоимость» улучшения одного из критериев, и его влияние на остальные критерия, значения которых могут ухудшаться.
- Помощь в выборе разумных критериальных ограничений, при которых существуют согласованные решения.
- Автоматический поиск рациональных решений, удовлетворяющих требованиям ЛПР.

Пятая глава посвящена процессу управления многокритериальным проектированием ПБ с использованием авторской программы «VIAM», реализованной на основе МВИА. Программа VIAM составлена на языке Maple и предназначена для автоматизированного исследования ПБ и поддержки принятия решений при его проектировании. На основе диапазонов управляющих параметров и функциональных ограничений, найдены предельные значения для каждого критерия, которые введены в интерактивную таблицу (Рис. 13 и Таблица 4).

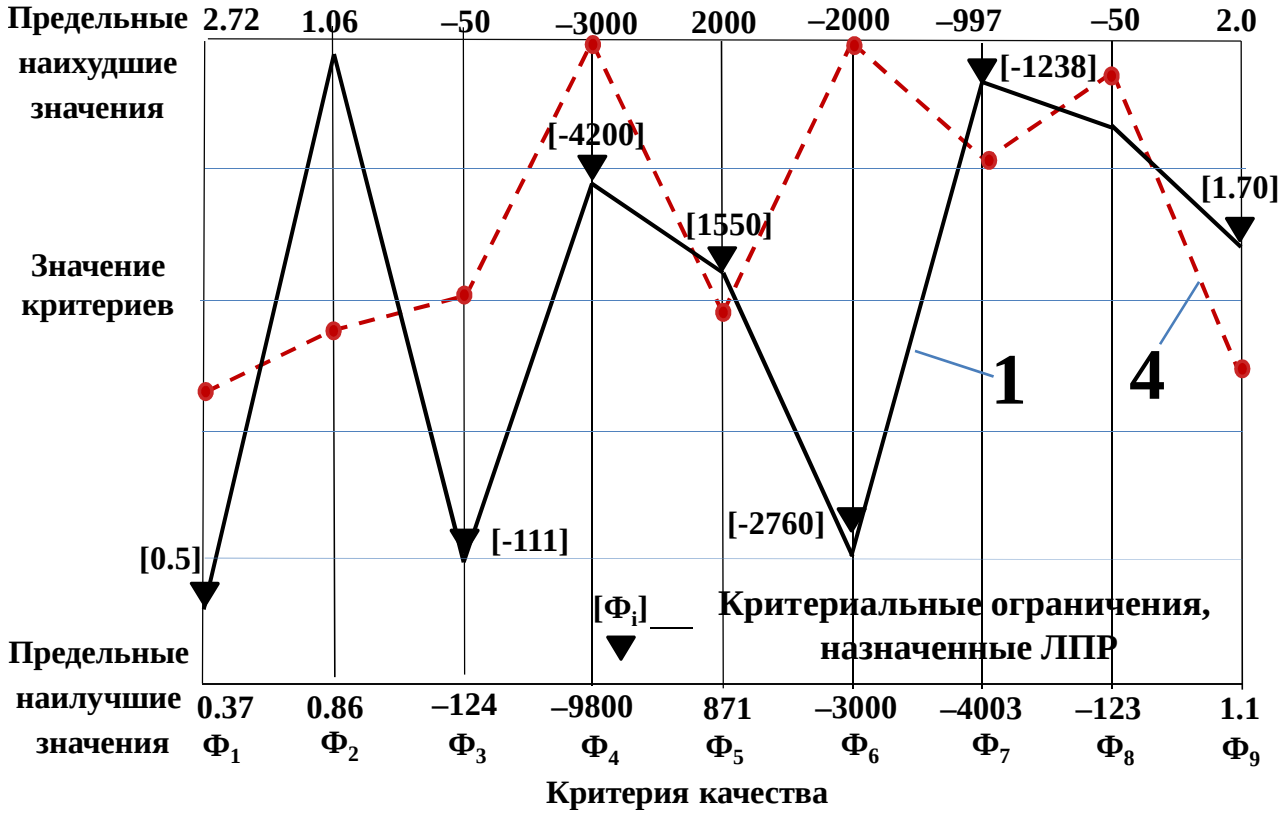


Рис. 13. Ситуации 1 – назначены пороговые значения для 7 критериев $\{\Phi_1, \Phi_3, \Phi_4, \Phi_5, \Phi_6, \Phi_7, \Phi_9\}$. 1 – ситуация 1, 4 – существующий станок

Для удобства сравнения, представлены значения критериев для существующего станка.

