

На правах рукописи

БУЙ ВАН ФЫОНГ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ АППАРАТОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ МОЙКИ
ОВОЩЕЙ И ФРУКТОВ**

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



АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: **Гаврюшин Сергей Сергеевич**
доктор технических наук, профессор кафедры компьютерных систем автоматизации производства, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Антуфьев Борис Андреевич**
доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов, динамики и прочности машин, Московский авиационный институт

Вересников Георгий Сергеевич
кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН

Ведущая организация: ФГБОУ ВО "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН"

Защита состоится « ____ » _____ 2021 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 « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., доцент



Богданов А. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В ряде развивающихся стран (включая Социалистическую Республику Вьетнам) работает большое количество малых и средних предприятий, испытывающих необходимость в автоматизации затратных и трудоемких процессов, связанных с мойкой овощей и фруктов. Автоматизация подобных процессов требует применения специализированных машин и аппаратов, среди которых следует выделить аппараты промышленной мойки (АПМ) овощей и фруктов. К настоящему времени для мойки овощей и фруктов применяются разнообразные машины и аппараты, отличающиеся конструктивным исполнением и использующие различные технологии.

Однако, в своем большинстве, эти аппараты не нашли широкого применения на предприятиях Вьетнама, поскольку представляют собой достаточно сложные механизмы, использующие озоновые, ультрафиолетовые, ультразвуковые технологии, применение которых весьма затратное и не считается рациональным при мойке тропических овощей и фруктов при наличии грязи и инсектицидов. К недостаткам аппаратов механического типа (линейных, вибрационных и барабанных) следует отнести завышенное энергопотребление и громоздкие габариты. Процесс проектирования подобных аппаратов представляет собой сложную комплексную проблему, требующую решения ряда задач, обусловленных необходимостью достижения требуемых функциональных характеристик АПМ. Для решения поставленной проблемы требуются искать новые современные подходы, предназначенные для автоматизации процессов разработки, проектирования и изготовления АПМ.

В современной машиностроительной промышленности проектирование и производство механических систем становится невозможным без использования PLM-технологий, обеспечивающих непрерывное управление информацией, характеризующей жизненный цикл продукции (ЖЦП). Концепция единого информационного пространства и информационная поддержка цифрового производства реализуется посредством использования *параллельного инжиниринга* (Concurrent Engineering), представляющего собой комплексный подход к конструированию и разработке механизмов. Данный подход позволяет различным проектным группам одновременно использовать проектную информацию, полученную на ранней стадии разработки изделия. Теоретические основы ЖЦП и цифрового производства представлены в работах отечественных и зарубежных исследователей (Соснин П.И., Смирнов А.В., Юсупов Р.М., Кондаков А.И., Грубый С.В., Овсянникова М.В., Скворцова, А. В., Sohlenius G., Reddy R., Prasad B. и др.). В настоящее время вопрос проектирования сложных технических устройств тесно связан с использованием коммерческих программных пакетов CAD/CAM/CAE – систем: Siemens NX (Siemens PLM Software), CATIA (Dassault Systemes.), UNIGRAPHICS (Electronics Data Systems), Pro/EngineER (Parametric Technology Corporation) и др.

Однако, непосредственное применение тяжелых CAD/CAM/CAE – систем к обсуждаемой проблеме ограничивается необходимостью покупки весьма дорогой лицензии использования и учетом большого количества специфических

требований. Альтернативным представляется подход, связанный с созданием узкоспециализированных методик и программ, позволяющий учесть в рамках единого информационного и функционального пространства требования, предъявляемые к АПМ на всех этапах ЖЦИ, и специфику используемых в АПМ узлов и деталей.

Учитывая вышеизложенного следует отметить, что создание прикладной методики автоматизированного проектирования, позволяющей создавать новое поколение аппаратов и технических устройств для мойки овощей и фруктов, удовлетворяющей требованиям конкретного потребителя, является **актуальной задачей**.

Целью настоящей диссертационной работы является разработка методики автоматизированного процесса, предназначенного для создания нового поколения аппаратов промышленной мойки овощей и фруктов.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие **задачи**:

1. Разработка концептуального проекта аппарата нового поколения для промышленной мойки овощей и фруктов в едином информационном пространстве.

2. Создание многокритериальной математической модели для проектирования основных узлов и деталей АПМ с учетом конкретных производственных условий.

3. Разработка алгоритма визуально-интерактивного метода (Visual Interactive Analysis Method – VIAM) для поддержки процесса принятия решений при многокритериальном проектировании конструкции АПМ.

4. Разработка прикладного программного обеспечения VIAT (Visual Interactive Analysis Tool – VIAT), реализующего метод VIAM при многокритериальном проектировании нового поколения АПМ овощей и фруктов.

5. Виртуальное прототипирование и верификация разработанного программного обеспечения.

6. Изготовление и тестирование нового поколения промышленного образца аппарата для мойки овощей и фруктов по найденным рациональным вариантам проектирования.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы в рамках системного подхода использовались: классические методы математического анализа, механики деформируемого твердого тела, теории механизмов и машин, компьютерное моделирование и программирование, метод интерактивного анализа, вычислительные методы, многопараметрический и многокритериальный подход, методы оптимизации, методы принятия решений.

Научная новизна:

1. На основе концепции единого информационного пространства и информационной поддержка цифрового производства разработана методика автоматизированного процесса создания нового поколения аппаратов промышленной мойки овощей и фруктов.

2. Создан новый модуль метода визуально-интерактивного анализа (VIAM-3) и авторское программное обеспечение (программа VIAT), позволяющие лицу

принимающему решение (ЛПР) автоматизировать процесс принятия решений при многокритериальном проектировании узлов и деталей АПМ.

3. Получены новые теоретические и экспериментальные результаты, описывающие взаимосвязь управляющих параметров проектирования и критериев качества, применительно к АПМ.

4. Спроектированы и изготовлены промышленные прототипы аппаратов для мойки овощей и фруктов, превосходящие по показателям качества современный технический уровень.

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. Предложена автоматизированная процедура проектирования АПМ нового типа для овощей и фруктов.

2. Создана многокритериальная обобщенная математическая модель, предназначенная для автоматизированного анализа узлов и деталей АПМ, описывающая основные функциональные характеристики механизма в едином информационном пространстве.

3. Разработаны программные модули многокритериального сопоставления и фильтрации найденных решений – VIAM-3 и VIAT, предоставляющие собой удобный и наглядный инструмент для принятия решения ЛПР.

4. Найденны рациональные варианты конструкции АПМ, позволяющие существенно повысить функциональные характеристики изделия и приступить к производству более качественной и конкурентоспособной продукции.

