

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Сологубов Андрей Юрьевич

**ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ
НА БАЗЕ СФЕРИЧЕСКОГО ПАРАЛЛЕЛЬНОГО МАНИПУЛЯТОРА**

2.4.5. Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Электрические станции, сети и системы электроснабжения».

Научный
руководитель: доктор технических наук, профессор,
Кирпичникова Ирина Михайловна

Официальные
оппоненты: **Григораш Олег Владимирович**,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Кубанский государственный аграрный университет
имени И.Т. Трубилина», г. Краснодар, заведующий
кафедрой электротехники, теплотехники и
возобновляемых источников энергии;

Сесекин Александр Николаевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г.
Екатеринбург, заведующий кафедрой прикладной
математики и механики;

Митрофанов Сергей Владимирович, кандидат
технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Оренбургский
государственный университет», г. Оренбург, директор
Института энергетики, электроники и связи

Защита диссертации состоится «01» июня 2023 г. в 17:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.07.17 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, аудитория И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»:

<https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=4621>

Автореферат диссертации разослан « ____ » _____ 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ташлыков Олег Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Солнечная энергия – наиболее доступная и перспективная по масштабам своего распространения из всех возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Принципы преобразования этой энергии в виды, удобные для практического использования, просты, надёжны и безопасны. Оцениваемая продолжительность жизненного цикла Солнца делает этот источник энергии практически неистощимым.

Благодаря этому солнечная энергетика стала очень популярной формой производства электроэнергии за последнее десятилетие. Актуальные данные ряда консалтинговых и энергетических компаний прогнозируют рост мощности и количества энергетических комплексов в ближайшие годы. Положительный опыт их эксплуатации стимулирует дальнейшее развитие солнечной энергетики.

Существует три ключевых способа дальнейшего совершенствования технологии производства и распределения солнечной энергии. Первым направлением является совершенствование материалов фотоэлементов. Второе направление заключается в создании аккумуляторов с более высокой ёмкостью для обслуживания энергетических комплексов в ночное время суток или в пасмурные дни.

Мотивацией для рассматриваемой диссертации является третье направление, а именно разработка новых систем ориентации солнечных батарей на базе параллельных манипуляторов, которые обеспечивают преимущества двухосевых систем слежения, обладая при этом потенциалом для устранения их недостатков. Эта менее распространенная альтернатива может стать ключом к созданию улучшенных солнечных трекеров. По сравнению с механизмами последовательной структуры, параллельные манипуляторы обладают рядом преимуществ. Они обладают большей жесткостью и грузоподъемностью за счет распределения нагрузки на кинематические цепи и приводы. Высокая точность параллельных манипуляторов также снижает количество ошибок, накапливаемых современными системами ориентации. Это позволяет использовать новую элементную базу.

Дополнительной мотивацией является разработка новых алгоритмов управления на базе систем поиска экстремума. Это повышает уровень автоматизации и автономности таких систем. Таким образом, вышеизложенное определяет актуальность вопросов, рассматриваемых в диссертации.

Степень разработанности проблемы исследования: общим проблемам развития солнечной энергетики посвящены работы Безруких П.П., Щеклеина С.Е., Велькина В.И., Елистратова В.В., Стребкова Д.С., Андреева В.М., Обухова С.Г., Григораша О.В., Митрофанова С.В. Значительный вклад в развитие систем ориентации солнечных батарей внесли Турдзеладзе Д.А., Терехов В.М., Овсянников В.М., Сорокин Г.Ю., Аржанов К.В., Gosselin K., Rolland L., Ghosal A.

Целью диссертации является разработка и исследование системы ориентации солнечных батарей на базе сферического параллельного манипулятора (СОСБ на базе СПМ) и разработка алгоритма качественного поиска точки максимальной энергоэффективности (ТМЭ) в условиях её дрейфа на базе системы поиска экстремума с вспомогательной модуляцией.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **задач:**

1. Выбор архитектуры высокоэффективных солнечных энергоустановок на базе сферического параллельного манипулятора;
2. Определение взаимосвязи движения Солнца в выбранном географическом местоположении с формой рабочего пространства энергоустановки на базе сферического параллельного манипулятора в режиме идеальной ориентации на Солнце;
3. Исследование особенностей кинематики и динамики солнечной энергоустановки на базе сферического параллельного манипулятора в этом рабочем пространстве, оптимизация ключевых параметров состояния энергетического комплекса и разработка математических моделей;
4. Разработка и исследование системы экстремальной ориентации солнечной энергоустановки на базе сферического параллельного манипулятора на основе поиска экстремума с вспомогательной модуляцией;
5. Экспериментальное исследование солнечной энергоустановки в режиме идеальной ориентации на Солнце на виртуальном прототипе и разработка базового физического образца.

Объектом исследования выступает сферический манипулятор с установленной на подвижную платформу солнечной батареей, приводимый в движение тремя вентильно-индукторными двигателями под управлением системы экстремального регулирования для отслеживания ТМЭ.

Предметом исследования являются кинематические, динамические и энергетические свойства солнечной энергоустановки на базе сферического параллельного манипулятора, а также показатели качества

разработанных алгоритмов управления при отслеживании ТМЭ в разных условиях.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач использованы приёмы визуализации и анализа многомерных данных, методы вариационного исчисления, матричный и тензорный аппарат, анализ систем нелинейных дифференциальных уравнений, структурных схем и передаточных функций, методы многомерной оптимизации, объектно-ориентированного инжиниринга. Исследование синтезируемых систем выполнялось методами имитационного моделирования и виртуального прототипирования.

Достоверность результатов научных положений, результатов и выводов обосновываются корректностью постановки задач, применения математического аппарата, методик экспериментов и подтверждением адекватности математического моделирования, выполненного в пакетах компьютерной алгебры результатам исследований на конечно-элементной модели.

Положения, выносимые на защиту:

1. Архитектура высокоэффективных солнечных энергоустановок на базе сферического параллельного манипулятора.

2. Метод и результаты построения рабочего пространства рабочего пространства и идентификации кинематических и динамических свойств энергоустановки в режиме идеальной ориентации на Солнце.

3. Набор минимизируемых/максимизируемых критериев и ограничений, а также алгоритм выбора рациональных параметров энергокомплекса, обеспечивающих эффективное использование электроэнергии.

4. Блок-схема трёхконтурной системы экстремальной ориентации на Солнце, особенности её функционирования и настройки.

5. Методы разработки виртуального прототипа высокоэффективных солнечных энергоустановок на базе сферического параллельного манипулятора, результаты моделирования и экспериментальных исследований, а также элементы технико-экономического анализа для проектного менеджмента.

Научная новизна:

1. Предложена новая архитектура высокоэффективных солнечных энергоустановок на базе сферического параллельного манипулятора.

2. Разработана методика построения рабочего пространства и идентификации кинематических и динамических свойств применительно к энергоустановкам на базе сферического параллельного манипулятора в режиме идеальной ориентации на Солнце.

3. Описаны существенные особенности систем экстремальной ориентации на Солнце и разработан новый критерий достижения конечного состояния системы поиска точки максимальной эффективности энергетического комплекса.

4. Впервые разработан виртуальный прототип высокоэффективной энергоустановки на базе сферического параллельного манипулятора.