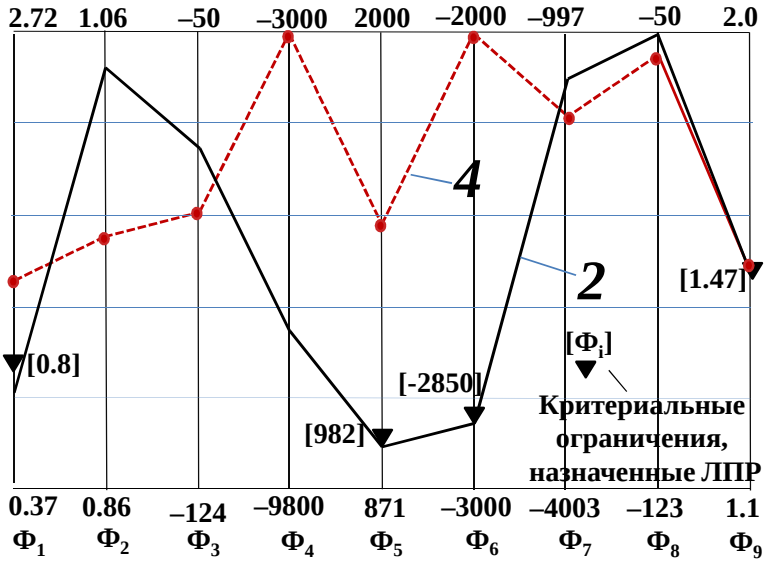


Рис. 14. Ситуации 2 – назначены ограничения для 4 криетерев $\{\Phi_1, \Phi_5, \Phi_6, \Phi_9\}$.

2–ситуация 2, *4*–существующий станок

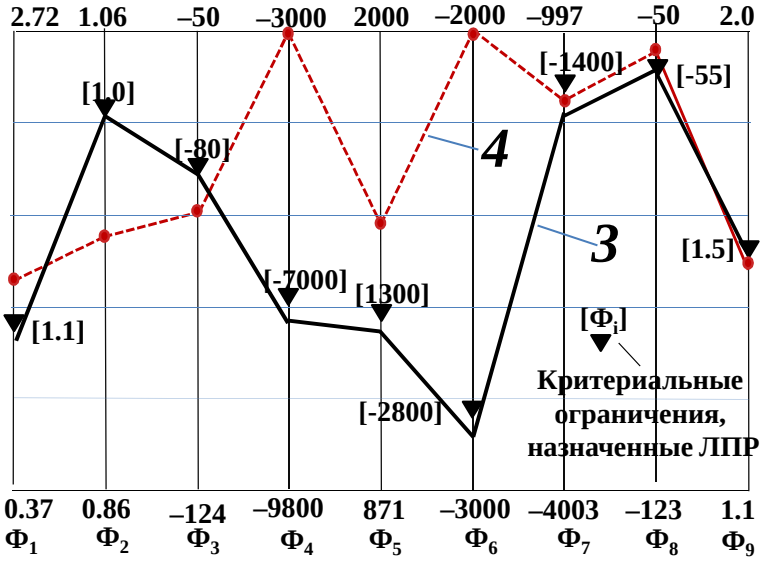


Рис. 15. Ситуации 3 – назначены ограничения для всех 9 криетерев.

3–ситуации 3, *4*–существующий станок

Сценарий в первой ситуации, предполагает, что на основе требования заказчика, специалистами выбраны 7 наиболее важных критериев $\{\Phi_1, \Phi_3, \Phi_4, \Phi_5, \Phi_6, \Phi_7, \Phi_9\}$, значения остальных критериев не ограничиваются. Решение осуществляется по изложенному выше методу визуально-интерактивного анализа. В процессе обсуждения, назначения критериальных ограничений и уступок, участвуют все эксперты. Найденное рациональное согласованное решение представлено на Рис. 13 и в Таблице 4. В Таблице 4 и на Рис. 14 ÷ Рис. 15 представлены рациональные решения по сценариям второй и третьей ситуации. Отличие от первой ситуации заключается в количестве рассмотренных критериев и значениях критериальных ограничений.

Таблица 4.