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 (2017, 2018, 2020); на Всероссийской научно-технической конференции «Ракетно-космические двигательные установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана (2018); на First National Symposium on Dynamics and Control, Viet Nam (2019); на International Symposium on Computer Science, Digital Economy and Intelligent Systems (CSDEIS), Moscow (2019); на Международной научной конференции «Фундаментальные и прикладные задачи механики», МГТУ им. Н.Э. Баумана (2019); на The Fourth International Conference of Artificial Intelligence, Medical Engineering, Education (AIMEE), Moscow (2020).

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 17 научных работ, из них 7 научных статей из Перечня международных научных изданий в системе Web of Science и Scopus, и 3 научные статьи из перечня ВАК РФ, общим объемом 10,1 п.л./2,72 п.л.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 161 наименования и приложения. Работа изложена на 173 страницах, содержит 103 рисунка и 25 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, приводятся постановка задач и краткая аннотация содержания работы по разделам, дана оценка новизны и практической ценности полученных результатов, сформулированы защищаемые положения.

В первой главе приведен обзор типичных процессов проектирования механизмов и современных тенденций проектирования в области машиностроения. Представлен обзор современных АПМ для овощей и фруктов, выделены нерешенные вопросы при разработке новых АПМ по требованиям малых и средних предприятий. Отмечена важность создания единого метода автоматизированного управления процессом построения и решения обобщенной математической модели на основе концепции PLM-технологии, обеспечивающего высокую совместимость и интеграцию автоматизированных систем.



Рис. 1. Процесс создания АПМ

Во второй главе предложена единая автоматизированная методика создания АПМ (Рис. 1). На основе анализа пожеланий заинтересованных сторон создан концептуальный проект аппарата. Выполнена параметризация узлов и деталей аппарата необходимая для определения параметров, используемых при создании их математических моделей при кинематическом, динамическом и прочностном расчетах. На основе концепции PLM-технологии рассмотрены все математические модели узлов и деталей АПМ в едином информационном пространстве и создана обобщенная математическая модель (ОММ).

В предлагаемом процессе основное внимание уделялось исследованию ОММ узлов и деталей АПМ с помощью авторского модуля визуально-интерактивного анализа VIAM-3 в общем пакете VIAM. Достоинства авторского модуля заключается в интеграции новой стратегии принятия решений и современного метода оптимизации, использующего генетический алгоритм (ГА). Взаимодействие программного алгоритма и лица принимающего решение (ЛПР) происходит в реальном времени по следующей схеме (Рис. 2):

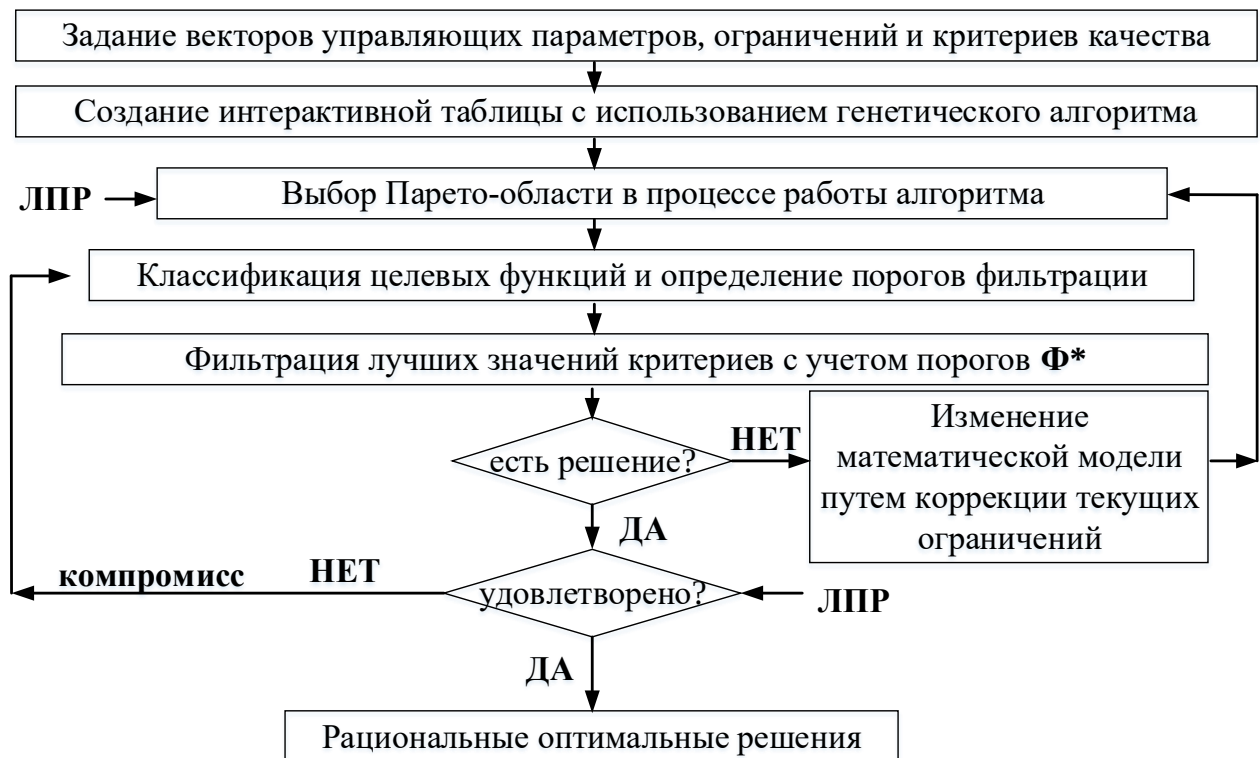


Рис. 2. Блок-схема модуля VIAM-3

На каждой итерации ГА выполняется специальная сортировка с целью определения максимально возможного (наихудшего) $MAX\Phi_i$ и минимально возможного (наилучшего) $MIN\Phi_i$ значений для каждого из критериев качества Φ_i . Для работы с разными функциями на одном уровне точности используется операция обезразмеривания:

$$|\Phi_i| = \frac{\Phi_i - MAX\Phi_i}{MAX\Phi_i - MIN\Phi_i}, \quad i = 1..n, \quad (1)$$

где: n – количество критериев качества, $0 \leq |\Phi_i| \leq 1$.

В процессе работы ГА выбор текущей области Парето-решений осуществляется ЛПР на основе анализа распределения решений, представленного в форме графика (Рис. 3), на котором $|\Phi_i|^{+}$ и $|\Phi_i|^{-}$ соответствуют наилучшему и наихудшему значениям i -того критерия качества.