5. Предложена методика технико-экономической оценки высокоэффективных энергоустановок на базе сферического параллельного манипулятора, позволяющая прогнозировать затраты, определять точку безубыточности и границы рациональной применимости. Эта методика базируется на статистически значимых коэффициентах и опыте эксплуатации энергетических объектов в аналогичных промышленных условиях.

Теоретическая и практическая значимость

Решение поставленных в проекте задач позволяет получить научно-технический задел для разработки и дальнейшей реализации проектов по совершенствованию крупных солнечных электростанций с большим количеством систем слежения за Солнцем, а также созданию новых конструкций телескопов и автоматизированных комплексов на их основе.

Реализация результатов работы: результаты научной работы внедрены в учебный процесс на кафедре «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета). Разработанная программа формирования двухпараметрических временных сеток для вычисления солнечной позиции и обработки угловых данных расчёта используется в ООО НПП «Астраэнергоэффект», г. Астрахань.

Апробация результатов исследований: Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

– «Международная научно-практическая конференция. Электротехнические комплексы и системы. 2017 и 2018 гг». г. Уфа.;

– Научные конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Энергетический факультет, г. Челябинск, ЮУрГУ (НИУ), 2018-2021 г.г.

– International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM, 2018 – 2019;

– Внутренний семинар исследовательского центра процессов управления. Институт программных систем имени А.К. Айламазяна (ИПС РАН), г. Переславль-Залесский, 19 ноября 2019 года.

– 12-я научная конференция аспирантов и докторантов ЮУрГУ, Энергетический факультет, Политехнический институт, г. Челябинск, ЮУрГУ (НИУ), 10-16 марта 2020 года.

– Международная школа молодых ученых «Моделирование и оптимизация сложных систем» (МОС-2020)., г. Суздаль, Россия, 3–8 июля 2020 г.

– Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика» — Даниловские чтения, посвященные памяти профессора Данилова Н. И. (1945–2015). Екатеринбург, 09–13 декабря 2019 г.

– Энергоэффективность. Ценология. Экология и Энергобезопасность. Материалы научной конференции. 16–19 сентября 2020 года.

Соответствие научной специальности. Диссертация соответствует **пункту 2 и пункту 4** паспорта специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Публикации по теме диссертационной работы. По теме диссертации опубликована 21 печатная работа, в том числе 10 статей в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 6 статей в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus; 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора заключается в постановке целей и задач исследования; идентификации кинематических и динамических свойств энергоустановки; разработке программ выбора рациональных параметров энергокомплекса; разработке математической модели энергоустановки на базе сферического параллельного манипулятора; разработке системы экстремального управления мощностью энергокомплекса; разработке виртуального прототипа и базовой физической модели.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 243 наименований (отечественных и зарубежных авторов) и 6 приложений. Общий объем диссертации составляет 271 странице, в том числе 183 страницы основного текста, включающего в себя 31 рисунок, 13 таблиц и 65 страниц приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, степень разработанности вопроса, сформулирована цель и задачи исследования, идея работы, отражена научная новизна и практическая ценность результатов исследования, методы и средства исследования, достоверность результатов, полученных в работе, представлены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрено современное состояние отрасли, занимающейся разработкой энергетических комплексов, осуществляющих ориентацию солнечных батарей и проведён их обзор. Обзор показал, что они имеют обобщённую базовую структуру, включающую фотоэлектрические датчики положения Солнца, новые типы электродвигателей, опорно-поворотные устройства и системы управления. Основными их задачами является управление перемещением манипулятора согласно заданной управляющей программе. Кроме того, современные энергетические комплексы могут оснащаться различными датчиками, предназначенными для введения элементов адаптивного и интеллектуального управления манипулятором.

В результате были сделаны следующие выводы:

1. Современные энергетические комплексы для ориентации солнечных батарей достигли предела своей эффективности.

2. Большинство существующих манипуляторов, задействованных в технологических процессах производства электроэнергии, обладают последовательной кинематической схемой. Для расширения возможностей применения разрабатываемого комплекса необходимо заложить в них поддержку параллельной конфигурации рабочего пространства.

3. Анализ подходов к построению энергетического комплекса для слежения за Солнцем на базе СПМ позволил определить варианты структуры рабочей координатной системы, необходимой для организации управления.

На основании анализа основных областей применения параллельных манипуляторов были определены базовые требования к качеству выполнения технологических операций по выработке электроэнергии. С этой целью система управления должна обладать возможностью как можно более быстрого поиска ТМЭ и обеспечения минимального отклонения системы от нее.

Анализ кинематической структуры СПМ показал, что основное влияние на качество управления оказывают динамические связи, возникающие между отдельными звеньями в процессе перемещения солнечной панели. Установлено, что существующими в звеньях

упругостями и трением пренебрегать нельзя ввиду особенностей скоростных режимов. Таким образом, динамические свойства манипулятора будут обуславливаться силами взаимовлияния между отдельными звеньями, гравитационными и кориолисовыми силами.

Была предложена архитектура современного энергетического комплекса для слежения за Солнцем на базе СПМ. Она включает взаимосвязанные устройства (вентильно-индукторные двигатели, многопараметрическую систему поиска экстремума с адаптивным алгоритмом для работы с эталонной динамикой, опорно-поворотный механизм параллельной кинематики сферического типа), отвечающие за реализацию функциональных свойств СПМ. Структура автоматической системы управления (АСУ) слежения СБ за Солнцем должна обеспечивать сначала быстрое перемещение в область максимума вырабатываемой мощности, затем надёжную фиксацию, совмещая быстрые и медленные операции. В этом случае необходимо в рассматриваемом многокоординатном электромеханическом исполнительном механизме использовать поиск оптимального положения электропривода, включающего нелинейный контур адаптации к эталонной динамике в режиме реального времени, контур трансформации градиентного потока и контур искусственных потенциальных полей для ограничения динамики гессияна экстремальной характеристики. Такое решение позволит повысить надёжность системы в целом и добиться эффективного использования имеющихся вычислительных ресурсов.

Во второй главе рассматриваются указанные вопросы. Представлены алгоритмы расчёта тахограмм, нагрузочных диаграмм, выбора параметров приводного вентильно-индукторного электродвигателя и опорно-поворотного механизма.

Математическая модель манипулятора состоит из трех взаимосвязанных компонентов: кинематической (обратная и прямая кинематика), динамической и электромеханической моделей.

В связи с этим подходы к их построению рассматриваются отдельно. Для оценки кинематических свойств использовался алгоритм NREL SPA, разработанный Национальной лабораторией по изучению возобновляемой энергии (г. Голден, Колорадо, США). На основе этих данных были проведены исследования и обоснованы в качестве отправной точки для расчёта тахограмм и нагрузочных диаграмм, определяющих положение системы в точке максимальной эффективности работы (рисунок 1).

