

На правах рукописи



Корнилова Анастасия Андреевна

**СИНТЕЗ ЗАКОНОВ ДВИЖЕНИЯ РОБОТОВ И МЕХАТРОННЫХ
УСТРОЙСТВ ПО КРИТЕРИЯМ МИНИМИЗАЦИИ ПОТРЕБЛЯЕМЫХ
МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ**

2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель кандидат технических наук
Мацко Ольга Николаевна

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор
Мусалимов Виктор Михайлович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук, г. Санкт-Петербург
главный научный сотрудник

Кандидат технических наук
Сакович Сергей Юрьевич

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», г. Санкт-Петербург
доцент

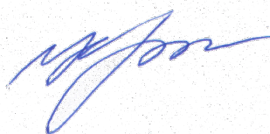
Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «1» марта 2024 года в 12:00 на заседании диссертационного совета У.2.5.4.16 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, главный корпус, аудитория 118).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://elib.spbstu.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан « _____ » _____ 2024г.

Ученый секретарь диссертационного совета



О.В. Кочнева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Проблемы снижения потребляемых мощности и энергии актуальны для всех машин и особенно для автономных роботов и мехатронных устройств, предназначенных, например, для работы в космосе, под водой или вдали от населенных пунктов и линий электропередач.

Универсальные способы снижения мощности и энергопотребления роботов и мехатронных устройств за счет снижения масс подвижных частей, сил сопротивления, в том числе и технологических, являются затратными. Современные машины с мехатронными приводами, позволяют реализовывать сложные законы движения, что является важным ресурсом снижения мощности и энергопотребления. Уменьшение мощности машины приводит к уменьшению массы и габаритов ее привода.

Степень разработанности темы исследования. Общий подход к синтезу законов движения разработан И.И. Артоболовским, Б.Н. Бежановым и В.Т. Бушуковым. Наиболее важные результаты в исследовании влияния закона движения на мощность привода получены И.Н. Исаевым, В.Г. Созоновым и И.И. Вульфсоном, которые определили условия обеспечения минимальной мощности при применении типовых законов движения привода. Исследования влияния характера нагрузки и параметров типовых законов движения на максимальную за цикл мощность и энергопотребление проведены О.Н. Мацко и А.В. Мосаловой. В научнотехнической литературе не обнаружено упоминаний о способе минимизации мощности за счет синтеза закона движения привода и выбора его параметров с учетом энергопотребления, а также ограничений на максимальные ускорения и скорости.

Объектом исследования являются законы движения привода роботов и мехатронных устройств с циклом: разгон – равномерное перемещение - торможение и преобладающими инерционными нагрузками.

Цель диссертационной работы - синтез законов движения привода роботов и мехатронных устройств с преобладающей инерционной нагрузкой, обеспечивающих минимизацию мощности и энергии при заданных перемещении, времени и ограничениях скорости и ускорения.

Основные задачи, решаемые в диссертации:

1. определение рационального способа снижения мощности и энергии, потребляемых приводом роботов и мехатронных устройств с преобладающей инерционной нагрузкой;

2. синтез безразмерного параметрического закона движения, обеспечивающего минимизацию потребляемых мощности и энергии при заданных ограничениях на максимальные скорости и ускорения привода роботов и мехатронных устройств с преобладающей инерционной нагрузкой;

3. исследование методами компьютерного моделирования зависимостей максимальных мощности скорости и ускорения и энергопотребления от параметров синтезированного закона движения привода роботов и мехатронных устройств.

Научная новизна

1. Способ снижения мощности, потребляемой приводом роботов или мехатронных устройств с преобладающей инерционной нагрузкой при заданных перемещении и времени, путем обеспечения ее постоянства с учетом ограничений на максимальные скорости и ускорения.

2. Доказано, что минимально возможная мощность, потребляемая приводом роботов или мехатронных устройств, составляет девять четвертых безразмерных единиц и имеет место при отсутствии движения с установившейся скоростью.

3. Установлено, что безразмерная энергия, потребляемая приводом роботов или мехатронных устройств при постоянной потребляемой мощности в процессе разгона, возрастает от одной второй до девяти восьмых безразмерных единиц при увеличении времени разгона от нуля до одной второй времени цикла.

4. Безразмерная параметрическая математическая модель закона движения привода для определения потребляемых мощности и энергии с учетом ограничений на максимальные скорости и ускорения, обусловленных временами разгона, нарастания и убывания ускорения.

5. Методика количественной оценки взаимного влияния максимальных за цикл мощности, скорости, ускорения выходного звена и энергопотребления при различных временах разгона, нарастания и убывания ускорения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Способ снижения мощности и энергозатрат привода роботов и мехатронных устройств с преобладающей инерционной нагрузкой.
2. Математическая модель закона движения привода для исследования условий и эффективности минимизации мощности и энергопотребления с учетом ограничений на максимальные скорости и ускорение.
3. Методика определения мощности и энергопотребления, максимальных ускорений и скоростей, а также оптимальных времен разгона, нарастания и убывания ускорения привода выходного звена.

Методы исследования. В работе использованы методы теоретической механики и математического анализа. Расчеты и численное моделирование законов движения приводов выполнены с использованием программного обеспечения Mathcad 15.

Практическая и теоретическая значимость диссертации. Результаты работы могут быть использованы для снижения мощности и энергопотребления новых и существующих машин, а также синтеза законов движения привода роботов и мехатронных устройств, в которых имеют место силы сопротивления различной природы.

Внедрение. Результаты внедрены в работе по договорам "Искусственный интеллект и принятие решений в технологии производства солнечных батарей" и "Разработка, сборка и испытания экспериментальной робототехнической системы для перемещения кассет с кремниевыми пластинами", в рамках программы Приоритет-2030. Подготовлено учебное пособие "Синтез оптимальных по критерию энергосбережения алгоритмов работы приводов роботов и технологических машин".

Достоверность полученных результатов обусловлена корректным применением методов теоретической механики, математического анализа и программирования.

Соответствие паспорту специальности. Способ синтеза энергосберегающих законов движения приводов роботов и мехатронных устройств, а также их исследование на математических моделях соответствует п.1, 4, 5 и 11 паспорта специальности 2.5.4. Синергетический эффект объединения компьютерного и микропроцессорного управления с механикой роботов соответствует п.3 паспорта специальности.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на трёх международных научно-практических конференциях "Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики IPDME-2018 и IPDME-2020" (СПб. РИНЦ), на научной конференции с международным участием "Неделя науки СПбПУ" (СПб. 2019).

Публикации по теме диссертации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 работах, в том числе в 3 изданиях, индексируемых в международных базах данных [1-3], в 4 публикациях в рецензируемых изданиях [4-7] и 3 учебных пособиях [8-10].

Личный вклад автора диссертации состоит в постановке задач исследования, разработке математических моделей, компьютерном моделировании и анализе его результатов, формулировании положений научной новизны, а также подготовке основных положений докладов и научных статей.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и перечня литературных источников. Ее объем составляет 130 печатных страниц текста включая 46 рисунков и 2 таблицы. Библиографический список содержит 158 источников, включая 27 в иностранных изданиях.

СОДЕЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении доказана актуальность исследования, оценена степень разработанности проблемы, сформулированы цель диссертации, решаемые задачи, научная новизна, положения, выносимые на защиту, а также приведены сведения о практической и теоретической значимости результатов.

В первой главе проанализированы и классифицированы способы энергосбережения в современных машинах (рисунок 1). Установлено, что наименее затратным способом снижения мощности и энергии является оптимизация законов движения. Впервые оптимизация закона движения привода по критерию минимизации мощности исследована В.Г. Созоновым и И.Н. Исаевым для механизма клетки прокатного стана, а также И.И. Вульфсоном для промышленных роботов. Они установили факт существования минимума мощности привода, преодолевающего инерционную нагрузку, при времени разгона и торможения равном $1/3$ цикла движения (рисунок 2 а). И.И. Вульфсон доказал, что при переходе от треугольного симметричного закона изменения скорости к оптимальному – трапецеидальному закону, снижение максимальной мощности составляет 20% (рисунок 2 б). О.Н. Мацко и А.В. Мосалова исследовали эффективности оптимизации типовых законов движения при различных нагрузках по критериям минимума мощности и

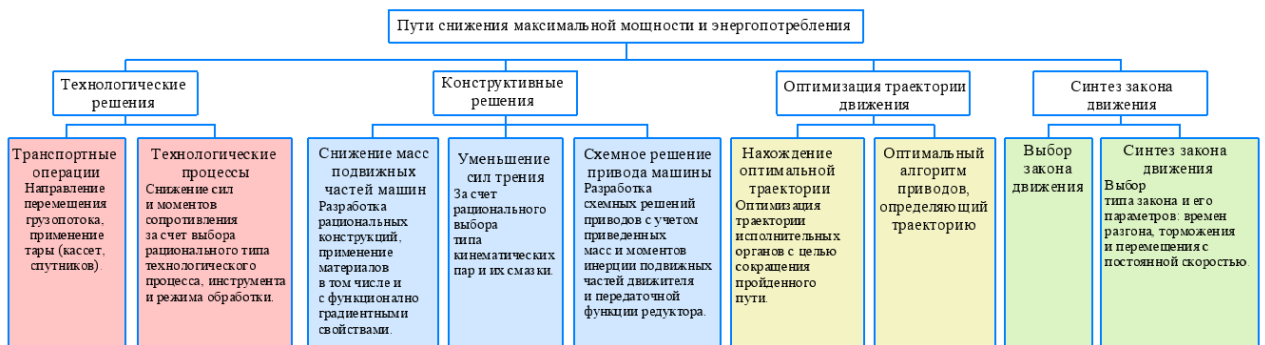


Рисунок 1 – Способы энергосбережения в современных машинах

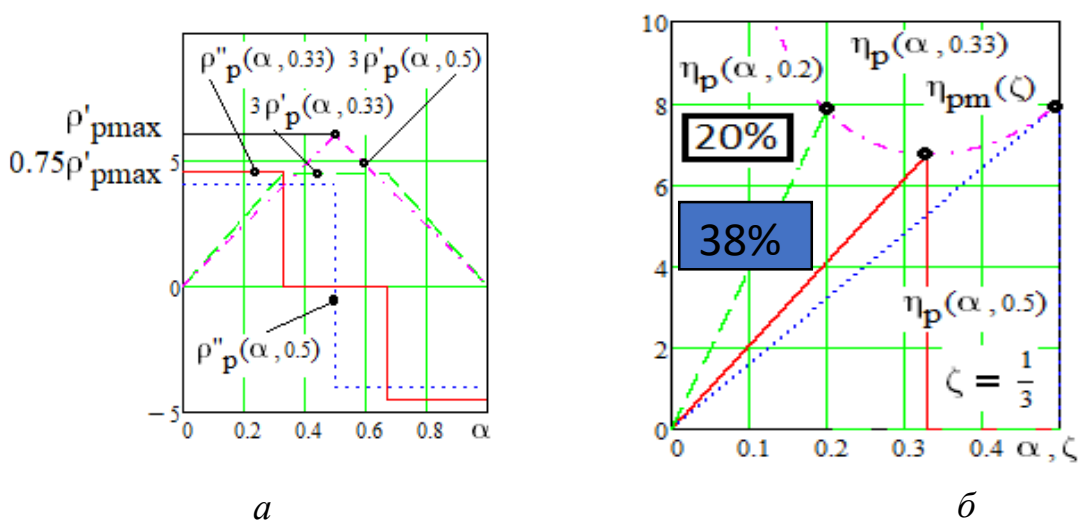


Рисунок 2- Минимизация мощности при движении с равноускоренным разгоном и равнозамедленным торможением

энергопотребления. В развитие этой работы предложено синтезировать закона движения с помощью уравнения мощностей, которое получается путем умножения правой и левой части второго закона Ньютона на скорость:

$$\rho''(\alpha) \cdot \rho'(\alpha) = f(\alpha) \cdot \rho'(\alpha) = \eta(\alpha) \quad (1)$$

где $\rho'(\alpha)$, $\rho''(\alpha)$, $\eta(\alpha)$, $f(\alpha)$, α - безразмерные скорость, ускорение, мощность, сила и время. После разделения переменных и интегрирования можно получить

$$\int_0^{\rho'(\zeta)} \rho'(\alpha) \, d\rho'(\alpha) = \int_0^{\zeta} \eta(\alpha) \, d\alpha = \frac{\rho'(\alpha)^2}{2} \quad (2)$$

Здесь ζ безразмерное время разгона. Анализ (2) позволяет утверждать следующее. Во-первых, величина пройденного пути равна интегралу от скорости на интервале $[0, \zeta]$ при $\eta(\alpha) = \eta_0 = \text{const}$. Во-вторых, уменьшение максимальной мощности означает, что функция $\eta(\alpha)$ на интервале разгона должна быть меньше, чем η_0 , что приведет к уменьшению кинетической энергии, а, следовательно, уменьшится скорость и пройденный путь, что будет означать нарушение условия постоянства перемещения и времени. Следовательно, минимальное значение максимальной за цикл мощности имеет место при $\eta(\alpha) = \text{const}$. Выражения для ускорения и скорости на полном цикле: разгон равномерное движение, торможение имеют вид

$$\rho''(\alpha, \zeta) = \begin{cases} \frac{3}{2\sqrt{\zeta}\alpha} & \text{if } 0 \leq \alpha \leq \zeta \\ 0 & \text{if } \zeta < \alpha \leq 1 - \zeta \\ \frac{3}{2 \cdot (2\zeta - 3) \sqrt{\zeta(1 - \alpha)}} & \text{if } 1 - \zeta < \alpha \leq 1 \end{cases} \quad \rho'(\alpha, \zeta) = \begin{cases} \frac{3\sqrt{\alpha}}{\sqrt{\zeta} \cdot (3 - 2\zeta)} & \text{if } 0 \leq \alpha \leq \zeta \\ \frac{3}{3 - 2\zeta} & \text{if } \zeta < \alpha \leq 1 - \zeta \\ \frac{3\sqrt{1 - \alpha}}{\sqrt{\zeta} \cdot (3 - 2\zeta)} & \text{if } 1 - \zeta < \alpha \leq 1 \end{cases}$$