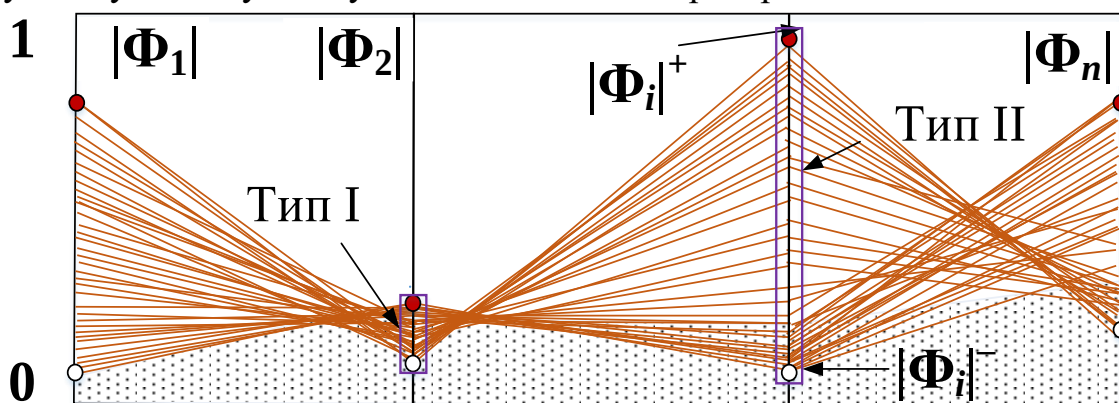


Рис. 3. Классификация целевых функций

Принятые критерии субъективно разделяются на критерии 1 и 2 типов согласно соотношениям:

$$\begin{cases} |\Phi_i|^I \Leftrightarrow |\Phi_i|^+ - |\Phi_i|^- \leq 0.2 \\ |\Phi_i|^II \Leftrightarrow |\Phi_i|^+ - |\Phi_i|^- > 0.2 \end{cases} \quad (2)$$

В задаче многокритериальной оптимизации наилучшие значения критериев 1-го типа обычно сопровождаются наихудшими значениями критериев 2-го типа. Одновременный выбор всех наилучших значений критериев является весьма затруднительным, а в ряде случаев даже невозможным. Компромисс заключается в существенном улучшении решений для критериев $|\Phi_i|^II$, изменяющихся в широком диапазоне, за счет приемлемого ухудшения решений для критериев $|\Phi_i|^I$, изменяющихся в узком диапазоне, путем установки целевых порогов Φ^* для фильтрации результатов:

$$\begin{cases} \Phi^{I*} = |\Phi_i|^+ \\ \Phi^{II*} = \frac{|\Phi_i|^+ + |\Phi_i|^-}{\zeta}, \zeta \geq 2 \end{cases} \quad (3)$$

Процесс фильтрации решений автоматически выполняется путем принятия ЛПР решений, находящегося ниже установленных целевых порогов (Рис. 4):

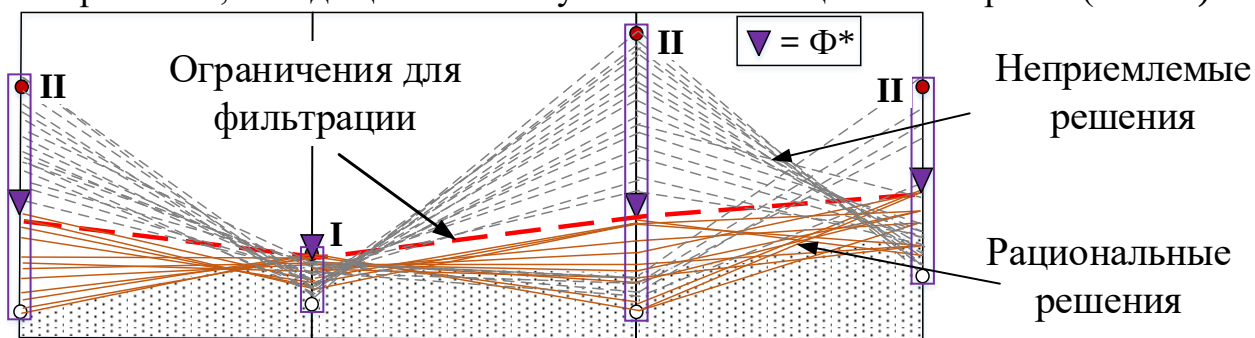


Рис. 4. Иллюстрация приема фильтрации

- При существовании решений и согласия ЛПР, можно переходить к заключительному этапу;
- Если существующие решения не удовлетворяют требованиям ЛПР, порог критериев 2-го типа снижается до тех пор, пока не будут получены приемлемые согласованные решения;
- Если после установки всех необходимых целевых порогов решения не найдены, вносятся изменения в математическую модель и/или проводится коррекция ограничений. Рассчитываются новые Парето-области, и процесс фильтрации наилучших решений повторяется, пока не будут получены приемлемые согласованные решения.

На основе полученных согласованных решений с помощью модуля VIAM-3 можно проанализировать правильность задания диапазонов изменения управляющих параметров и провести их коррекцию.

В третьей главе представлен процесс создания концептуального проекта АПМ, отвечающей требованиям малых и средних предприятий. Для выполнения

требований проектирования были созданы деревья целей главных компонентов АПМ (Рис. 5), с помощью которых определены различные варианты узлов и деталей аппарата.

С учетом требований и ограничений проектирования были проанализированы различные концептуальные варианты АПМ (Рис. 6 и Рис. 7). С точки зрения экономики и технологичности, в качестве основного варианта проектирования аппарата был выбран вариант 4.



Рис. 5. Схема дерева целей для определения компонентов АПМ

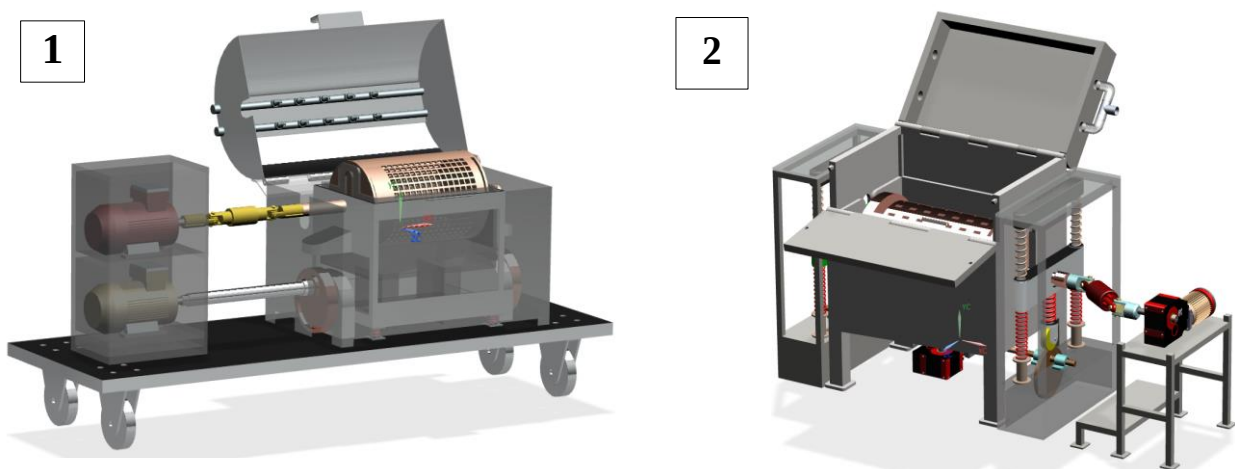


Рис. 6. Концептуальные варианты конструкции АПМ (сочетание вертикального и вращательного движения барабана)

