

**Селин Иван Андреевич**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ  
ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО  
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ СОЛНЦЕМОБИЛЕМ НА  
ЗАДАННОМ МАРШРУТЕ**

2.3.5. Математическое и программное обеспечение  
вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

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

Научный руководитель: **ДРОБИНЦЕВ Павел Дмитриевич**,  
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **КОЗНОВ Дмитрий Владимирович**, доктор  
технических наук, доцент, профессор кафедры  
системного программирования, ФГБОУ ВО  
«Санкт-Петербургский государственный  
университет»

**ЗМЕЕВ Олег Алексеевич**, доктор-физико-  
математических наук, профессор, академический  
руководитель научно-образовательного центра  
«Высшая IT-школа», ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский Томский государственный  
университет»

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова  
(Ленина)»**

Защита состоится «25» апреля 2024 г. в 16<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного  
совета У.2.3.5.38 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого» в удаленном интерактивном режиме на платформе MS Teams:  
<https://bit.ly/3wE8W73> .

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО  
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте  
<https://www.spbstu.ru/science/> .

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
У.2.3.5.38, к.т.н., доцент



Дробинцев Павел Дмитриевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.** В последнее время идёт активная трансформация рынка личных и коммерческих транспортных средств. Автомобили, использующие двигатели внутреннего сгорания, начинают уступать свои места электромобилям, гибридам и прочим транспортным средствам с альтернативными источниками энергии. И если электромобили ещё похожи на традиционные автомобили с точки зрения процессов управления энергией, то гибридные и альтернативные транспортные средства уже устроены сложнее. Например, солнцемобили, представляющие собой электромобиль, дополненный солнечными панелями с контроллерами заряда, способны восполнять запас энергии по ходу движения. Работающие для обычных автомобилей методы решения прикладных задач (прохождение дистанции с минимальными тратами энергии, прохождение дистанции за минимальное время) будут неэффективными для транспортных средств с возможностью пополнения энергии. Это обуславливается принципами работы солнечных панелей и изменённой конструкцией солнцемобилей в сравнении с традиционными транспортными средствами.

Одна из таких прикладных задач, где существующие методы неприменимы – построение эффективного энергообеспечения солнцемобилей на заданном маршруте для максимально быстрого прохождения дистанции в заданных ограничениях, к которым относятся ёмкость аккумуляторной батареи, начальное количество энергии, площадь солнечных панелей, их эффективность и т.д. Для традиционных транспортных средств эту задачу можно свести к задаче распределения ресурсов. В случае солнцемобилей, количество доступной энергии будет зависеть не только от начального количества энергии в системе, но и от режимов движения, погодных условий, рельефа местности.

Дополнительно усложняет задачу тот факт, что траты энергии зависят от одних факторов (режим движения, профиль дорожного полотна), а получение – от других (время суток, временной промежуток солнечного воздействия, местонахождение солнцемобилей, погодные условия). Получение энергии можно свести к зависимости от режимов движения, но только через рекуррентные зависимости по времени. С ростом длины маршрута, становится больше и количество таких рекуррентных зависимостей, из-за чего получение полного решения значительно усложняется.

Для решения данной задачи разрабатывают специализированное программное обеспечение, которое реализует методы поиска эффективных режимов движения на маршруте. Указанную задачу уже пытались решить в своих работах Daniel M., Kumar P., Pudney P., Howlett P., Mocking C., Schoeman S., Carroll J., Yesil E., Onol A., Icke A., Atabay O., Guerrero Merino E., Duarte-Mermoud M. A. В этих исследованиях удалось решить поставленную задачу, однако либо были использованы аналитически выведенные эвристики, либо очень сильно укрупнённые решения, в итоге не предоставляющие способа формирования эффективного использования энергии на всю длину маршрута. При этом Mocking C., Guerrero Merino E., Duarte-Mermoud M. A. использовали упрощённые

долгосрочные и детальные краткосрочные стратегии энергообеспечения. Но построения полного решения не производилось. Детальная стратегия строилась только для ближайшего горизонта планирования (несколько часов/остаток дня).