Выражения для безразмерных мощности и энергопотребления имеют вид

$$\eta(\alpha, \zeta) = \rho''(\alpha, \zeta) \cdot \rho'(\alpha, \zeta) \quad p(\alpha, \zeta) = \int_0^{\zeta} \eta(\alpha, \zeta) \, d\alpha \quad (3)$$

Максимальную мощность и энергопотребление можно получить после подстановки в (3) значений для ускорения и скорости

$$\eta_m(\zeta) = \frac{9}{2 \cdot (3 - 2\zeta)^2 \cdot \zeta} \quad p(\zeta) = \frac{9}{2 \cdot (3 - 2\zeta)^2} \quad (4)$$

При изменении ζ в интервале $[0; 0,5]$ максимальная мощность монотонно убывает от бесконечности до $9/4$, а энергозатраты монотонно возрастают от $1/2$ до $9/8$. На рисунке 3 представлены графики лучших по критерию минимума мощности ускорений (*a*), скоростей (*б*) и мощностей (*в*) от времени для различных законов, а также максимальной мощности (*г*) и энергопотребления (*д*) от времени разгона. На рисунке 3 (*e*) представлена зависимость максимальной мощности от энергопотребления. Индексы «р» и «т» означают прямоугольный и треугольный несимметричный законы движения. Максимальная мощность при прямоугольном законе в 3 раза больше, а при треугольном – в 1,5 раза, чем при синтезированном. Существенным недостатками такого закона является наличие мягких ударов и бесконечно большое ускорение. Они могут быть устранены путем модификации закона движения на начальных и конечных участках разгона и торможения. На основании изложенного сформулированы цель и задачи исследования.

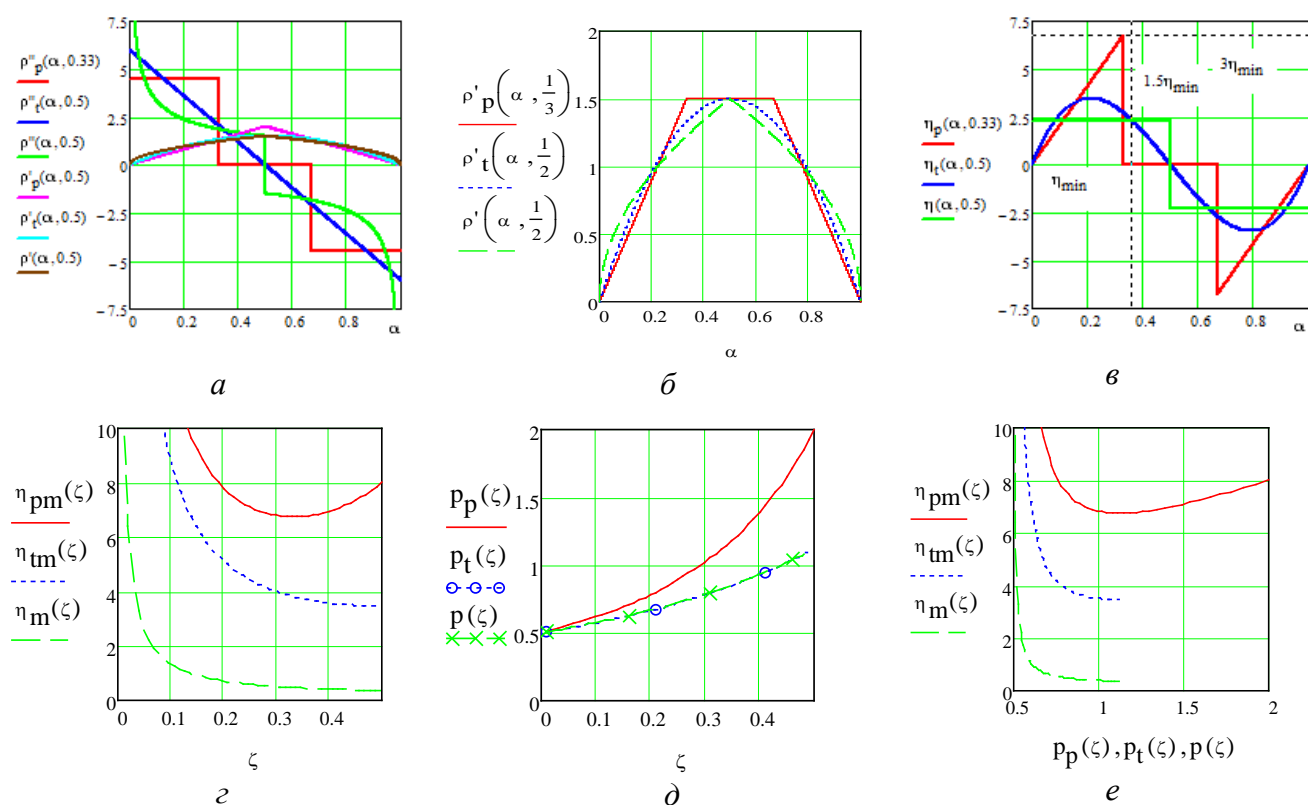


Рисунок 3 - Графики зависимостей ускорений, скоростей и мощностей от времени по критерию минимума мощности

В второй главе разработана математическая модель мехатронного привода с законом движения, обеспечивающим потребление минимальной мощности и исключающем скачки ускорения в начале и конце разгона / торможения. Для этого интервал движения $[0, 1]$ делится на семь участков. Три участка разгона ζ : линейное нарастание ускорения $[0, \zeta\beta]$, движение с постоянной мощностью $[\zeta\beta, \zeta(1 - \gamma)]$ и линейное убывание ускорения до нуля $[\zeta(1 - \gamma), \zeta]$. Далее следует четвертый участок равномерного движения $[\zeta, 1 - \zeta]$. Интервал торможения ζ также, делится на три участка: линейное убывание ускорения $[1 - \zeta, 1 - \zeta(1 - \gamma)]$, движение с постоянной поглощаемой на торможение мощностью $[1 - \zeta(1 - \gamma), 1 - \zeta\beta]$ и движение с линейным нарастанием ускорения до нуля $[1 - \zeta\beta, 1]$. Коэффициенты β и γ означают части времени разгона и торможения, затраченные на линейные нарастание и убывание ускорения. Модифицированный закон движения имеет вид

$$\rho''(\alpha, \zeta, \beta, \gamma) = \begin{cases} \zeta^{-3} \cdot (\psi(\zeta, \beta, \gamma))^{-1} \cdot \beta^{-1.5} \alpha & \text{if } 0 \leq \alpha < \beta \cdot \zeta \\ \zeta^{-2} \cdot \psi(\zeta, \beta, \gamma)^{-1} \cdot (4\alpha \cdot \zeta^{-1} - 3\beta)^{-0.5} & \text{if } \beta \cdot \zeta \leq \alpha < \zeta \cdot (1 - \gamma) \\ (1 - \alpha \cdot \zeta^{-1}) \cdot \zeta^{-2} \cdot (\psi(\zeta, \beta, \gamma) \cdot \gamma)^{-1} \cdot (4 - 4\gamma - 3\beta)^{0.5} & \text{if } \zeta \cdot (1 - \gamma) \leq \alpha < \zeta \\ 0 & \text{if } \zeta \leq \alpha < 1 - \zeta \\ (1 - \alpha - \zeta) \cdot \zeta^{-3} \cdot (\psi(\zeta, \beta, \gamma) \cdot \gamma)^{-1} \cdot (4 - 4\gamma - 3\beta)^{0.5} & \text{if } 1 - \zeta \leq \alpha < 1 - \zeta + \gamma \cdot \zeta \\ -\zeta^{-1.5} \cdot (\psi(\zeta, \beta, \gamma))^{-1} \cdot [4(1 - \alpha) - 3\beta \cdot \zeta]^{0.5} & \text{if } 1 - \zeta + \gamma \cdot \zeta \leq \alpha \leq 1 - \zeta \cdot \beta \\ \beta^{-1.5} (\alpha - 1) \cdot \zeta^{-3} \cdot (\psi(\zeta, \beta, \gamma))^{-1} & \text{if } 1 - \zeta \cdot \beta \leq \alpha \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