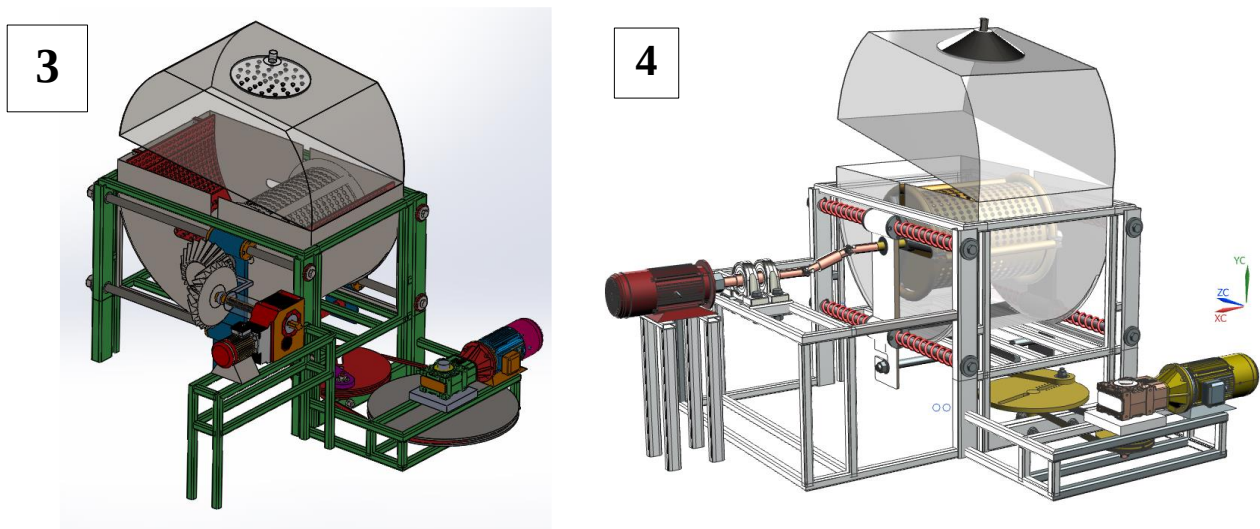


Рис. 7. Концептуальные варианты конструкции АПМ (сочетание горизонтального и вращательного движения барабана)

Разрабатываемый АПМ должен отвечать заданным критериям качества мойки, энерго- и водопотребления, стоимости и др. Кроме того нужно обеспечить выполнение технологических и прочностных требований. На Рис. 8 представлена диаграмма «Требования – Объекты – Параметры», созданная для параметризации узлов и деталей АПМ.

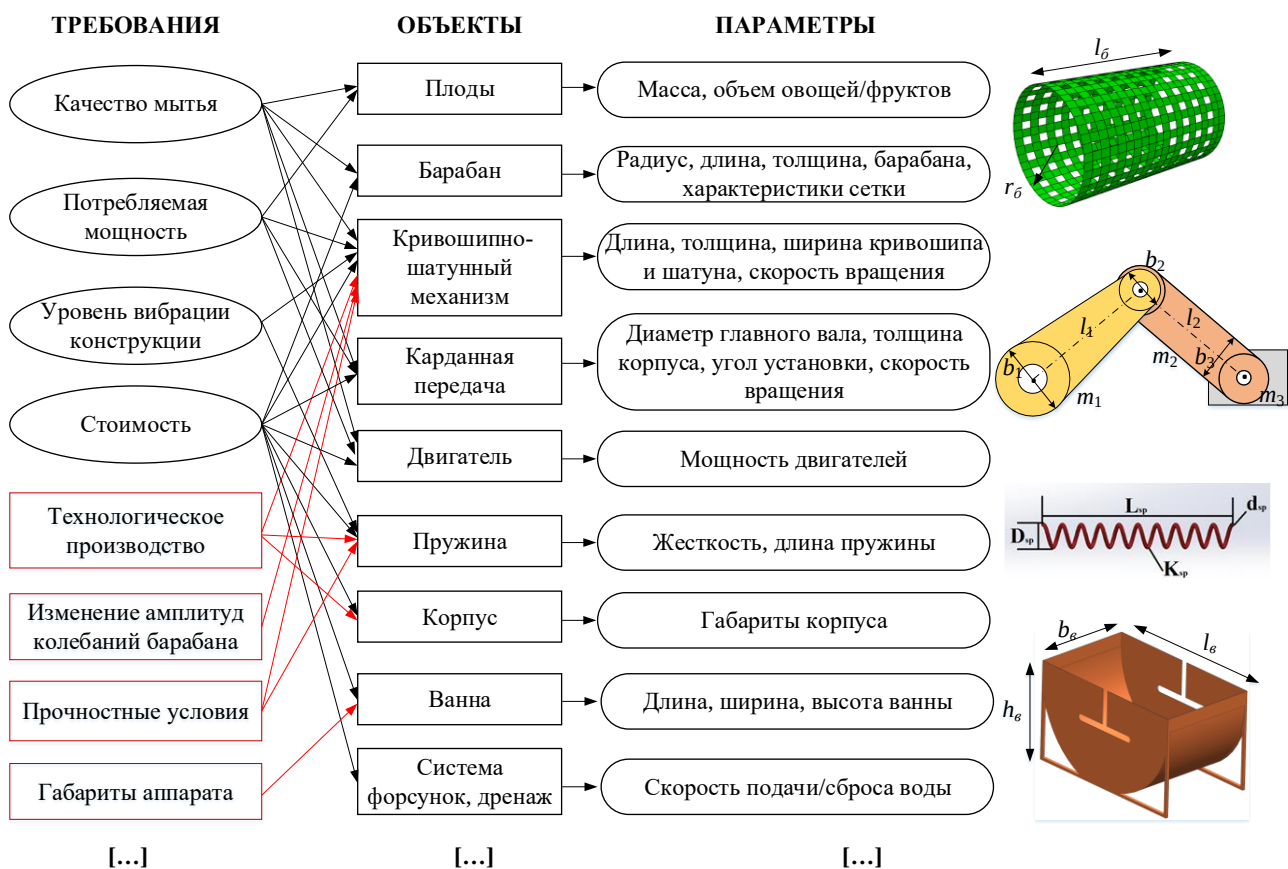


Рис. 8. Параметризация узлов и деталей АПМ

Основными узлами и компонентами АПМ являются кривошипно-шатунный механизм, карданная передача, упругие элементы, двигатель.