Рациональные согласованные решения в трех ситуациях

Варианты	*i*	1	2	3	4	5	6	7	8	9
MAXΦ_i		2,72	1,06	-50	-3000	2000	-2000	-997	-50	2
MINΦ_i		0,37	0,86	-124	-9800	871	-3000	-2000	-4003	1
Сущест. станок	α_i	0,030	0,08	1,47	0,04	0,160	0,50	1500	2000	-
	Φ_i	1,35	1,050	-90	-3047	1500,0	-2000,0	-1507	-55	1,47
Ситуация 1	α_i	0,030	0,060	1,70	0,002	0,200	0,07	1550	2798	–
	Φ_i	0,50	1,054	-111,6	- 4163	1550,3	-2798,3	-1238	-57,5	1,70
Ситуация 2	α_i	0,030	0,062	1,468	0,061	0,196	0,18	982	2852	–
	Φ_i	0,695	1,046	-79,1	- 7427	982,0	-2852	-1257	-50,2	1,47
Ситуация 3	α_i	0,033	0,079	1,47	0,058	0,151	0,31	1267	2862	–
	Φ_i	1,04	0,962	-80,0	- 7263	1267,9	-2861,7	-1584	-55,5	1,47

На Рис. 16 представлены диапазоны изменения управляющих параметров рациональных решений в пространстве параметров.

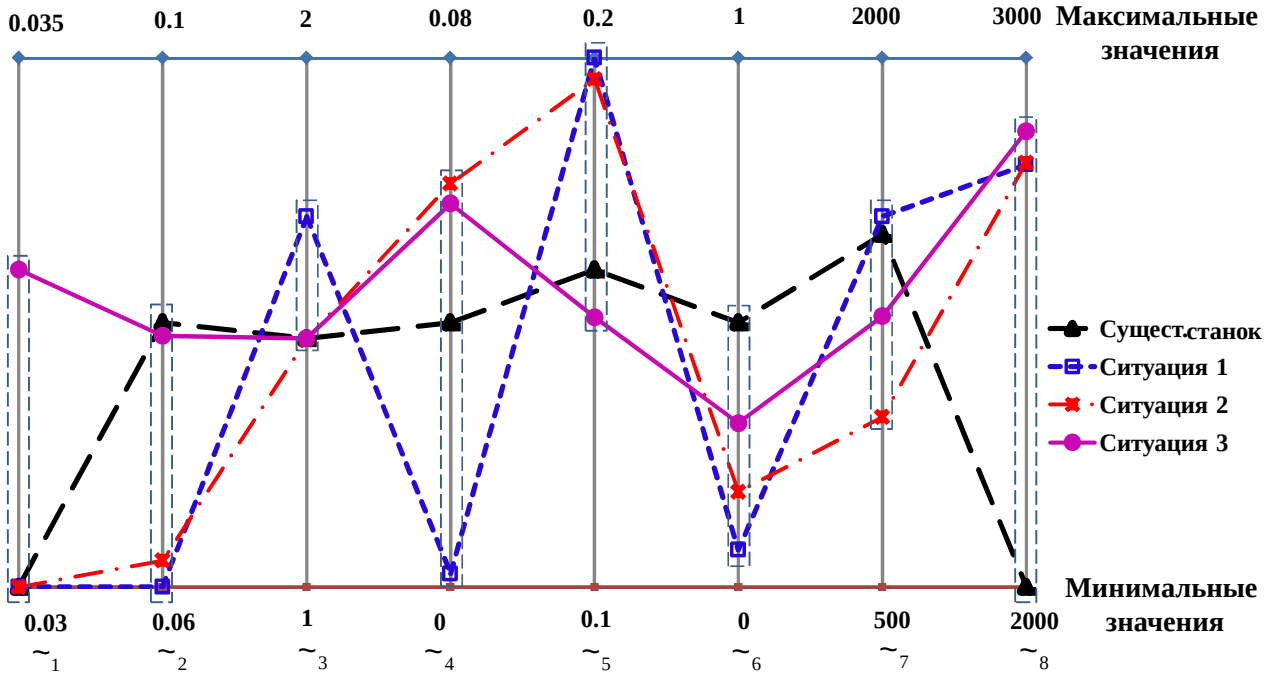
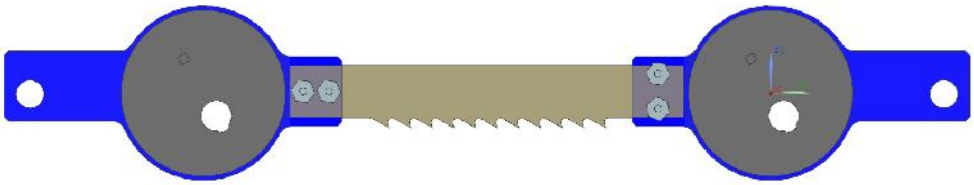