где
$$\psi(\zeta, \beta, \gamma) = \frac{\sqrt{\beta^3}}{6} + \frac{(3\gamma + 3\beta - 4) \cdot (2\zeta - 3 + 2\gamma \cdot \zeta + 3\beta \cdot \zeta)}{6\zeta \cdot \sqrt{4 - 3\beta - 4\gamma}} - \frac{\gamma \cdot (10\gamma + 9\beta - 12)}{6 \cdot \sqrt{4 - 3\beta - 4\gamma}} -$$

коэффициент. Аналитические выражения безразмерных функций скорости и перемещения получены путем повторного интегрирования (5).

$$\rho(\alpha, \zeta, \beta, \gamma) = \int_0^\alpha \rho''(\alpha, \zeta, \beta, \gamma) \, d\alpha \quad \rho(\alpha, \zeta, \beta, \gamma) = \int_0^\alpha \rho(\alpha, \zeta, \beta, \gamma) \, d\alpha \quad (6)$$

Аналитическое вычисления в зависимости от шага интегрирования в сотни тысяч раз, что актуально при оптимизации параметров закона движения в режиме реального времени. Функции для мощности и энергопотребления с учетом (6) имеют вид

$$\eta_1(\alpha, \zeta, \beta, \gamma) = \rho''(\alpha, \zeta, \beta, \gamma) \cdot \rho'(\alpha, \zeta, \beta, \gamma) \quad p_1(\zeta, \beta, \gamma) = \int_0^\zeta \eta_1(\alpha, \zeta, \beta, \gamma) d\alpha \quad (7)$$

Перемещение s , время цикла T , текущее время $t = \alpha T$ и время разгона $\tau = \zeta T$ связаны с соответствующими безразмерными параметрами формулами

$$\begin{aligned} \rho''(\alpha, \zeta, \beta, \gamma) &= a(t, \tau, \beta, \gamma) T^2 / s; & \rho'(\alpha, \zeta, \beta, \gamma) &= v(t, \tau, \beta, \gamma) T / s; & \rho(\alpha, \zeta, \beta, \gamma) &= x(t, \tau, \beta, \gamma) / s; \\ \eta(\alpha, \zeta, \beta, \gamma) &= N(t, \tau, \beta, \gamma) T^3 / m s^2; & p(\zeta, \beta, \gamma) &= N(t, \tau, \beta, \gamma) T^2 / m s^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Безразмерные зависимости ускорения, скорости, перемещения и мощности от времени, рисунок 4, при $\beta = \gamma = 0,1$ и $\zeta = 0,4$, которые позволяет утверждать об эффективности математической модели закона для исключения мягких ударов.

С целью количественной оценки качества закона движения приняты следующие критерии: максимальные за цикл ускорение, скорость и мощность, а также энергопотребление. Ускорение имеет максимум при $\alpha = \zeta\beta$, а скорость – при $\alpha = \zeta$

$$\rho''_{m1}(\zeta, \beta, \gamma) = \rho''(\zeta\beta, \zeta, \beta, \gamma); \quad \rho'_{m1}(\zeta, \beta, \gamma) = \rho'(\zeta, \zeta, \beta, \gamma) \quad (9)$$

Для определения времени наступления максимального потребления мощности для синтезированного закона движения привода используется алгоритм и программа, представленные на рисунке 5. Энергопотребление цикла определяется по формулам (7). Для количественной оценки эффективности оптимизации параметров ζ, β, γ по предложенным выше четырем критериям используются относительное увеличение каждого из них в сравнении с его минимально возможным значением:

$$\delta\rho''(\zeta, \beta, \gamma) = (\rho''_{m1}(\zeta, \beta, \gamma) / \rho''_{\zeta\beta\gamma} - 1) \cdot 100\% \quad (10)$$

$$\delta\rho'(\zeta, \beta, \gamma) = (\rho'_{m1}(\zeta, \beta, \gamma) / \rho'_{\zeta\beta\gamma} - 1) \cdot 100\% \quad (11)$$

$$\delta\eta(\zeta, \beta, \gamma) = (\eta_{m1}(\zeta, \beta, \gamma) / \eta_{\zeta\beta\gamma} - 1) \cdot 100\% \quad (12)$$

$$\delta p(\zeta, \beta, \gamma) = (p_1(\zeta, \beta, \gamma) / p_{\zeta\beta\gamma} - 1) \cdot 100\% \quad (13)$$

При исследовании полученного закона возможны следующие комбинации параметров ζ, β, γ : два заданы, а третий необходимо выбрать; один задан, а два нужно выбрать; один задан, один принят оптимальным и один надо выбрать; два приняты оптимальными и один необходимо выбрать. В результате имеется пятнадцать комбинаций оптимизируемых параметров и одно или несколько значения

для каждого из восьми критериев. Таким образом, для всестороннего исследования предложенного закона движения необходимо получить и проанализировать 120 функций и 8 предельных значений критериев качества. При решении конкретных задач число критериев и параметров оптимизации может быть уменьшено до одного, однако каждый раз этот критерий и параметр (параметры) могут быть разными. Для исследования влияния любой, заранее не известной комбинации из трех параметров закона движения на каждый показатель качества, предложено использовать принцип аналогичный применяемому в имитационном моделировании.