Резкая смена погодных условий или неидеальное исполнение стратегии может привести к её неактуальности или невыполнимости. Это, в свою очередь, приводит к необходимости полного пересчёта стратегии для учёта обновляющихся условий. Вычисления на основе скорости движения по дистанции и статистика на соревнованиях показывают, что достаточно делать новый расчёт каждые 10-15 минут, чему рассмотренные методы и их реализации не отвечают из-за использования укрупнённых решений.

Возникает потребность в разработке программного обеспечения с применением методов и алгоритмов, позволяющими получить эффективное использование энергии солнцемобилем на заданном маршруте за минуты в полном виде. Таким образом, тема работы является актуальной.

**Цель и задачи диссертационной работы.** Целью диссертационной работы является разработка методов и алгоритмов программного обеспечения для эффективного использования энергии солнцемобилем на полную длину маршрута с учётом изменяющихся внешних условий.

Для достижения цели ставились и решались следующие задачи:

1. Исследование программных средств поддержания эффективного использования энергии солнцемобилем на заданном маршруте;
2. Создание имитационной модели объекта исследования;
3. Разработка метода построения сокращённого представления маршрута;
4. Разработка алгоритма обеспечения наименьшего времени движения солнцемобиля на маршруте за счет декомпозиции исходной задачи и итеративного уточнения результатов;
5. Создание программного комплекса на основе разработанных методов и алгоритмов;
6. Оценка эффективности разработанных методов и алгоритмов;
7. Решение прикладных задач формирования эффективного использования энергии солнцемобилем на разработанном программном комплексе.

**Объектом исследования** являются процессы трат и накопления энергии солнцемобилем на заданном маршруте.

**Предметом исследования** являются методы и алгоритмы обеспечения эффективного энергообеспечения солнцемобиля на заданном маршруте для минимизации времени прохождения дистанции в изменяющихся условиях.

**Научные результаты и их новизна**

1. Создана имитационная модель движения солнцемобиля на дистанции, отличающаяся векторизацией вычислений и возможностью применения аппарата автоматического дифференцирования;

2. Предложен метод повышения производительности расчёта энергообеспечения солнцемобиля за счёт уменьшения количества независимых переменных, отличающийся изменением схемы дискретизации дистанции для создания изменённого представления моделируемого маршрута через параметрическое объединение участков пути с пересчётом характеристик участков;
3. Предложен алгоритм обеспечения наименьшего времени прохождения маршрута солнцемобилем, осуществляющий декомпозицию исходной задачи на подзадачи, который отличается итеративным уточнением результатов моделирования для формирования новых подзадач и ограничений их совместимости.

### **Теоретическая значимость работы**

1. Векторизованные вычисления и автоматическое дифференцирование позволяет создать высокопроизводительную модель энергообеспечения солнцемобиля с малым временем исполнения и возможностью использования методов оптимизации первого и второго порядка, что снижает время решения задачи;
2. Метод сокращения представления моделируемого маршрута позволяет снизить вычислительную сложность задачи оптимизации при пренебрежимо малой погрешности моделирования по сравнению с использованием полного представления проходимой дистанции;
3. Алгоритм декомпозиции исходной задачи на подзадачи позволяет получить постепенно уточняющееся решение и принципиально получить детальное решение.

**Соответствие паспорту научной специальности.** Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.3.5 «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей»:

- 3. Модели, методы, алгоритмы, языки и программные инструменты для организации взаимодействия программ и программных систем – создание имитационной модели движения солнцемобиля на базе системного подхода для организации взаимодействия с модулем оптимизации; предлагается использование мультипарадигменного языка программирования для реализации имитационного моделирования, формализации задачи оптимизации и прикладной части, что позволяет уменьшить количество интеграционного кода и повысить скорость разработки;
- 5. Программные системы символьных вычислений – применение автоматического дифференцирования: элементарных операций дифференцирования к исходному коду процедур имитационной модели для автоматического получения процедуры расчёта значения производной в точке;
- 8. Модели и методы создания программ и программных систем для параллельной и распределенной обработки данных, языки и инструментальные средства параллельного

программирования – предложено использование векторизованных вычислений в имитационной модели движения солнцемобиля, что является неявным параллелизмом на уровне данных.