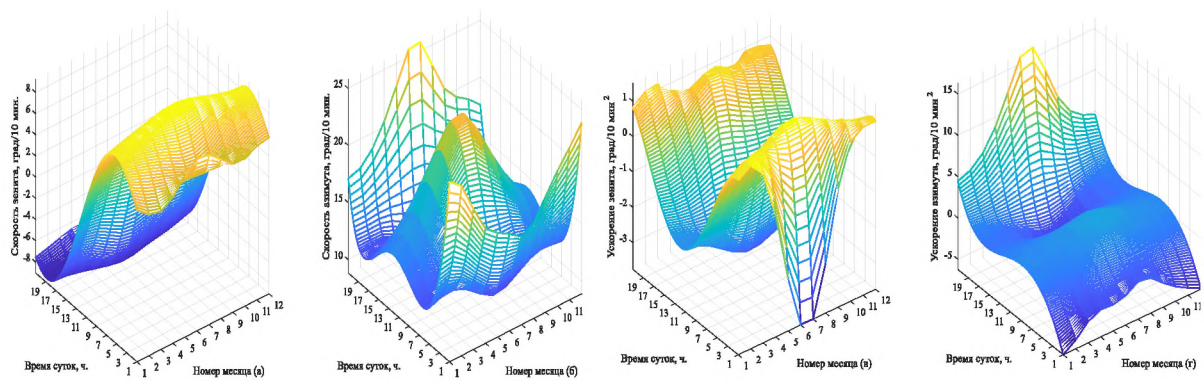


Рисунок 1. Двухмерные поверхности угловых скоростей и ускорений по углам зенита и азимута.

По данным расчёта углового положения Солнца в выбранном географическом местоположении рассчитываются тахограммы и нагрузочные диаграммы для приводных электродвигателей. Для этого были разработаны собственные методы решения задачи обратной кинематики и динамики. Кинематическая схема СПМ, для которой эти методы разработаны, представлены на рисунке 2, на рисунке 3 представлено упрощённое представление платформы в разных положениях.

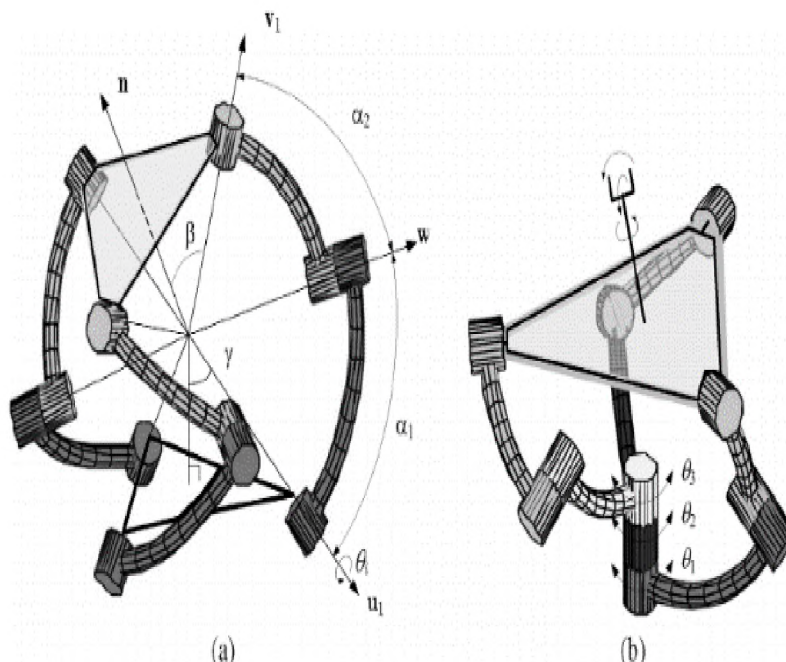


Рисунок 2. Кинематическая схема сферического параллельного манипулятора

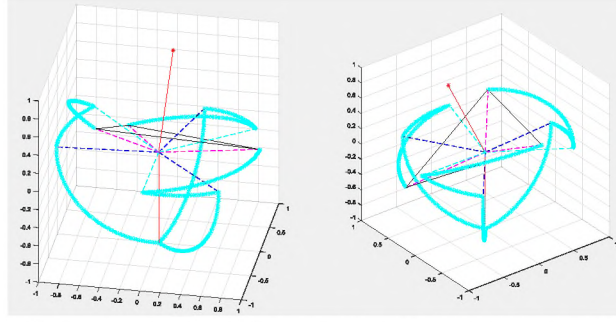


Рисунок 3. Графическое изображение основных звеньев и соединений СПМ на основе выбранных координатных систем

Для решения обратной задачи кинематики были получены формулы 1-4:

$$W_{2i} \cdot W_{3i} = \cos \angle(W_{2i}, W_{3i}) \quad (1)$$

$$\left(\frac{\theta}{2}\right)^2 \cdot \underbrace{2 \cdot (q_v \times q_v \times w_{2i})}_A + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \underbrace{2 \cdot q_v \times (q_w \cdot w_{2i})}_B + \underbrace{w_{2i} \cdot W_{3i} - \cos \angle(W_{2i}, W_{3i})}_C = 0 \quad (2)$$

$$A \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)^2 + B \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + C = \cos(\alpha)$$

$$A = 2 \cdot \left(\vec{q}_{\theta_i} \times \left(\vec{q}_{\theta_i} \times w_{2i} \right) \right) \cdot W_{3i} \quad (3)$$

$$B = 2 \cdot \left(q_v \times (q_w \cdot w_{2i}) \right) \cdot W_{3i}$$

$$C = w_{2i} \cdot W_{3i} - \cos \angle(W_{2i}, W_{3i})$$

$$\theta_i = \left[\begin{array}{l} t_{11} = \frac{\frac{\sqrt{-1}}{2} \cdot \sqrt{-B \cdot \sqrt{-4 \cdot \text{arc}^2 + (4 \cdot A + 8 \cdot C) \cdot \text{arc} - 4 \cdot A \cdot C + B^2 - 4 \cdot C^2 + (2 \cdot C - 2 \cdot \text{arc}) \cdot A - B^2}}}{\sqrt{A^2 + B^2}} \\ t_{21} = \frac{-\left(\frac{\sqrt{-1}}{2}\right) \cdot \left(A \cdot \sqrt{-4 \cdot \text{arc}^2 + (4 \cdot A + 8 \cdot C) \cdot \text{arc} - 4 \cdot A \cdot C + B^2 - 4 \cdot C^2 + B \cdot (A + 2 \cdot C - 2 \cdot \text{arc})}\right)}{\sqrt{A^2 + B^2} \cdot \sqrt{-B \cdot \sqrt{-4 \cdot \text{arc}^2 + (4 \cdot A + 8 \cdot C) \cdot \text{arc} - 4 \cdot A \cdot C + B^2 - 4 \cdot C^2 + (2 \cdot C - 2 \cdot \text{arc}) \cdot A - B^2}}} \\ t_{21} = \frac{2 \cdot \text{atan2}(t_{21}, t_{22})}{-\frac{\sqrt{-1}}{2} \cdot \sqrt{-B \cdot \sqrt{-4 \cdot \text{arc}^2 + (4 \cdot A + 8 \cdot C) \cdot \text{arc} - 4 \cdot A \cdot C + B^2 - 4 \cdot C^2 + (2 \cdot C - 2 \cdot \text{arc}) \cdot A - B^2}}} \\ t_{22} = \frac{\left(\frac{\sqrt{-1}}{2}\right) \cdot \left(A \cdot \sqrt{-4 \cdot \text{arc}^2 + (4 \cdot A + 8 \cdot C) \cdot \text{arc} - 4 \cdot A \cdot C + B^2 - 4 \cdot C^2 + B \cdot (A + 2 \cdot C - 2 \cdot \text{arc})}\right)}{\sqrt{A^2 + B^2} \cdot \sqrt{-B \cdot \sqrt{-4 \cdot \text{arc}^2 + (4 \cdot A + 8 \cdot C) \cdot \text{arc} - 4 \cdot A \cdot C + B^2 - 4 \cdot C^2 + (2 \cdot C - 2 \cdot \text{arc}) \cdot A - B^2}}} \end{array} \right] \quad (4)$$