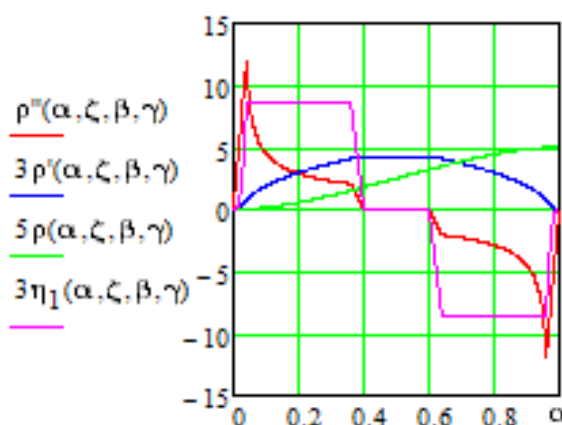


Рисунок 4 – Графики ускорения, скорости, перемещения и мощности от времени

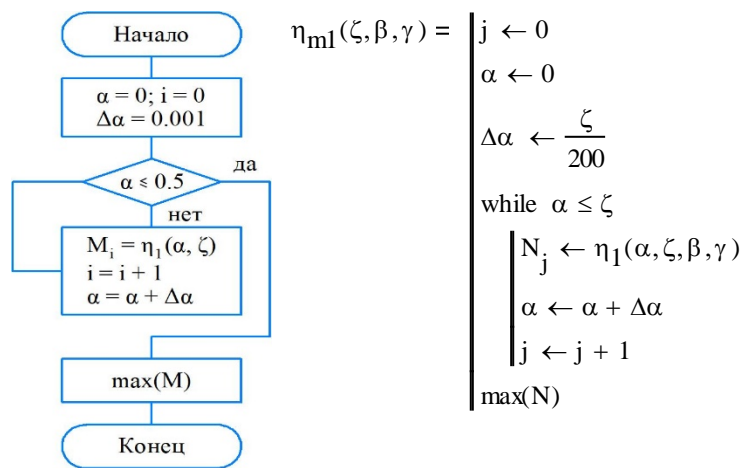


Рисунок 5 – Алгоритм и программа для вычисления максимума мощности

Для синтезированного закона движения привода выходного звена разработана безразмерная параметрическая математическая модель в среде Mathcad, позволяющая исследовать 128 функций от заданных комбинаций трех параметров. На основании этих функций для каждого из четырех абсолютных критериев качества закона движения могут быть получены 15 вспомогательных функций, которые связывают между собой параметры закона движения следующим образом: три функции двух переменных $\zeta_0(\beta, \gamma)$, $\beta_0(\zeta, \gamma)$, $\gamma_0(\zeta, \beta)$; шесть функции одной переменной и одного параметра, принятого оптимальным $\zeta_0(\beta_0, \gamma)$, $\beta_0(\zeta_0, \gamma)$, $\gamma_0(\zeta_0, \beta)$, $\zeta_0(\beta_0, \gamma)$, $\beta_0(\zeta_0, \gamma)$, $\gamma_0(\zeta_0, \beta)$ и шесть функций одной переменной и одного заданного параметра $\zeta_0(\beta_z, \gamma)$, $\beta_0(\zeta_z, \gamma)$, $\gamma_0(\zeta_z, \beta)$, $\zeta_0(\beta, \gamma_z)$, $\beta_0(\zeta, \gamma_z)$, $\gamma_0(\zeta, \beta_z)$.

В третьей главе исследованы зависимости ускорения, скорости, мощности и энергопотребления от времен разгона, линейных нарастания и убывания ускорения. На рисунке 6 представлены зависимости этих показателей качества от ζ , β и γ . Уменьшение времени разгона с 0,5 до 0,2 приводит к возрастанию максимальных ускорения в 3,3 раза, мощности – в 2,2 раза и уменьшению скорости в 2 раза, а энергопотребления в 2,4 раза.

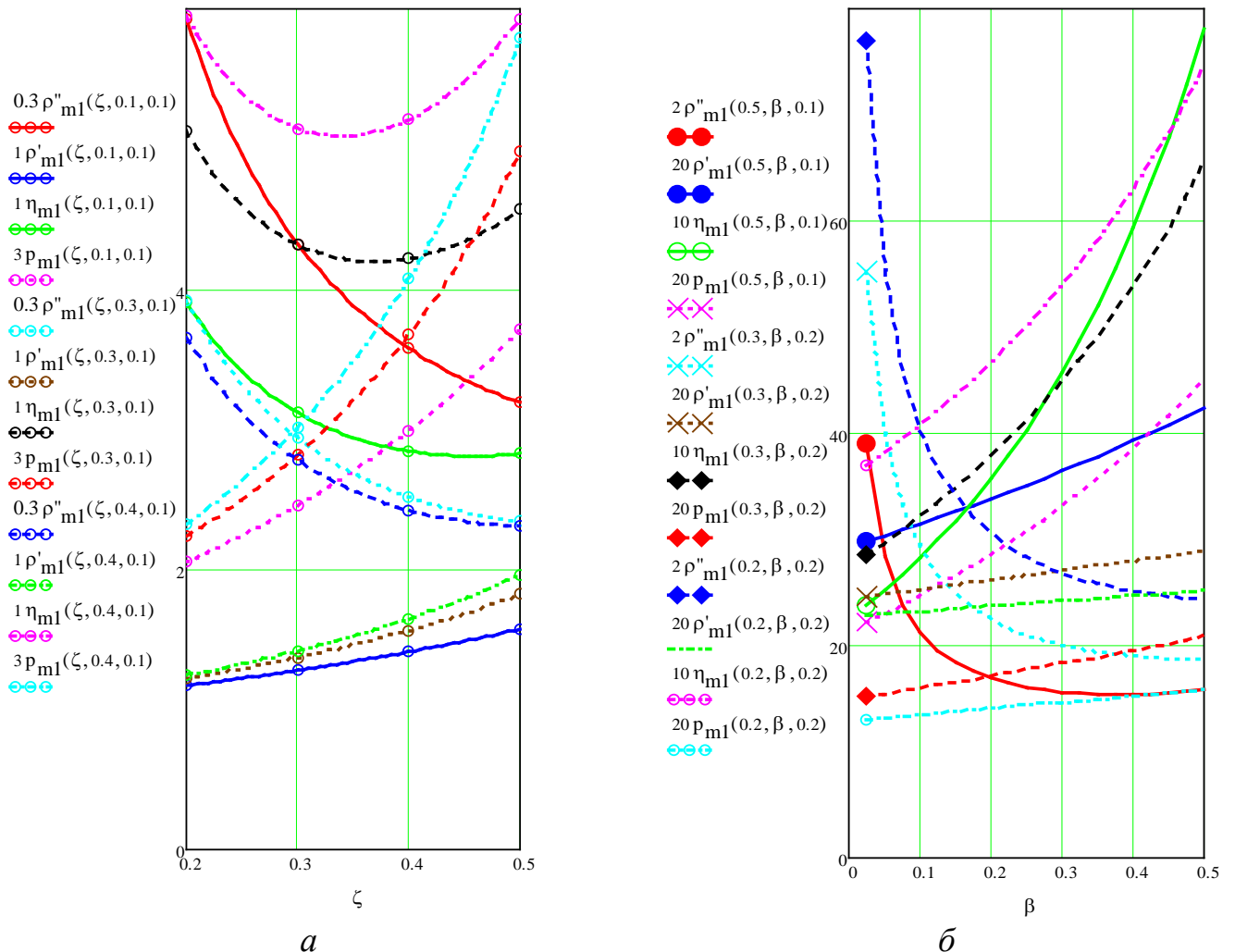


Рисунок 6 - Зависимости максимальных ускорения, скорости, мощности и энергопотребления от времени разгона – а и времени нарастания ускорения - б

На рисунке 7 представлены зависимости относительных приращений максимальных ускорения, скорости и энергопотребления от относительного приращения мощности. Представленные графики взаимного влияния показателей качества иллюстрируют существенно отличный характер такого влияния и его численные характеристики от десятков до сотен процентов.

На рисунке 8 представлены графики зависимости эффективности оптимизации параметров закона (аргументов функции) β и γ при различных значениях времен по критерию минимума ускорения.