Поэтому при создании обобщенной математической модели этим элементам отдавался наивысший приоритет. С учетом конкретных производственных условий были созданы две различные конфигурации АПМ. В первом случае, когда требования качества и производительности аппарата обладают более высоким приоритетом, чем стоимость, создана 1-я конфигурация АПМ (Рис. 9.а). 2-я конфигурация АПМ (Рис. 9.б) создана для последующего использования в образовательном процессе обучения. В этом случае приоритет отдан критериям стоимости и габаритных размеров.

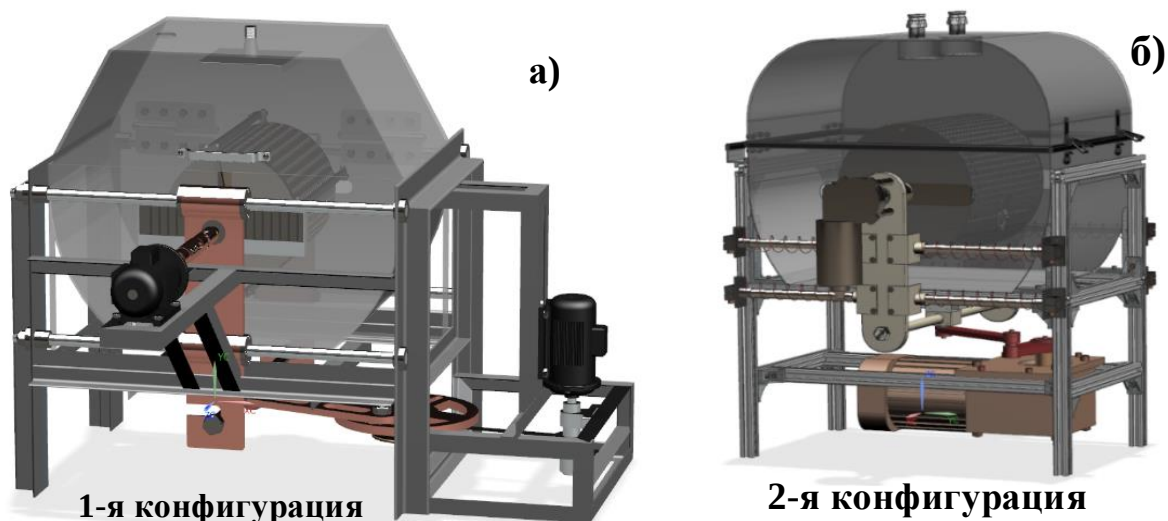


Рис. 9. Конфигурации нового типа АПМ овощей и фруктов

Четвертая глава посвящена многокритериальному проектированию системы главного привода (СГП) 2-ой конфигурации АПМ (Рис. 10). Задача синтеза привода формулируется на основе многопараметрического и многокритериального подхода, согласно которому параметры, характеризующие изделие делятся на три группы: управляющие параметры, неизменяемые параметры и критерии качества.

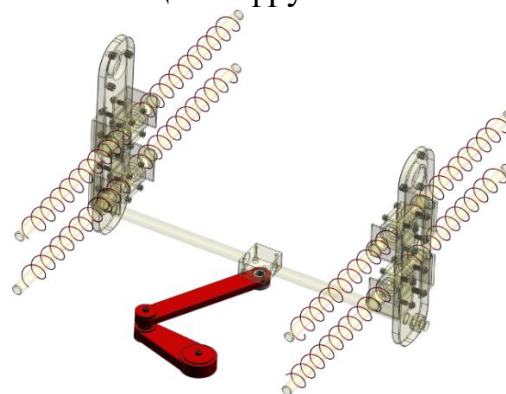


Рис. 10. Главный привод АПМ

На основе концепции жизненного цикла созданы кинематическая, динамическая и прочностная модели деталей СГП и с учетом ограничений по геометрии, технологичности и сборки. На Рис. 11 приведена динамическая модель кривошипно-шатунного механизма (КШМ). Расчет динамических характеристик механизма, проведенный в аналитической форме, позволяет существенно упростить процесс автоматизированного проектирования АПМ. Проведенный анализ показал, что рациональный выбор жесткости пружины K значительно снижает динамическую реакцию в шарнирах и уменьшает требуемую мощность двигателя.

На Рис. 11 используются следующие обозначения: $X_{O/A/B}$, $Y_{O/A/B}$ – составляющие компоненты динамических реакций в шарнирах O , A , B по координатным осям x и y , соответственно; N_1 , N_2 – сжимающие нагрузки в

шарнире A кривошипа и шатуна, соответственно; T – сила изгиба в шарнире A кривошипа; $\varphi(t)$ – угол поворота; M – крутящий момент двигателя.

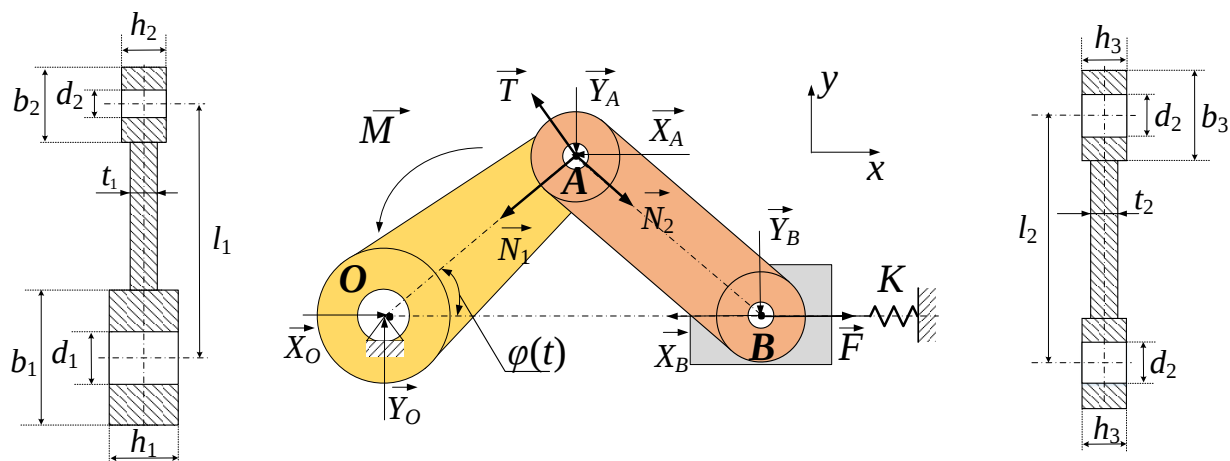


Рис. 11. Расчетная модель главного привода АПМ

Математическая модель для расчета прочности СГП создана с целью обеспечения прочностной надежности аппарата. Детали КШМ (кривошип OA и шатун AB) при работе подвергаются действию переменных как по величине, так и по знаку механических нагрузок. Закон изменения нагрузок носит периодический характер, период которого равен периоду изменения усилия сопротивления F . В зависимости от условий работы деталей КШМ и режима работы АПМ в целом характер этих периодических изменений может быть разнообразным. Поэтому при прочностном расчёте СГП выбиралась наиболее опасная комбинация возможных нагрузок.