Для решения задачи обратной динамики разработаны формулы 5-15. Результаты получены с помощью уравнения Лагранжа и представлены в более простой форме с помощью дополнения Шура:

$$T_i = \frac{1}{2} \cdot J_1 \cdot \dot{\theta}_i^2 + \frac{1}{2} \cdot \omega_{12i} (\dot{\theta}_i)^T \cdot J_{12i}(\theta_i) \cdot \omega_{12i} (\dot{\theta}_i) + \frac{1}{2} \cdot \omega_p (\dot{\theta}_i)^T \cdot J_p(\theta_i) \cdot \omega_p (\dot{\theta}_i) \quad (5)$$

$$V_i = m_{11i} \cdot \bar{\chi}_{1i} \cdot g^T \cdot h_i(\dot{\theta}_i) + m_{12i} \cdot \bar{\chi}_{2i} \cdot g^T \cdot e_{xi}(\dot{\theta}_i) + m_p \cdot R \cdot \cos(\beta) \cdot g^T \cdot p(\dot{\theta}_i) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \omega_{12i}^T \cdot J_{12i} \cdot \omega_{12i} &= - \begin{vmatrix} J_{12i}^{-1} & \omega_{12i} \\ \omega_{12i}^T & 0 \end{vmatrix} \cdot |J_{12i}| \\ \omega_p^T \cdot J_p \cdot \omega_p &= - \begin{vmatrix} J_p^{-1} & \omega_p \\ \omega_p^T & 0 \end{vmatrix} \cdot |J_p| \end{aligned} \quad (7)$$

$$T_i = \frac{1}{2} \cdot J_d \cdot \dot{\theta}_i^2 + \frac{1}{2} \cdot J_1 \cdot \dot{\theta}_i^2 - \frac{1}{2} \cdot \begin{vmatrix} J_{12i}^{-1} & \omega_{12i} \\ \omega_{12i}^T & 0 \end{vmatrix} \cdot |J_{12i}| - \frac{1}{2} \cdot \begin{vmatrix} J_p^{-1} & \omega_p \\ \omega_p^T & 0 \end{vmatrix} \cdot |J_p| \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(\dot{\theta}_i, t)}{\partial \dot{\theta}_i} &= J_d \cdot \dot{\theta}_i + J_1 \cdot \dot{\theta}_i \\ &- \begin{vmatrix} J_{12i}^{-1} & \omega_{12i} \\ \omega_{12i}^T & 0 \end{vmatrix} \cdot \text{Tr} \left(\begin{bmatrix} J_{12i}^{-1} & \omega_{12i} \\ \omega_{12i}^T & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 & \partial_{\dot{\theta}_i} \omega_{12i} \\ \partial_{\dot{\theta}_i} \omega_{12i}^T & 0 \end{bmatrix} \right) \cdot |J_{12i}| - \\ &- \begin{vmatrix} J_p^{-1} & \omega_p \\ \omega_p^T & 0 \end{vmatrix} \cdot \text{Tr} \left(\begin{bmatrix} J_p^{-1} & \omega_p \\ \omega_p^T & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 & \partial_{\dot{\theta}_i} \omega_p \\ \partial_{\dot{\theta}_i} \omega_p^T & 0 \end{bmatrix} \right) \cdot |J_p| \end{aligned} \quad (9)$$

$$\partial_{\dot{\theta}_i} \omega_{12i} = u_i + \frac{d_{1,1}}{d_{1,2}} \cdot v_i(\theta_i) \quad (10)$$

$$\partial_{\dot{\theta}_i} \omega_p = u_i + \frac{d_{1,1}}{d_{1,2}} \cdot v_i(\theta_i) + \frac{d_{2,1}}{d_{2,2}} \cdot w_i(\theta_i) \quad (11)$$

$$\frac{\partial V(\theta_i)}{\partial \theta_i} = m_{11i} \cdot \bar{\chi}_{1i} \cdot g^T \cdot \partial_{\dot{\theta}_i} h_i + m_{12i} \cdot \bar{\chi}_{2i} \cdot g^T \cdot \partial_{\dot{\theta}_i} e_{xi} + m_p \cdot R \cdot \cos(\beta) \cdot g^T \cdot \partial_{\dot{\theta}_i} p \quad (12)$$

$$\partial_{\dot{\theta}_i} h_i = \left(\frac{\text{Id}_{3 \times 3} - \left(\frac{u+v}{\|u+v\|} \right) \cdot \left(\frac{u+v}{\|u+v\|} \right)^T}{\|u+v\|} \right) \cdot \frac{d}{d\theta} (u+v) \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} e_{x(i)} = \left(\frac{\text{Id}_{3 \times 3} - \left(\frac{v+w}{\|v+w\|} \right) \cdot \left(\frac{v+w}{\|v+w\|} \right)^T}{\|v+w\|} \right) \cdot \frac{d}{dt} (v+w) \quad (14)$$

$$\partial_{\dot{\theta}_i} p = \frac{\partial}{\partial \theta} [p]_{\times} = \frac{1}{3} \cdot R_{\gamma} \cdot \left(\frac{\partial}{\partial \theta_i} R_{a_2}(\theta) \cdot W_2(\theta_i) + R_{a_2}(\theta) \cdot \frac{\partial}{\partial \theta_i} W_2(\theta_i) \right) \quad (15)$$

В связи с тем, одному положению приводных двигателей соответствует 8 положений платформы СПМ, был разработан метод решения задачи прямой кинематики, результаты которой сообщают конструктивные параметры, при которых осуществимы любые движения. Было установлено,

что критерием этого является действительность всех решений характеристического полинома 8 степени. При построении динамической модели был использован метод Лагранжа–Эйлера, на основании которого были выведены уравнения динамики. Для этого система была разделена на три канала, связанных общей вращающейся массой (платформой с закреплённой на ней солнечной батареей) и определены жёсткие и упругие элементы. Изменение моментов инерции в зависимости от угла поворота учитывается в задаче инверсной динамики без учёта приведения к валу двигателя. Изменение жёсткостей рассчитывается на основе Декартовой матрицы жёсткости по схемам, представленным на рис. 4

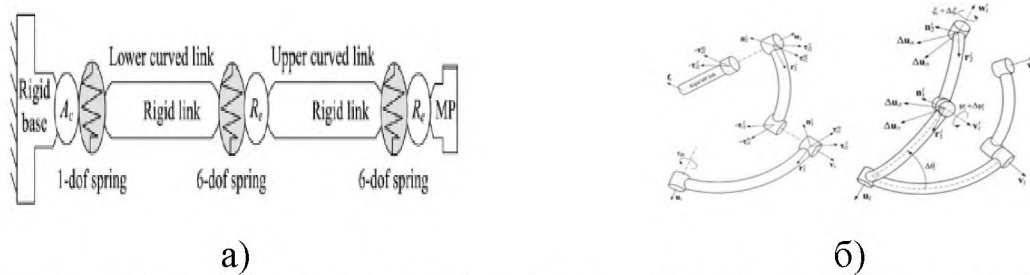


Рисунок 4. Рабочий орган электропривода, как трёхмассовая механическая система (а) и системы координат для оценки жёсткости дистальных и проксимальных звеньев (б)