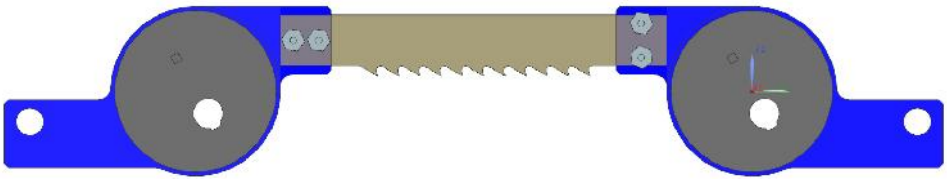
Рис. 16. Диапазоны управляющих параметров и рациональные параметры конструкции пильного модуля

Различные конструктивные схемы пильного модуля в соответствии с полученными решениями представлены на Рис. 17. Каждое решение соответствует одному из возможных вариантов изготовлений ПБ.

а) Решение в ситуации 1



б) Решение в ситуации 2

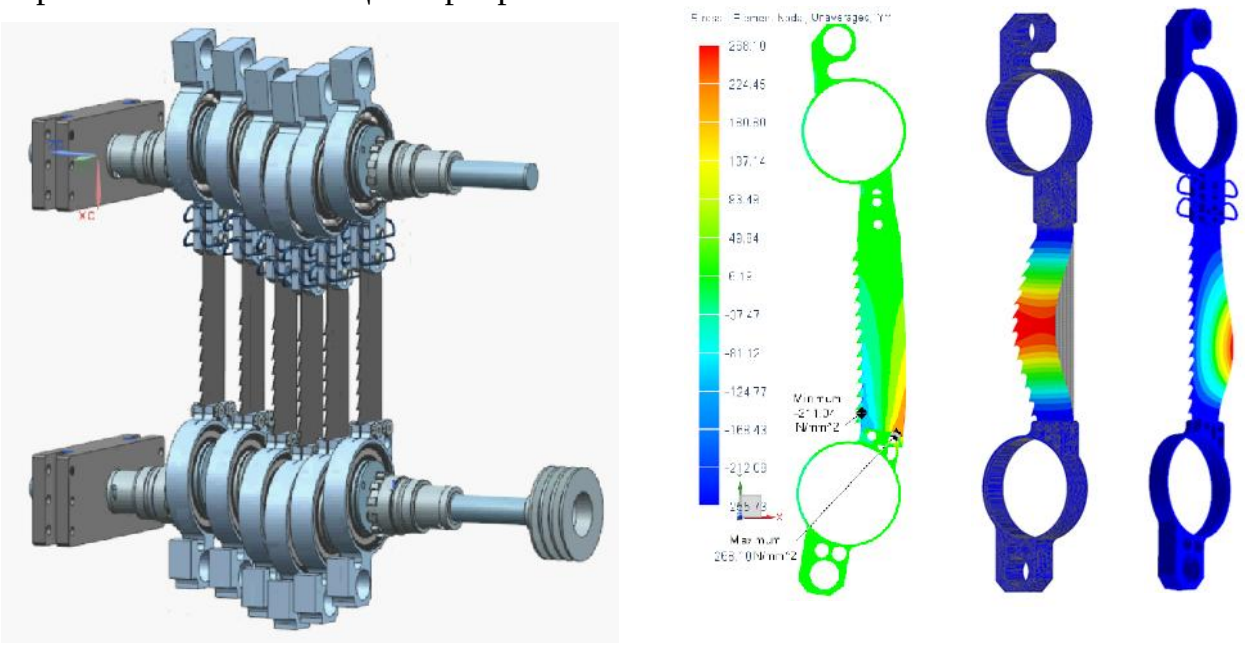


в) Решение в ситуации 3

Рис. 17. Различные конструктивные схемы пильного модуля в соответствии с полученными решениями

Для подготовки производства ПБ выбран ЛПР вариант 3. Конструирование ПБ реализовано в среде программного комплекса Unigraphics NX. На Рис. 18 приведены результаты расчета конструкции ПБ в среде программных комплексов - NX Nastran и АРМ WinMachine. Полученные результаты численных экспериментов подтверждают правильность и

преимущества полученных рациональных схем пильного модуля, разработанных с помощью программы VIAM.