На основе аналитических соотношений динамической и прочностной моделей с учетом заданных была создана обобщенная математическая модель главного привода АПМ в едином информационном пространстве. Модель включает 11 управляющих параметров, 8 групп функционального ограничения и 3 критерия качества (Таблица 1-Таблица 3).

Таблица 1.

Управляющие параметры

Обозначение	Параметр	Размер	Описание
α_1	$t_1 = [3..30]$	мм	Толщина кривошипа
α_2	$t_2 = [3..30]$	мм	Толщина шатуна
α_3	$K = [0..100]$	Н/м	Жесткость пружины
α_4	$b_1 = [30..100]$	мм	Ширина нижней головки кривошипа
α_5	$b_2 = [30..100]$	мм	Ширина верхней головки кривошипа
α_6	$b_3 = [30..100]$	мм	Ширина шатуна
α_7	$d_1 = [6..60]$	мм	Диаметр большого вкладыша кривошипа
α_8	$d_2 = [9..55]$	мм	Диаметр малого вкладыша кривошипа
α_9	$h_1 = [6..30]$	мм	Толщина большого вкладыша кривошипа
α_{10}	$h_2 = [6..30]$	мм	Толщина малого вкладыша кривошипа
α_{11}	$h_3 = [6..30]$	мм	Толщина вкладыша шатуна

Таблица 2.

Функциональные ограничения

Ограничения	Описание
f_1	Геометрические ограничения конструкции
f_2	Условия технологии изготовления и сборки
f_3	Условия прочности кривошипа и шатуна
f_4	Условия прочности на срез головки кривошипа и шатуна
f_5	Условия прочности на смятие шпонки
f_6	Условия прочности на срез шпонки
f_7	Условия усталости кривошипа и шатуна
f_8	Условия устойчивости кривошипа и шатуна

Таблица 3.

Критерии качества

Обозначение	Единица	Описание
$\Phi_1 \rightarrow \text{MIN}$	Вт	Требуемая мощность двигателя
$\Phi_2 \rightarrow \text{MIN}$	Кг	Масса КШМ
$\Phi_3 \rightarrow \text{MIN}$	Н	Максимальная динамическая реакция в шарнирах КШМ (фактор, вызывающий вибрацию)

Процесс многокритериального проектирования СГП осуществляется с помощью авторской прикладной программы VIAT (Рис. 12):

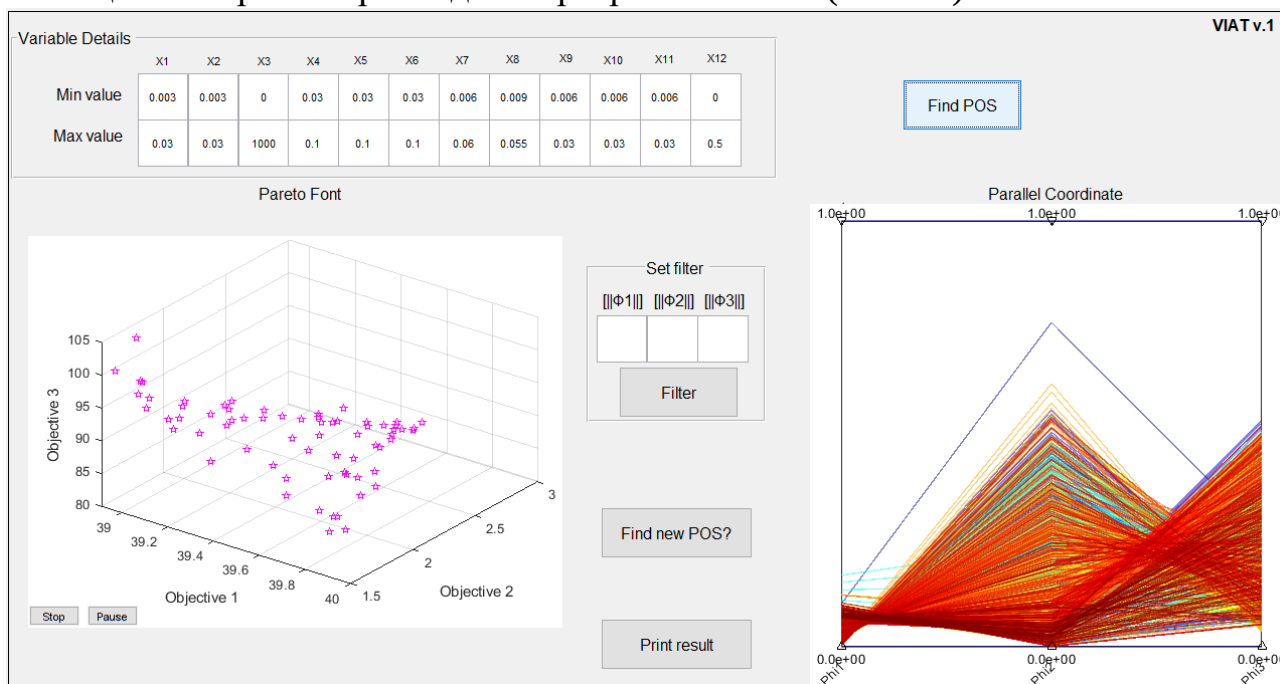


Рис. 12. Интерфейс авторской прикладной программы VIAT

Найденное решение обеспечило существенное улучшение качества АПМ, по сравнению с существующими конструкциями, разработанными с использованием традиционного метода проектирования (S0) и метода последовательных уступок (ПУ) (Рис. 13 и Таблица 4).