Математическая модель механической части электропривода (уравнения движения) представлена в виде системы уравнений следующего вида:

$$\left\{ \begin{aligned} T = & \frac{1}{2} \dot{\theta}_1 (\mathbf{u}_1^T \mathbf{J}_1 \mathbf{u}_1) \dot{\theta}_1 + \frac{1}{2} \dot{\theta}_2 (\mathbf{u}_2^T \mathbf{J}_1 \mathbf{u}_2) \dot{\theta}_2 + \frac{1}{2} \dot{\theta}_3 (\mathbf{u}_3^T \mathbf{J}_1 \mathbf{u}_3) \dot{\theta}_3 + \\ & + \frac{1}{2} \dot{\psi}_1 (\mathbf{J}_{\psi_1}^T \mathbf{J}_{21} \mathbf{J}_{\psi_1}) \dot{\psi}_1 + \frac{1}{2} \dot{\psi}_2 (\mathbf{J}_{\psi_2}^T \mathbf{J}_{23} \mathbf{J}_{\psi_2}) \dot{\psi}_2 + \frac{1}{2} \dot{\psi}_3 (\mathbf{J}_{\psi_3}^T \mathbf{J}_{23} \mathbf{J}_{\psi_3}) \dot{\psi}_3 + \\ & + \frac{1}{2} \dot{\xi}_1 (\mathbf{J}_{\xi_1}^T \mathbf{J}_p \mathbf{J}_{\xi_1}) \dot{\xi}_1 + \frac{1}{2} \dot{\xi}_2 (\mathbf{J}_{\xi_2}^T \mathbf{J}_p \mathbf{J}_{\xi_2}) \dot{\xi}_2 + \frac{1}{2} \dot{\xi}_3 (\mathbf{J}_{\xi_3}^T \mathbf{J}_p \mathbf{J}_{\xi_3}) \dot{\xi}_3 \\ V = & \frac{1}{2} (\boldsymbol{\theta} - (\mathbf{J}_{\psi}^{-1} \boldsymbol{\psi} - \boldsymbol{\Psi}))^T \mathbf{C}_{12} (\boldsymbol{\theta} - (\mathbf{J}_{\psi}^{-1} \boldsymbol{\psi} - \boldsymbol{\Psi})) + \frac{1}{2} (\boldsymbol{\psi} - (\mathbf{J}_{\xi}^{-1} \boldsymbol{\xi} - \boldsymbol{\Xi}))^T \mathbf{C}_{23} (\boldsymbol{\psi} - (\mathbf{J}_{\xi}^{-1} \boldsymbol{\xi} - \boldsymbol{\Xi})) + \\ & + h_1(\theta_1) + h_2(\theta_2) + h_3(\theta_3, \Phi^{-1} \mathbf{J}_{\xi} \boldsymbol{\xi}) + e_{1x}(\theta_1, \Phi^{-1} \mathbf{J}_{\xi} \boldsymbol{\xi}) + e_{2x}(\theta_2, \Phi^{-1} \mathbf{J}_{\xi} \boldsymbol{\xi}) + e_{3x}(\theta_3, \Phi^{-1} \mathbf{J}_{\xi} \boldsymbol{\xi}) + p(\Phi^{-1} \mathbf{J}_{\xi} \boldsymbol{\xi}) \end{aligned} \right. \quad (16)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \mathbf{q}} = - \frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}} \quad (17)$$

$$\mathbf{q} = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \psi_1, \psi_2, \psi_3, \xi_1, \xi_2, \xi_3]^T$$

Универсальная модель вентильно-индукторного реактивного двигателя (ВИРД) в пространстве состояний в естественной системе координат получена с учётом зависимости индуктивностей от угла поворота вала Θ , а уравнения равновесия напряжений в векторно-матричной форме

будут иметь вид:

$$\frac{d\mathbf{I}_e}{dt} = \mathbf{L}_e^{-1} \cdot \mathbf{U}_e - \mathbf{L}_e^{-1} \cdot \omega \cdot \mathbf{I}_e \cdot \frac{d\mathbf{I}_e}{d\Theta} + \mathbf{L}_e^{-1} \cdot \mathbf{R}_e \cdot \mathbf{I}_e \quad (18)$$

Количество уравнений равно числу фаз m . Электромагнитный момент ВИРД при допущении постоянства фазных токов двигателя:

$$M_e = \frac{dW_m}{d\Theta} = \frac{1}{2} \cdot \mathbf{I}_e^T \cdot \frac{d\mathbf{L}}{d\Theta} \cdot \mathbf{I}_e \quad (19)$$

где W_m - магнитная энергия, запасённая взаимодействием m фаз двигателя. Каналы взаимодействия между фазами задаются через матрицы индуктивностей L_e и с помощью коммутационных функций нового типа, основанных на симметричных сигмоидах:

$$u_+ = \frac{1}{2} \cdot \left(\tanh(sp \cdot (\Theta - \theta_{on})) - \tanh(sp \cdot (\Theta - \theta_{off})) \right) \quad (20)$$

где sp , θ_{on} , θ_{off} - коэффициент кривизны сигмоиды, угол включения и отключения фазы. Прямое управление моментом реализуется гистерезисным омниполярным регулятором, формируемым по схожим принципам. Генераторный и двигательный режим переключается направлением гистерезисной нелинейности. Разработанные математические модели приводного электродвигателя в совокупности с механической частью представляют полную математическую модель, которая позволяет подключать алгоритмы управления и исследовать внутренние процессы преобразования электрической энергии в механическую.

Полная модель энергетического комплекса слежения за Солнцем на базе СПМ содержит блоки для решения прямой и обратной задач кинематики, а также расчёта электромеханических компонентов отдельных звеньев. В связи с тем, что звенья, служащие для управления ориентацией рабочего органа, оказывают сильное влияние на СПМ, были включены только составляющие сил, отвечающие за его перемещение.

Для выбора оптимальных параметров механической части электропривода на основе упрощённой кинематической схемы разработан алгоритм выбора оптимальных параметров (может использоваться любой известный алгоритм многокритериальной оптимизации). Набор этих инструментов оценки углового положения Солнца, расчётов тахограмм и нагрузочных диаграмм позволила определить рабочее пространство, а также необходимые угловые скорости и моменты для приводных электродвигателей.

Таким образом, было установлено, что имитационная модель может быть использована при разработке и отладке СПМ для создания алгоритмов управления СПМ, синтеза регуляторов для отдельных приводных двигателей.

В третьей главе рассматривается разработка системы управления энергетическим комплексом ориентации солнечных батарей нового типа, определяется её структура, законы и топология управления. Рассматривается трёхпараметрическая система поиска максимальной мощности солнечной панели, а $P_{\max}=f(V,\theta,\gamma)$. (рисунок 5).