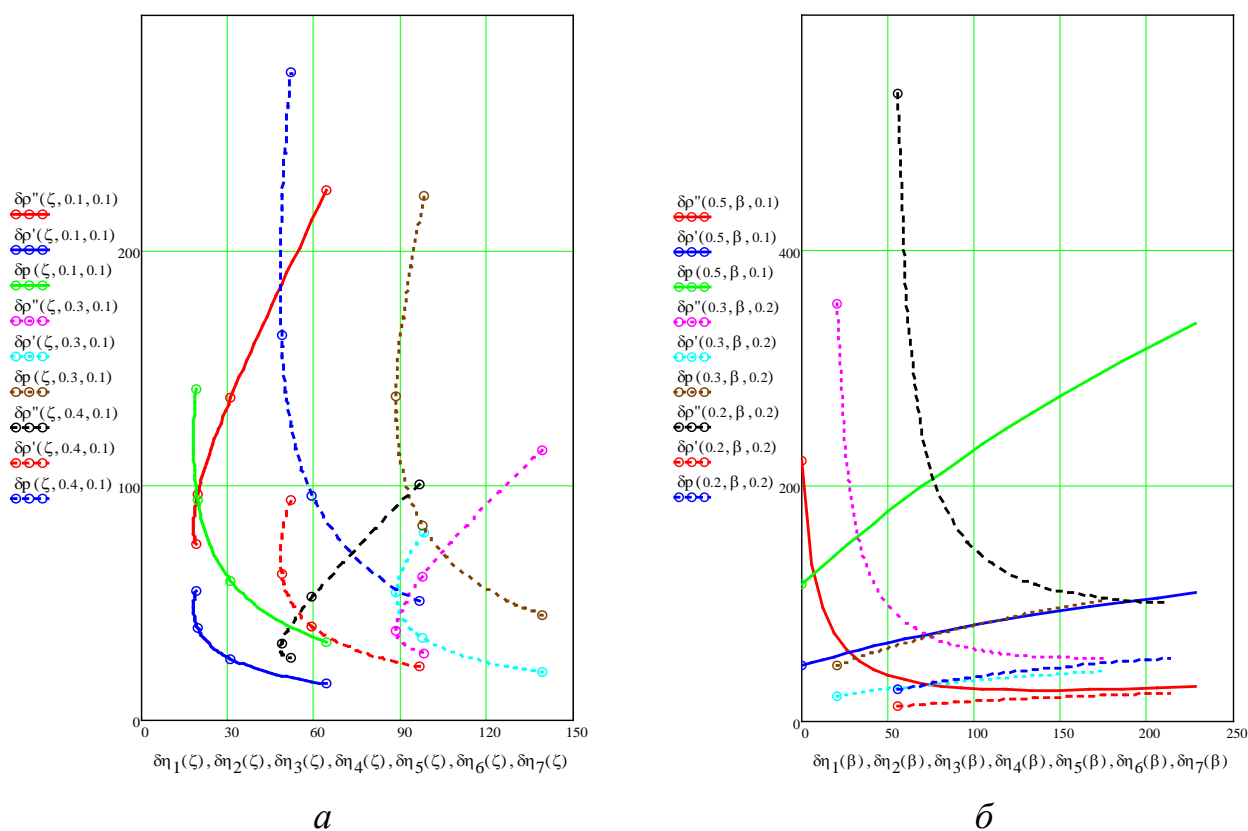


Рисунок 7 – Зависимости относительных приращений максимальных ускорения, скорости и энергопотребления от относительного приращения мощности, при различных сочетаниях параметров ζ и β - *а*, а также β и γ - *б*

Графики по аргументу β имеют минимум, а по аргументу γ – максимум. Мощность и энергопотребление для синтезированного закона движения противоречивы и при их оптимизация необходимо учитывать ограничения на максимальные скорость и ускорение.

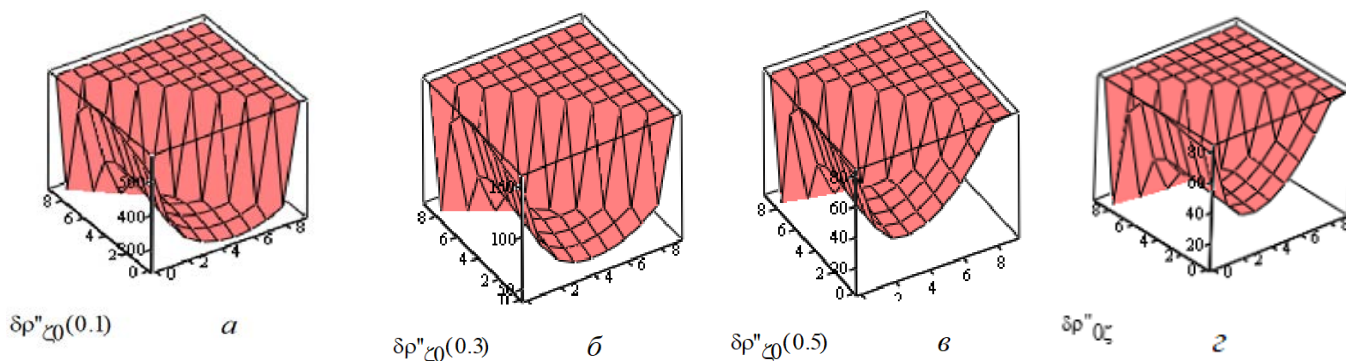


Рисунок 8 - Графики зависимости эффективности β и γ по критерию минимизации максимального за цикл ускорения (*а* – $\zeta = 0,1$; *б* – $\zeta = 0,3$; *в* - $\zeta = 0,5$ и *г* – при оптимальном ζ)

Зависимости максимальных за цикл ускорений (a), скоростей (b), мощностей (v) и энергопотребления (z) от каждого из параметров закона движения при оптимальных значениях остальных параметров представлены на рисунке 9. Для иллюстрации степени такого влияния на каждом графике приведены минимально возможные значения показателей качества при оптимальном сочетании параметров.

Наибольшее влияние на все критерии качества оказывает время разгона. На максимальные ускорения и мощность существенное влияние оказывает время нарастания ускорения. Величина линейного убывания ускорения оказывает наименьшее влияние на показатели качества.

На рисунке 10 представлены зависимости оптимальных времен разгона по критерию минимума мощности от β и различных значениях γ (0,1; 0,5; 0,9), а также от γ при и различных значениях β (0,1; 0,5; 0,9). Приведенные зависимости не очевидны и полезны при программировании мехатронных приводов, у которых один из параметров обусловлен технологическим процессом.