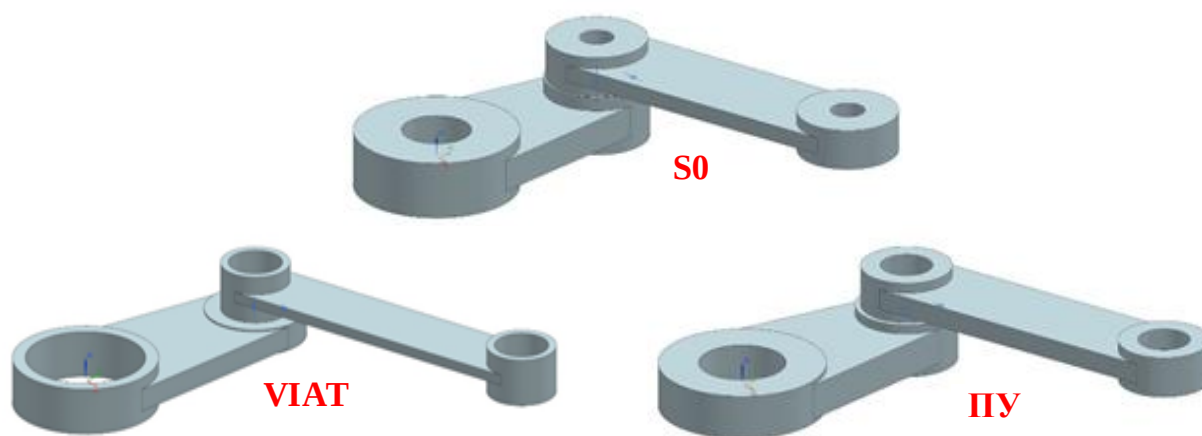


Рис. 13. Сравнение форм КШМ после оптимизации

Таблица 4.

Сравнение значений критериев качества оптимизации

Критерия	S0	ПУ	VIAT
Требуемая мощность двигателя Φ_1 , Вт	40,02	39,04	39,99
% (Φ_1)	-	-2,45	-0,09
Масса КШМ Φ_2 , кг	2,50	2,08	0,739
% (Φ_2)	-	-16,5	-70,4
Максимальная динамическая реакция Φ_3 , Н	120,8	99,66	81,46
% (Φ_3)	-	-17,5	-32,6

В пятой главе представлены результаты о изготовлении образцов нового поколения АПМ (Рис. 14), разработанных с учетом 2-х вышеуказанных производственных условий на Рис. 8. Образцы изготовлены при сотрудничестве с Индустриальным университетом им. Хошимина и Государственным техническим университетом им. Ле Куй Дона во Вьетнаме.



Рис. 14. Прототипы 2-х конфигураций АПМ

На Рис. 15 и Рис. 16 представлены результаты эксперимента АПМ с целью определения оптимальных режимов мойки (Таблица 5) проведенного на образцах бок-чой (Е1), водяного шпината (Е2) и моркови (Е3). Приведем сравнение характеристики разработанного аппарата и существующих аппаратов, которые имеют производительность в диапазоне меньше 60 кг/ч (Таблица 6).

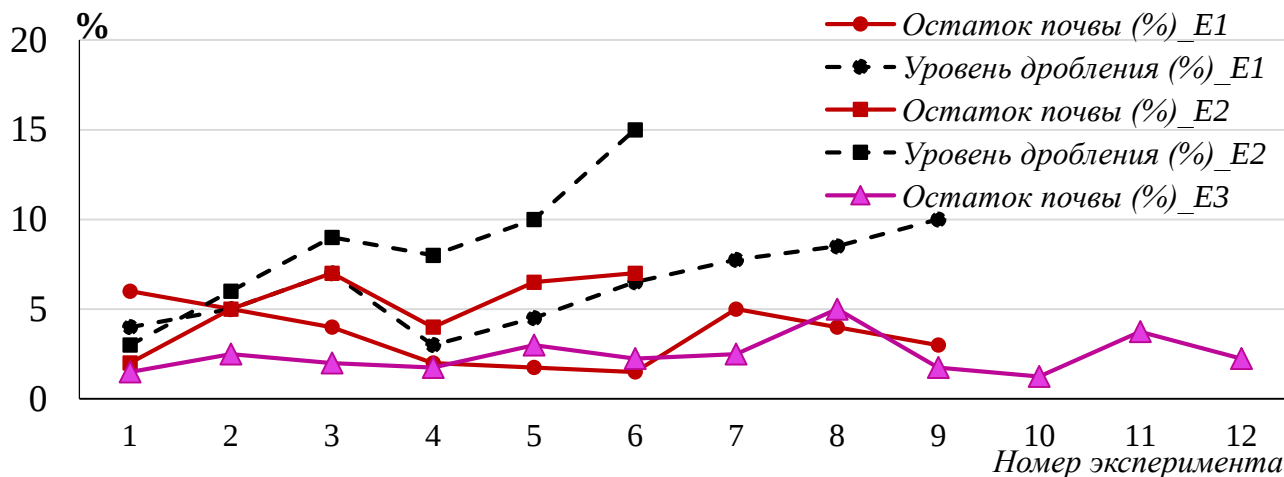


Рис. 15. Результаты эксперимента



а) Е1 (режима 4)

б) Е2 (режима 1)

в) Е3 (режима 10)

Рис. 16. Образцы овощей и фруктов после мойки

Таблица 5.

Оптимальные режимы мойки овощей и фруктов

Показатель	Бок-чой	Водяной шпинат	Морковь
Номер эксперимента (оптимальный режим)	4	1	10
Скорость вращения кривошипа (об/мин)	63	63	-
Скорость вращения кардана (об/мин)	15	10	57
Амплитуда горизонтального колебания (мм)	80	80	-
Расход воды (л/мин)	5,5	6,8	7,0

Таблица 6.

Сравнение характеристики разработанного аппарата с существующими аналогичными аппаратами

Показатель	T1-КУН (Россия)	LV300 (Италия)	Разработанный аппарат	
Производительность, кг/ч	30..60	10..40	30..40	
Расход воды, м ³ /ч	1	Н/У	0,33..0,42	
Мощность электродвигателя, кВт	0,4	1,1	0,02 (кардан)	0,2 (КШМ)
Частота вращения электродвигателя, мин ⁻¹	920	Н/У	90 (кардан)	120 (КШМ)
Габаритные размеры, мм	2000*980*1035	1500*900*850	1000*950*600	
Масса, кг	330	150	110	
Удельная мощность, кВт.ч/кг	0,00087	0,0275	0,00068	
Функциональность	мойки овощей	мойки овощей и фруктов	мойки + сушки овощей и фруктов	

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана комплексная методика автоматизированного управления процессом проектирования и производства аппарата промышленной мойки овощей и фруктов на основе концепции PLM-технологии, обеспечивающая совместимость и интеграцию автоматизированных систем различных этапов CAD/CAM/CAE/CNC.

2. Разработан авторский модуль визуально-интерактивного анализа (VIAM-3), реализующий стратегию компромисса для фильтрации Парето-оптимальных решений при многокритериальном проектировании АПМ.

3. В рамках концептуального проектирования разработана обобщенная математическая модель главного привода АПМ, объединяющая в едином информационном пространстве соотношения, полученные в рамках кинематической, динамической и прочностной моделей.