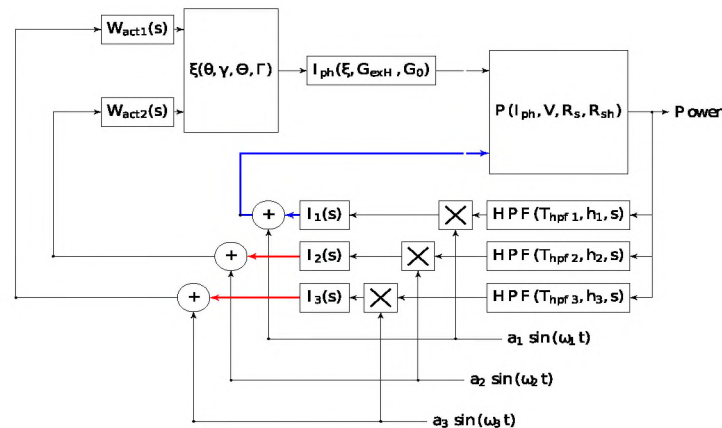


Рисунок 5. Обобщённая структура системы экстремального управления

Система поиска экстремума с вспомогательным модулирующим сигналом включает в себя:

1. Солнечную панель/батарею (элемент с экстремальной характеристикой);
2. Высокочастотный фильтр;
3. Демодулирующий умножитель;
4. Управляющий интегратор с коэффициентом усиления k_i ;
5. Модулирующий сумматор;
6. Три координатных приводных механизма, адаптированных к заданной динамике.

Имеющийся координатный электропривод выступает в качестве сложного нелинейного объекта с переменными параметрами, поэтому был выбран адаптивный алгоритм управления, преобразующий объект к заданной эталонной динамике, задаваемой динамическим ядром 1 порядка с настраиваемой постоянной времени:

$$W_{oy} = \frac{k}{T_{oy} \cdot s + 1} \quad (21)$$

где T_{oy} – постоянная времени объекта управления

и несколько динамических уровней, обуславливающих требуемый порядок регулятора (для управления по выходу):

$$W_N = \frac{1}{T_N \cdot s + 1} \quad (22)$$

где $T_N \ll 1$

Обобщённая эталонная динамика объекта имеет вид:

$$W_{OU_RES} = \left(\prod_{i=1}^n W_{N_i} \right) \cdot W_{OU} \quad (23)$$

В качестве источника управляемого сигнала для адаптации к требуемой динамике был использован нейросетевой рекуррентный регулятор, который формирует внутренний контур адаптации и имеет структуру, изображённую на рисунке 6.

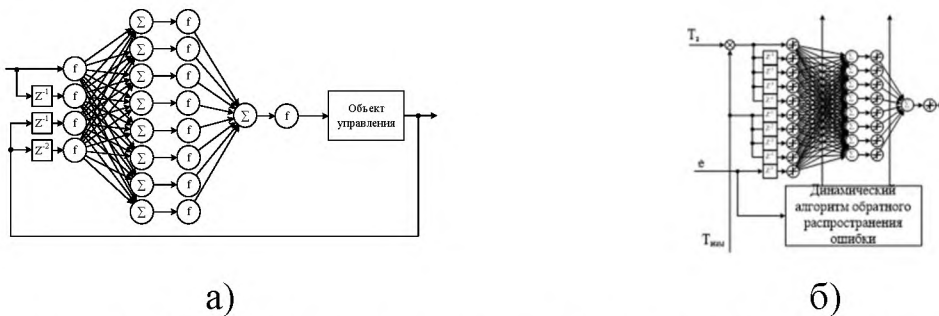


Рисунок 6. Общая схема управления по обратной связи (а) и базовая топология и архитектура CAP с НС-регулятором (б)

В качестве алгоритма подбора параметров (весовых коэффициентов) используется алгоритм обратного распространения ошибки с большим коэффициентом усиления. Структура матричного регулятора с алгоритмом адаптации представлена на рисунке 7.

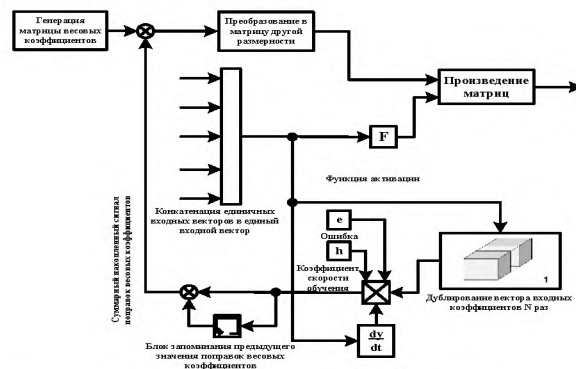


Рисунок 7. Фундаментальная модель рекуррентного регулятора

Обобщённая структурная схема одного канала системы поиска экстремума представлена на рис. 8. После введения контура адаптации принимается, что система приобретает классический вид (с учётом

качественной адаптации к требуемой эталонной динамике).

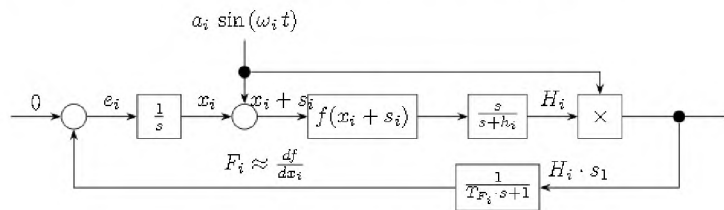


Рисунок 8. Базовая структура экстремального управления

Система поиска экстремума с вспомогательной модуляцией имеет ряд существенных особенностей:

1. Система всегда сходится к предельному циклу вокруг стационарной точки.

2. Устойчивые положения всех переменных состояния заранее неизвестны.

3. В качестве целевого состояния нельзя задавать ни нулевое значение градиента, ни форму предельного цикла вокруг точки равновесия, т.к. это интегральные показатели, требуемые законы изменения которых также заранее неизвестны. Управление по форме предельного цикла является нецелесообразным, т.к. при стремлении системы к предельному циклу, теряется полезная часть интегральной характеристики и система приходит в неверное установившееся состояние.

4. С помощью устройства измерения гессиана, возможно измерение этой координаты, которая не является интегральной характеристикой, но требует создания дополнительного канала влияния гессиана на градиент.

Стандартная система поиска максимума мощности в рассматриваемом энергетическом комплексе описывается системой дифференциальных уравнений, моделирующих градиентный спуск. Применив линеаризацию обратной связи, можно деформировать градиентный поток с целью приведения к новой требуемой форме. В качестве нового потока был выбран модифицированный поток Нестерова, дополненный вспомогательным масштабирующим каналом:

$$F(x, \dot{x}, \ddot{x}, \nabla f(x), \nabla^2 f(x)) = \ddot{x} + \alpha \cdot \dot{x} - \beta \cdot \nabla^2 f(x) - [F(\nabla f(x), \nabla^2 f(x))] \cdot \nabla f(x) = 0 \quad (24)$$

При изменении градиентного потока изменится также поведение внутренних переменных состояния энергетического комплекса для слежения за Солнцем.

Тогда система дифференциальных уравнений будет иметь вид.

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} + \alpha \cdot \dot{x} - \beta \cdot \nabla^2 f(x) - \left[F \left(\nabla f(x), \nabla^2 f(x) \right) \right] \cdot \nabla f(x) = 0 \\ (o_1 \dots o_1) = x_1 + s_1 \\ \dot{z}_1 = -z_1 + f(x) \\ \dot{g}_1 = -g_1 + z_1 \cdot s_1 \\ \vdots \\ \ddot{x} + \alpha \cdot \dot{x} - \beta \cdot \nabla^2 f(x) - \left[F \left(\nabla f(x), \nabla^2 f(x) \right) \right] \cdot \nabla f(x) = 0 \\ (o_n \dots o_n) = x_n + s_n \\ \dot{z}_n = -z_n + f(x) \\ \dot{g}_n = -g_n + z_n \cdot s_n \end{array} \right. \quad (25)$$

Существенной проблемой при введении заданной динамики объекта регулирования является изменения фаз модулирующих сигналов, что приводит к неверной оценке градиента. Был выбран способ корректирования фаз модулирующих сигналов путём вычисления необходимого сдвига с помощью замены оператора Лапласа на $s = j\omega$ и разложения на «прямоугольные компоненты» $y_0 = |H(j\omega)|$ и $\phi = \text{Arg}(H(j\omega))$.