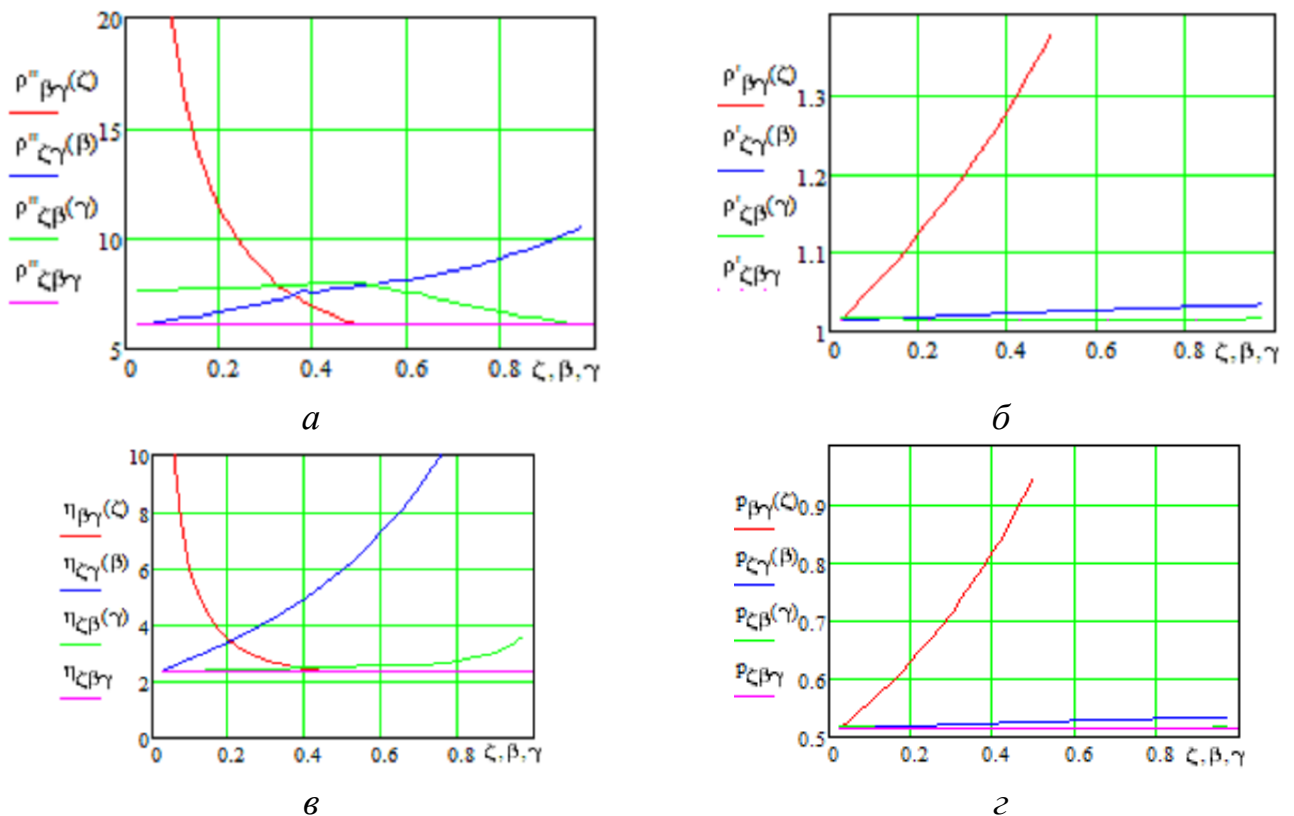


Рисунок 9 - Зависимости максимальных за цикл ускорения - a , скорости - b , мощности - v и энергопотребления - z от одного из параметров ζ, β и γ

На рисунке 11 представлены примеры следующих попарных сочетаний критериев: эффективность оптимизации ускорения от эффективности оптимизации мощности (*а, б*) и эффективность оптимизации энергопотребления от эффективности оптимизации мощности (*в, г*), построенные для различных значений ζ и γ .

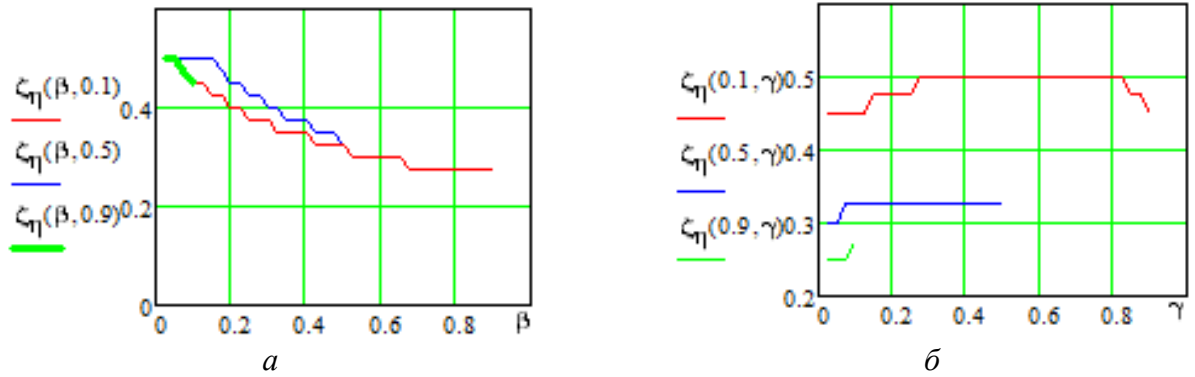


Рисунок 10 - Зависимости оптимальных значений ζ по критерию минимума мощности от различных значений β и γ

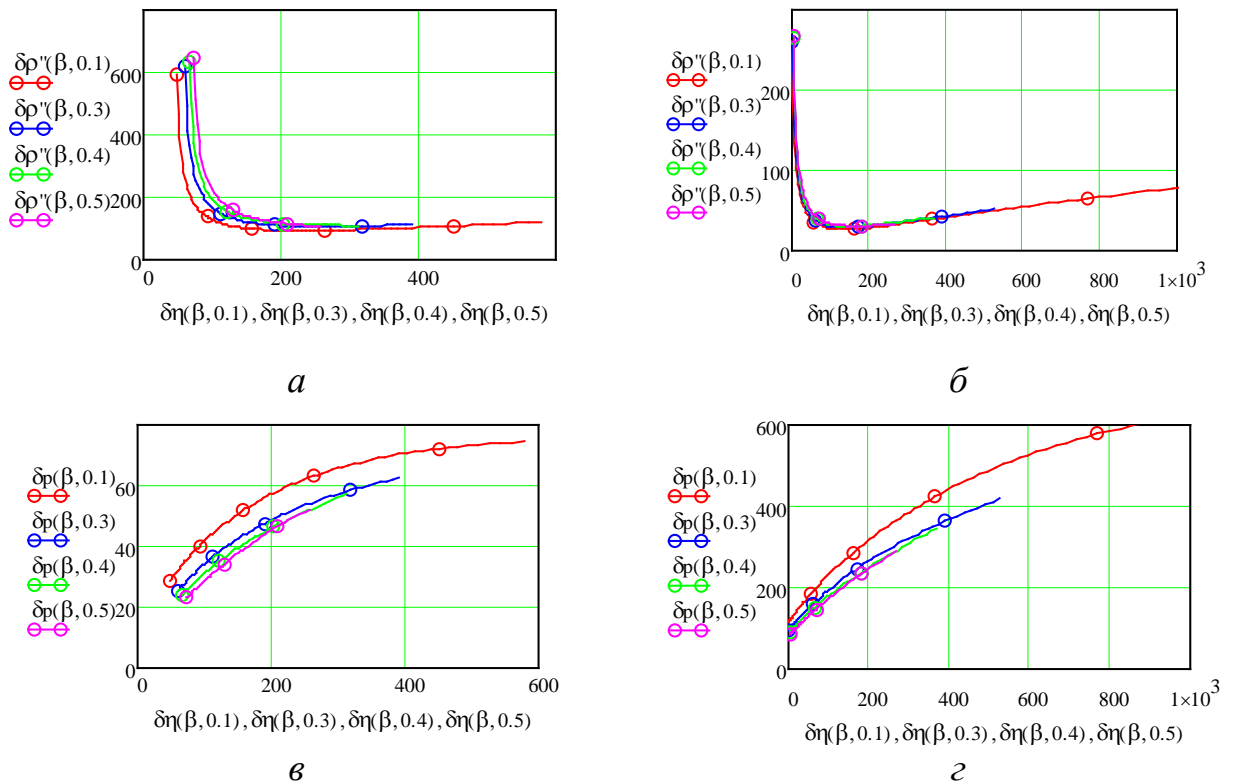


Рисунок 11 - Зависимости взаимного влияния показателей качества

Эти графики подтверждают актуальность обоснованного выбора параметров синтезированного закона движения, поскольку он может уменьшать или увеличивать качественные показатели для мощностей - до 950%, для энергопотребления -