а) б) в) д)

Рис. 18. Конструирование и анализ ПБ на основе полученных рациональных параметров в среде программного комплекса Unigraphics NX
а) 3D- модель, б) анализ напряженно-деформированного состояния,
в) расчет собственной частоты колебания, д) анализ устойчивости

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Создана комплексная методика автоматизированного управления процессом принятия решений при многокритериальном проектировании наукоемких технических изделий на основе концепции ЖЦИ, обеспечивающая совместимость и интеграцию АСУТП, АСТПП и АСУП.
2. Применительно к задаче многокритериального проектирования и совершенствования конструкции пильного блока, разработана комплексная математическая модель, позволяющая автоматически рассчитывать на основе управляющих параметров проектирования основные функциональные ограничения и критерия качества лесопильного станка.
3. Достоверность математической модели подтверждена посредством сопоставления результатов результатами расчета тестовых задач с данными численного эксперимента.
4. Разработан метод визуально-интерактивного анализа, позволяющий определить и контролировать область допустимых значений критериев качества, оценить их взаимовлияние и указать рациональные критериальные ограничения, при которых существуют согласованные варианты конструкции изделия.
5. Разработанная методика автоматизированного управления процессом принятия решений при многокритериальном проектировании пильного

блока реализована в виде авторской программы визуально-интерактивного анализа, интегрированной с программным комплексом Unigraphics NX.

6. По результатам расчета, найдены рациональные варианты проектирования пильного блока и даны рекомендации по его совершенствованию.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендуемых в ВАК РФ

1. Гаврюшин С. С., Блохин М. А., Фунг Б. В. Анализ лесопильного станка с использованием виртуальной параметрической модели // Наука и Образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 12. С. 128–136. (0,9 п. л./0,3 п. л.).
2. Фунг Б. В., Гаврюшин С. С., Блохин М. А. Уравновешивание многопильного станка с круговым поступательным движением пильных полотен // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2015. № 12. С. 3–10. (0,9 п. л./0,3 п. л.).
3. Фунг Б.В., Данг М.Х., Гаврюшин С.С. Разработка математической модели для процесса управления жизненным циклом многопильного станка нового типа // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. №2. С.87-109. (1,1 п. л./0,4 п. л.).

В журналах, входящих в базы данных Web of Science и SCOPUS

4. Boundary of stability region of a thin-walled beam under complex loading condition / Phung Van Binh [et al.]. International Journal of Mechanical Sciences. 2017. V.122. P. 355-361. (0,8 п. л./0,2 п. л.).

Прочие публикации

5. Гаврюшин С. С., Фунг Б. В. Анализ лесопильного станка с использованием виртуальной параметрической модели // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред.: Тез. докл. XXI международного симпозиума им. А.Г. Горшкова. Кременки, 2015. С.49-50. (0,1 п. л./0,05 п. л.).
6. Фунг Б. В. Гаврюшин С. С.. Выбор рациональной уравновешенной схемы лесопильного станка с круговым поступательным движением пильных полотен // Материалы конференции МИКМУС. Тез. Докл. ИМАШ РАН. М., 2015. С. 34. (0,1 п. л./0,05 п. л.).
7. Гаврюшин С. С., Блохин М. А., Фунг Б. В. Исследование устойчивости и выбор рационального варианта балансировки станка // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Тез. докл. XXII международного симпозиума им. А.Г. Горшкова. Кременки, 2016. С.81-82. (0,1 п. л./0,03 п. л.).
8. Гаврюшин С.С., Прокопов В.С., Фунг В. Б. Автоматизация процесса проектирования многопильного станка с круговым поступательным движением пильных полотен // Международная школа молодых ученых и специалистов. МГТУ Станкин. М., 2016. С.36-39. (0,1 п. л./0,03 п. л.).
9. Фунг Б. В., Данг Х. М. Автоматизация и управление процессом проектирования пильного модуля многопильного станка // Труды XVI-ой конференции CAD/CAM/PDM. ИПУ им. В.А. Трапезникова. М., 2016. С.130. (0,1 п. л./0,05 п. л.).