Таким образом устраняется влияние динамики эталонной модели ОУ, переменных параметров системы и промежуточных переменных состояния. Отдельным достоинством является то, что не требуется точное знание экстремальной характеристики солнечной батареи. Затем вводится внешний контур, задающий искусственное потенциальное поле и формирующий отталкивающий барьер, ограничивающий область действия гессиана мощностной характеристики солнечной батареи. В качестве источника потенциального поля были применены навигационные функции.

Алгоритм преобразования формы градиентного потока:

1. Записать исходную систему с нелинейными функциями и передаточными звеньями в систему дифференциальных уравнений.
2. Трансформировать её в форму Коши (в аффинное пространство состояний).
3. Ввести входной управляющий сигнал и проверить на управляемость и наблюдаемость.
4. Задать выход, референсный сигнал и постоянную времени.
5. Синтезировать линеаризующий сигнал обратной связи и замкнуть исходную систему.
6. Проверить переход в экстремум.

В качестве нового критерия конечного состояния выбран следующий:

$$Q = \text{atan2}(u \cdot v, \|u \times v\|) = -1 \quad (26)$$

где $u = [G, H, 0]$, $v = [0, -1, 0]$

Поскольку вектор состояния целиком заранее неизвестен, мы можем использовать навигационную функцию следующего вида.

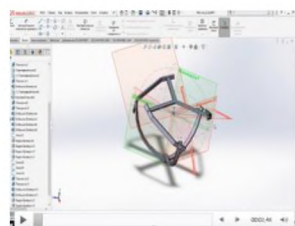
$$\Phi = \frac{1}{(1 + \prod_{i=0}^n \beta_i)^{\frac{1}{k}}} \quad (27)$$

Выбор постоянной времени и динамики отталкивающего барьера обеспечивает минимизацию ошибки установившегося состояния. Более того, применение данной схемы приводит к повышению скорости переходных процессов.

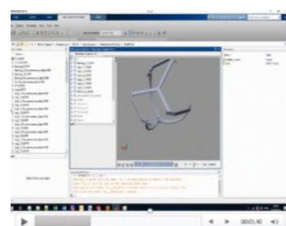
В четвёртой главе разработана конечно-элементная модель СОСБ на базе СПМ, включающая в себя синтез модели в SolidWorks, преобразование в блок-диаграмму в Simscape Multibody, подключение к модели опорно-поворотного механизма модели электродвигателя и системы управления. Эксперименты на конечно-элементной модели, предназначенной для исследования слежения за Солнцем (в нашем случае при поиске и фиксации в точке максимальной мощности) позволяют выявить критерии подобия конечно-элементной модели реальной установке. На рисунке 9 (а,б) представлены виртуальный прототип в программе SolidWorks, блок-диаграмма в Simscape Multibody, а на рисунке 10 – базовая физическая модель солнечной энергоустановки на базе СПМ.

Обработка результатов экспериментов показывает, что энергетический комплекс для слежения за Солнцем на базе СПМ выполняет заложенные в его динамику особенности функционирования, а также соответствие показателей оптимальным значениям.

Это доказывает корректность теоретических исследований и разработанных технических решений по исследованию функционирования астроследящего энергетического комплекса на базе сферического манипулятора для слежения за Солнцем.



а)



б)

Рисунок 9. Конечно-элементная модель СПМ в SolidWorks (а) и прототип СПМ в Simscape Multibody для подключения алгоритмов управления (б)



Рисунок 10 – Базовая физическая модель солнечной энергоустановки на базе сферического параллельного манипулятора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложенные принципы построения программной и аппаратной архитектуры позволили разработать энергетический комплекс для слежения за Солнцем на базе СПМ. Подход, заложенный в основу этой архитектуры, может быть использован для управления не только СПМ, но и близкими категориями оборудования, например, антеннам и телескопам. Такое решение позволяет совместно использовать различные виды СПМ для создания гибких производственных систем.

2. Разработанная обобщённая математическая модель даёт возможность осуществлять формирование траектории перемещения рабочего органа манипулятора с учетом рассчитанных моментов, действующих на него, что в итоге позволяет исследовать применение алгоритмов управления и исследовать внутренние процессы преобразования электроэнергии.

3. Разработанные методики проектирования позволяют выбирать оптимальные параметры механизма и приводных электродвигателей, соответствующие заданным критериям оптимизации и позволяют получать объект с минимальным энергопотреблением и минимально требуемой массой.

4. Разработана реализация регуляторов адаптации объекта управления к требуемой динамике, структура система поиска максимальной мощности солнечной панели с трансформированным градиентным потоком, учитывающая влияние гессiana на градиент и позволяющая ускорять переходные процессы и позиционное управление рабочим органом

манипулятора при существенных изменениях сил, действующих на них.

5. Разработанная структура программных средств позволила эффективно разделить их между компонентами процессорной системы управления. Организация компонентов системного ПО по модульному принципу даёт возможность проводить их отладку и усовершенствование независимо друг от друга.

6. Реализован виртуальный прототип, построенный на основании предложенных принципов, результаты испытаний которого подтвердили соответствие разработанного энергетического комплекса для слежения за Солнцем существующим технологическим требованиям.

7. Выполненное впервые глубокое исследование энергетических свойств представляет собой комплекс инструментов проектирования, моделирования и виртуального прототипирования, обеспечивающих совершенствование концепции разработки и исследования позиционно-слеющих энергетических комплексов для слежения за Солнцем позволяет сделать вывод о целесообразности использования в качестве объекта-«маяка» для массива классических солнечных панелей. Они рекомендуются в качестве таковых на солнечных электростанциях.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования и рекомендации:

Решение поставленных в диссертации задач позволяет получить научно-технический задел для разработки и дальнейшей реализации проектов по совершенствованию крупных солнечных электростанций с большим количеством систем слежения за Солнцем, проектирования и синтеза солнечных коллекторов и печей, а также создания новых конструкций телескопов и автоматизированных комплексов на их основе.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определённых ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. **Sologubov, A.Yu.** Approach to Accounting of Non-Linear Properties by Example of Electric Drive with DC Motor Controlled Type Inverter H-Bridge / A.Yu. Sologubov, I.M. Kirpichnikova // Proceedings – 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2018, Moscow, 15–18 мая 2018 года. – Moscow, 2018. – 8729138 (0.37 п.л. / 0.18 п.л.) (SCOPUS)

2. **Sologubov, A.Yu.** Calculation of the Parameters of the Daily Movement of the Sun. Contour Maps of Kinematic Parameters / A.Yu. Sologubov, I.M. Kirpichnikova // Proceedings – 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019, Sochi, 25–29 марта 2019 года. – Sochi, 2019. – 8742935. (0.37 п.л. / 0.18 п.л.) (SCOPUS)

3. **Sologubov, A.Yu.** Electrotechnical Complexes of Heliotechnical Devices: a Generalized Classification / A.Yu. Sologubov, I.M. Kirpichnikova // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19. – № 1. – С. 35-42. (0.43 п.л. / 0.25 п.л.)