до 600 % и для ускорений – до 580%. Например, при попытке снизить мощность на 700% ускорение вырастет на 480%, а это потребует увеличения размеров узлов машины и приведет к увеличению сил инерции и потребляемой мощности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании аналитического обзора роботов и мехатронных устройств установлено следующее.

1. При реализации цикла «разгон, равномерное движение, торможение» и заданных времени и величине перемещения наиболее эффективным средством снижения энергопотребления и максимального значения потребляемой мощности является выбор закона движения и оптимизация его параметров, а именно времен разгона и торможения.

2. Ни один из традиционных законов движения с оптимальными параметрами не обеспечивает минимума потребляемых максимальной мощности или энергии.

На основании исследования предложенной безразмерной параметрической модели функционирования системы приводов робота или мехатронного устройства с преобладающей инерционной нагрузкой доказано и установлено следующее.

1. Минимальные значения максимальной за цикл мощности и энергии могут быть достигнуты при постоянстве мощности.

2. Определены абсолютные минимумы безразмерных мощности и скорости. Они существуют, но не достижимы, поскольку для этого потребуются бесконечно большие ускорения и бесконечно большие движущие моменты или силы.

3. Ограничение предельных значений ускорения обеспечивается его линейным нарастанием от нуля и линейным убыванием до нуля на соответствующих интервалах цикла движения.

4. Отклонения фактических максимальных за цикл мощности и энергопотребления от предельно достижимых значений зависят от ограничений на скорости и ускорения.

5. Наиболее полное представление о качестве закона движения привода робота или мехатронного устройства дает совокупность следующих параметров:

максимальные за цикл мощность, ускорение и скорость, а также энергопотребление.

6. Максимальные за цикл мощность, ускорение и скорость, а также энергопотребление функционально нелинейно связаны между собой и изменение любого из этих параметров весьма существенно влияет на оставшиеся.

7. Специально синтезированные законы движения приводов роботов и мехатронных устройств являются эффективным средством снижения энергопотребления и потребляемой мощности, когда результат достигается благодаря рациональному программированию движений исполнительных органов.

Предложенная математическая модель и результаты ее исследования могут быть положены в основу построения целевой функции для многокритериального синтеза законов движения приводов роботов и мехатронных устройств с преобладающей инерционной нагрузкой. Применение специально синтезированного закона движения особенно актуально при создании автономных роботов, в том числе и космических, когда снижение потребляемой мощности позволяет уменьшить габариты и массу привода, а уменьшение энергопотребления - уменьшить габариты и массу батареи или увеличить ресурс работы.

Дальнейшее развитие данная работа может получить и при создании новых экономичных рекуперативных приводов. Снижение пиковых мощностей при разгоне и торможении существенно упрощает систему рекуперации и снижает ее стоимость.

Предложенные подходы к построению математических моделей и методики исследования могут быть распространены и на более широкий класс машин, в которых наряду с силами инерции действуют силы сухого и вязкого трения, а также технологические силы, зависящие от координат и времени.

Публикации по материалам диссертации

в изданиях, входящих в базы данных Scopus

1. Kornilova. Optimization of the robot motion law by the criterion of minimizing maximum instantaneous power and electric motor size, A. Kornilova, A. Volkov, O. Matsko, A. Mosalova, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 539 (2020) 012122, 8p. doi:10.1088/1755-1315/539/1/012122.

2. A. A. Kornilova. Static balancing and power consumption of industrial robots and process machines for various application. A. A. Kornilova, N. A. Volkov, L. V. Podkolzina, O. N. Matsko, Journal of Physics: Conference Series, 1753 (2021), 1002. Scopus. <https://iopscience.iop.org/journal/1742-6596>.

3. A. Kornilova. Investigation of the effect of algorithms of positioning robots on their power and energy consumption. A. Kornilova, A. Volkov, A. Kolesnikova, O. Matsko, E3S Web Conf. Volume 378, 03002 (2023) IIRPCMIA (2021), 5p. doi.org/10.1051/e3sconf/202337803002.

в рецензируемых изданиях

4. Корнилова А.А. Синтез оптимальных законов управления цикловыми приводами / Корнилова А.А., Волков А.Н., Мацко О.Н. // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики IPDME-2018: Сборник тезисов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 12-13 апреля 2018 г. - СПб.: РИЦ Горного университета, 2018. - С. 22 РИНЦ.

5. Корнилова А.А. Исследование цикловых приводов роботов и технологического оборудования как мехатронных систем / Корнилова А.А., Волков Н.А., Мацко О.Н., Ларин М.Ю. // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 18–23 ноября 2019 г. Институт машиностроения, материалов и транспорта. В 2 ч. Ч. 2. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – с. 18-21. РИНЦ.

6. А.А. Корнилова. Оптимизация алгоритмов позиционного управления приводами робота / А.А. Корнилова (и др.) // Инновации и перспективы развития горного

машиностроения и электромеханики IPDME-2020: Сборник тезисов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 23-24 апреля 2020 г. - СПб.: РИЦ Горного университета, 2020. - С. 473-476. РИНЦ.

7. А.А. Корнилова. Статическое уравнивание и потребляемая мощность для промышленных роботов и технологических машин различного назначения / А.Н. Волков, А.А.Корнилова, О.Н.Мацко, Л.В. Подколызина // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики IPDME-2020: Сборник тезисов Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 23-24 апреля 2020 г. - СПб.: РИЦ Горного университета, 2020. - С. 80-84. РИНЦ.

в учебных пособиях

8. Корнилова А.А. Законы движения исполнительных механизмов роботов и технологического оборудования: учеб. пособие / Корнилова А.А., Волков А.Н., Мацко О.Н., Мосалова А.В. – СПб.: Политех-Пресс, 2019. – 86 с. (5,5/1,5 п.л.).

9. А.А. Корнилова. Мехатронные приводы роботов и технологических машин. Уравнивание механизмов: учеб. пособие / Н.А. Волков (и др.). – СПб.: Политех-Пресс, 2021. – 134 с. (8,5/2,5 п.л.)

10.А.А. Корнилова. Синтез оптимальных по критерию энергосбережения алгоритмов работы приводов роботов и технологических машин / А.Н. Волков, А.А. Корнилова, О.Н. Мацко, А.В. Козлович. – СПб.: Политех-Пресс, 2023. – 85 с.