4. Реализована методика управления процессом принятия решений в виде интерактивного инструмента для ЛПР (авторская программа VIAT) при многокритериальном проектировании системы главного привода нового типа АПМ с целью нахождения наилучшего варианта проектирования.

5. Полученные результаты оптимизации описывают взаимосвязь управляющих параметров проектирования и критериев качества, применительно к главному приводу АПМ. Сравнение результатов, полученных с помощью разработанной методики, с существующей конструкцией и решением методом

последовательных уступок, показывает, что компромисс в виде снижения мощности (-0,09 %) позволяет значительно улучшить требования к снижению массы КШМ (-70,42%) и максимальной динамической реакции (-32,58%) в шарнирах данного механизма.

6. По результатам оптимизации спроектированы, изготовлены и проведены эксперименты на прототипах модификации аппарата промышленной мойки для подтверждения эффективности разработанной методики. Разработанный аппарат превосходит машины Т1-КУН и LV300 по удельной площади, удельному расходу энергии и функциональности.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕТАЦИИ

1. Dang H.M., Phung V.B., Bui V.P., Nguyen V.D. Multi-criteria design of mechanical system by using visual interactive analysis tool // Journal of Engineering Science and Technology, vol. 14(3), 2019, p. 1187-1199. (0,8 п. л./ 0,2 п. л.).

2. Phuong B.V., Gavriushin S.S., Minh D.H., Binh P.V., Duc N.V. Application of a novel model «Requirement – Object – Parameter» for design automation of complex mechanical system // Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer, Cham, vol. 1127, 2020, p. 375-385. (0,7 п. л./ 0,2 п. л.).

3. Nguyen T.T.N., Dang H.M., Nguyen T.M.H., Phung V.B., Bui V.P., Duc V.N. Dynamic analysis and multi-objective optimization of slider-crank mechanism for an innovative fruit and vegetable washer // Journal of Mechanical Engineering Research & Developments, vol. 43(2), 2020, p. 127-143. (1,1 п. л./ 0,4 п. л.).

4. Dang H.M., Bui V.P., Phung V.B., Gavriushin S.S., Nguyen V.D. PAMMS - Procedure for automation of mathematical modeling and solution of mechanical system: Application for the design of an innovative fruit and vegetable washer // Journal of Mechanical Engineering Research & Developments, vol. 43(3), 2020, p. 429-442. (0,9 п. л./ 0,2 п. л.).

5. Dang H.M., Bui V.P., Phung V.B., Nguyen V.D. Design, development and performance evaluation of a new-type fruit vegetable washer // Journal of Mechanical Engineering Research & Developments, vol. 43(4), 2020, p. 265-274. (0,7 п. л./ 0,2 п. л.).

6. Bui V. P., Gavriushin S. S., Dang H. M., Phung V. B., Nguyen V. D., Vu C. T. The impact of interactive visualization on trade-off-based decision-making using genetic algorithm: A case study // Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer, Cham, vol. 1315, 2021, p. 248-258. (0,7 п. л./ 0,2 п. л.).

7. Gavriushin S.S., Bui V.P., Phung V.B., Dang H.M., Nguyen V.D. Improving the visual interactive analysis method for automation and control of the decision-making process in multi-criteria design of complex mechanical systems // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, vol. 22(2), 2021, p. 104-112. (1,2 п. л./ 0,3 п. л.).

8. Буй В.Ф., Прокопов В.С., Гаврюшин С.С., Папазафеиропоулос Д. Топологическая оптимизация конструкции диска турбины при действии термомеханических нагрузок // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, №. 4(709), 2019, С. 60-70. (0,7 п. л./0,2 п. л.).

9. Буй В.Ф., Гаврюшин С.С. Фунг В.Б., Данг Х.М., Прокопов В.С. Динамический и прочностной анализ системы главного привода при проектировании моечной машины нового типа для овощей и фруктов // Инженерный журнал: наука и инновации, №.4(100), 2020, С. 1-17. (1,2 п. л./ 0,3 п. л.).
10. Буй В.Ф., Гаврюшин С.С. Фунг В.Б., Данг Х.М., Прокопов В.С. Автоматизация и управление процессом проектирования главного привода моечной машины нового типа для овощей и фруктов // Информационные технологии, № 1(27), 2021, С. 9-17. (1,4 п. л./ 0,3 п. л.).
11. Фунг В.Б., Буй В. Ф. Многокритериальное управление жизненным циклом лесопильного станка нового типа методом визуально-интерактивного анализа // Тез. докл. XXIII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. 2017. – М.: ООО «ТРП», 2017, С. 88-89. (0,1 п. л./ 0,05 п. л.).
12. Фунг В. Б., Буй В. Ф., Гаврюшин С.С. Метод визуально-интерактивного анализа для проектирования наукоемкого изделия // Тез. докл. XXIV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. 2018. – М.: ООО «ТРП», 2018, С. 220-222. (0,1 п. л./ 0,03 п. л.).
13. Буй В.Ф., Прокопов В.С., Гаврюшин С.С. Топологическая оптимизация аэродинамической конструкции средствами MATLAB и ANSYS APDL // Тез. докл. Всероссийской научно-технической конференции «Ракетно-космические двигательные установки». Сборник трудов конференции. Москва 2018. – М.: ИИУ МГОУ, 2018, С. 43-45. (0,1 п. л./ 0,03 п. л.).
14. Dang H.M., Bui V.P., Nguyen V.D., Phung V.B. Dynamic analysis and parametric optimization of an innovative fruit vegetable washer // First National Symposium on Dynamics and Control, Viet Nam, 2019, p. 250-254. (0,1 п. л./ 0,03 п. л.).
15. Dang H.M., Phung V.B., Bui V.P., Nguyen V.D. Automation of multi-criteria mathematical modeling: Application in design for a new type of frame saw machine // First National Symposium on Dynamics and Control, Viet Nam, 2019, p. 255-259. (0,1 п. л./ 0,03 п. л.).
16. Буй В.Ф., Гаврюшин С.С. и др. Динамический анализ кривошипно-ползунного механизма с пружиной, применяющегося в моечной машине нового типа для овощей и фруктов // Тез. докл. Международной научной конференции «Фундаментальные и прикладные задачи механики» (FAPM-2019). Москва. 2019. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020, С. 51-52. (0,1 п. л./ 0,02 п. л.).
17. Буй В.Ф., Гаврюшин С.С. Фунг В.Б., Данг Х.М., Данг В.Т. Обобщенная математическая модель кривошипно-шатунного механизма с пружиной, применяющегося в моечной машине нового типа для овощей и фруктов // Тез. докл. XXVI Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Вятчи. 2020. – М.: ООО «ТРП», 2020, С. 75-77. (0,1 п. л./ 0,02 п. л.).