4. **Сологубов, А.Ю.** Кинематические свойства электротехнических комплексов с системой слежения за Солнцем, полученные методом полиномиальной аппроксимации небесных координат / А.Ю. Сологубов, И.М. Кирпичникова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19. – № 3. – С. 72-83. (0.75 п.л. / 0.37 п.л.)

5. Kirpichnikova I. M., Multivariable control of solar battery power by extremum seeking: Starting from linear analysis / I.M. Kirpichnikova, **A.Yu. Sologubov** // Machines. – MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute). – Basel. – Switzerland. – 2019. – Vol. 7. – № 4. – P. 64. (2 п.л. / 1 п.л.) (SCOPUS)

6. **Sologubov, A.Yu.** Sigmoids superposition for signals approximation with a deadband for sweep in a sequence of quasi-rectangular pulses / A.Yu. Sologubov, I.M. Kirpichnikova // Proceedings – 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, ICOECS 2020, 27 - 30 October 2020, – Ufa: State Aviation Technical University. – 2020. – 9278429. (0.43 п.л. / 0.25 п.л.) (SCOPUS)

7. **Sologubov, A.Yu.** Multivariable Control of Solar Battery Power: Electrotechnical Complex as Object with Hessian-Driven Gradient Flows / A.Yu. Sologubov, I.M. Kirpichnikova // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2021. – Т. 21. – № 3. – С. 57-65. (0.55 п.л. / 0.31 п.л.)

8. **Sologubov, A.Yu.** Multivariable Control of Solar Battery Power by Extremum Seeking with Hessian-driven Gradient Flows / A.Yu. Sologubov, I.M. Kirpichnikova // Proceedings – 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, ICOECS 2021, 16 – 18 November 2021, – Ufa: State Aviation Technical University. – 2021. – P. 202–208 (0.43 п.л. / 0.25 п.л.) (SCOPUS)

9. **Sologubov, A.Yu.** Switched-Reluctance Drive with Sigmoids-Based Pulse-Phase Control / A.Yu. Sologubov, I.M. Kirpichnikova // Proceedings – 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, ICOECS 2021, 16 – 18 November 2021, – Ufa: State Aviation Technical University. – 2021. – P. 209-213 (0.31 п.л. / 0.18 п.л.) (SCOPUS)

10. Кирпичникова, И.М. Результаты научных исследований и подготовки специалистов по возобновляемой энергетике в Южно-Уральском государственном университете / И.М. Кирпичникова, В.А. Заварухин, А.Ю. Сологубов, В.В. Шестакова // Вестник Московского энергетического института. – 2022. – № 4. – С. 90-97. (0.49 п.л. / 0.12 п.л.)

Патенты, свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019665999 РФ. Программа формирования двухпараметрических временных сеток для вычисления солнечной позиции и обработки угловых данных расчёта / А.Ю. Сологубов, И.М. Кирпичникова; Правообладатель: ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)». – № 2019665234; дата поступления заявки: 27.11.2019; дата государственной регистрации: 04.12.2019, Бюллетень. №12.

Публикации в других изданиях:

12. **Сологубов, А.Ю.** Перспективы использования систем экстремального регулирования ориентации гелиоустановок / А.Ю. Сологубов, И.М. Кирпичникова //

Электротехнические комплексы и системы: Материалы международной научно-практической конференции. В 2-х томах, 19 октября 2017 г. – ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа, 2017. – Т. 2. – С. 42-47. (0.37 п.л. / 0.18 п.л.)

13. **Сологубов, А.Ю.** Виртуальная имитационная модель электромеханической системы на примере азимутального привода постоянного тока для исследования гелиоэнергетических установок / А.Ю. Сологубов // Силовая электроника. – 2018. – Т. 1. – № 7. – С. 74-79. (0.38 п.л. / 0.38 п.л.)

14. **Сологубов, А.Ю.** Электромеханотронный подход к созданию систем самонаведения на Солнце в русле специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» / А.Ю. Сологубов, И.М. Кирпичникова // Электротехнические комплексы и системы: Материалы Международной научно-практической конференции, 24 октября 2018 года. – ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа. – 2018. – С. 62-65. (0.25 п.л. / 0.12 п.л.)

15. **Сологубов, А.Ю.** О выборе электромеханического преобразователя энергии для систем слежения за солнцем / А.Ю. Сологубов, И.М. Кирпичникова // Электротехнические комплексы и системы: Материалы Международной научно-практической конференции, 24 октября 2018 года. – ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа. – 2018. – С. 90-93. (0.25 п.л. / 0.12 п.л.)

16. **Сологубов, А.Ю.** К вопросу о переходе координатных приводов систем слежения за Солнцем на новые типы электрических машин / А.Ю. Сологубов, И.М. Кирпичникова // Наука ЮУрГУ: Материалы 70-й научной конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников. Секции технических наук, 25 апреля – 04 мая 2018 года. – ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», Челябинск. – 2018. – С. 496-502. (0.43 п.л. / 0.25 п.л.)

17. **Сологубов, А.Ю.** Управление автономными гелиоэнергетическими системами: результаты расчёта параметров суточного движения Солнца в Челябинске / А.Ю. Сологубов, И.М. Кирпичникова // Альтернативная энергетика в регионах России: Материалы молодежной научной конференции «АЭР-2018», 5-7 декабря 2018 г. – Астрахань, 2018. – С. 279-283. (0.31 п.л. / 0.18 п.л.)

18. **Сологубов, А.Ю.** Обзор современных сенсорных технологий в системах слежения за Солнцем / А.Ю. Сологубов, И.М. Кирпичникова // Технический оппонент. – № 1(2). – 2019. – С. 54-60. (0.43 п.л. / 0.25 п.л.)

19. **Сологубов, А.Ю.** О методах и инструментах исследования гелиоэнергетических установок / А.Ю. Сологубов // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти проф. Данилова Н. И. (1945 – 2015) - Даниловских чтений, 09 – 13 декабря 2019 г. – ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, 2019. – С. 660-664. (0.31 п.л. / 0.31 п.л.)

20. Kirpichnikova, I.M. Adaptive position control of rigid body to the maximum of an optimized parameter: by solar energy installation example / I.M. Kirpichnikova, **A.Yu. Sologubov** // Международная конференция по дифференциальным уравнениям и

динамическим системам. Тезисы докладов, 3-8 июля 2020 г. – Суздаль, 2020. – С. 209-211. (0.18 п.л. / 0.12 п.л.)

21. Кирпичникова, И.М. Особенности эксплуатации солнечных энергоустановок в различных климатических условиях / И.М. Кирпичникова, И.Б. Махсумов, **А.Ю. Сологубов**, В.В. Шестакова // Энергоэффективность. Ценология. Экология и Энергобезопасность: Материалы научной конференции. Под научной редакцией Л.Х. Зайнутдиновой М.Г. Тягунова, 16 – 19 сентября 2020 г. – Астрахань, 2020. – С. 46-55. (0.61 п.л. / 0.12 п.л.)

Сологубов Андрей Юрьевич

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА БАЗЕ СФЕРИЧЕСКОГО ПАРАЛЛЕЛЬНОГО МАНИПУЛЯТОРА

Специальность 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 2023. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 82/156.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.