**Практическая значимость работы и внедрение.** Предложенные модели и методы доведены до формализованных алгоритмов на языке Julia в виде программного комплекса. Эффективность разработанных методов показана на реальных прикладных задачах. С помощью предложенных методов в рамках инженерно-спортивной команды Polytech Solar была решена задача формирования эффективного использования энергии солнцемобилем на дистанции World Solar Challenge, применимая на практике. Теоретические разработки могут быть использованы в решениях для прочих маршрутов и солнцемобилей. Разработанные методы применимы для других задач, где транспортные средства имеют возможность накопления энергии по ходу движения, путём соответствующей модификации имитационной модели.

**Личный вклад автора.** Основные положения научной новизны, практической значимости и реализация в виде программного комплекса сделаны автором лично.

**Методология и методы исследования.** Использовался аппарат имитационного моделирования, методов оптимизации и параллельных вычислений.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Имитационная модель движения солнцемобиля на дистанции, отличающаяся векторизованными вычислениями и возможностью применения аппарата автоматического дифференцирования;
2. Метод повышения производительности расчёта энергообеспечения солнцемобиля, отличающийся изменением схемы дискретизации маршрута для создания изменённого представления моделируемого маршрута через параметрическое объединение участков с пересчётом характеристик участков с помощью численного интегрирования;
3. Алгоритм обеспечения наименьшего времени прохождения маршрута солнцемобилем, осуществляющий декомпозицию исходной задачи на подзадачи, отличительной особенностью которого является итеративное уточнение результатов моделирования для формирования новых подзадач и ограничений их совместимости;

**Степень достоверности и апробация работы.** Обеспечивается валидацией результатов моделирования на базе сравнения с реальными данными. Также обеспечивается сравнением с результатами работ других авторов по теме.

**Публикации.** Основные положения диссертации изложены в 5 печатных работах, в том числе 1 работа в журналах из перечня ВАК, 2 работы проиндексированы в Scopus и 2 в перечне РИНЦ.

Получен 1 патент на полезную модель и 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Основные положения и результаты диссертационной работы представлены и обсуждены на конференциях: «12-я Мульти конференция по проблемам управления (МКПУ-2019)» (ИПУ РАН, 2019), “International Scientific Electric Power Conference ISEPC-2019” (СПбПУ, 2019), «Современные технологии в теории и практике программирования» (СПбПУ, 2020).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, списка иллюстраций и списка таблиц. Объем диссертации – 123 страницы; диссертация содержит 40 рисунков, 5 таблиц, список литературы включает 136 названий.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение.** В разделе «Введение» показана актуальность темы диссертации, определены цель и задачи проведенных исследований, отражена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения о реализации работы, апробации, публикациях и структуре диссертации.

**В первой главе** рассмотрена проблематика гонок на электромобилях с солнечными панелями. Рассмотрены спортивные и технические ограничения регламента. Проанализированы процессы трат и получения энергии, выявлены зависимые и независимые переменные. Это позволило формализовать задачу как задачу оптимизации по минимизации времени прохождения дистанции за счёт изменения режимов движения, с учётом ограничений реализуемости по уровням энергии в системе:

$$\begin{aligned} J(V) &= \frac{s}{V} = t_{finish} \rightarrow \min \\ \text{s.t. } 0 &\leq V \leq V_{\max} \\ 0 &\leq E(V) \leq E_{\max}, \end{aligned} \quad (0.1)$$

где  $s$  – дистанция,  $V$  – скорость движения,  $V_{\max}$  – максимально достижимая скорость,  $t_{finish}$  – время прохождения дистанции,  $J(V)$  – оптимизируемый функционал,  $E(V)$  – количество энергии в системе,  $E_{\max}$  – энергетическая ёмкость системы.

Данная глава содержит анализ актуальных подходов в области построения программных комплексов управления энергией солнцемобиля. Выявлено, что существующие подходы позволяют либо предоставлять укрупнённые решения, либо производить детальное планирование только в краткосрочной перспективе.

Проведённое исследование позволило сформулировать цель диссертационной работы: разработка методов и алгоритмов программного обеспечения эффективного использования энергии солнцемобилем на заданном маршруте с учётом изменяющихся внешних условий на полную длину дистанции, т.к. существующие позволяют получать только укрупнённые решения.

Во второй главе предложены методы и алгоритмы, позволяющие получить решение, опережающее рассмотренные в первой главе подходы. Схема решения задачи представлена на Рис. 1.

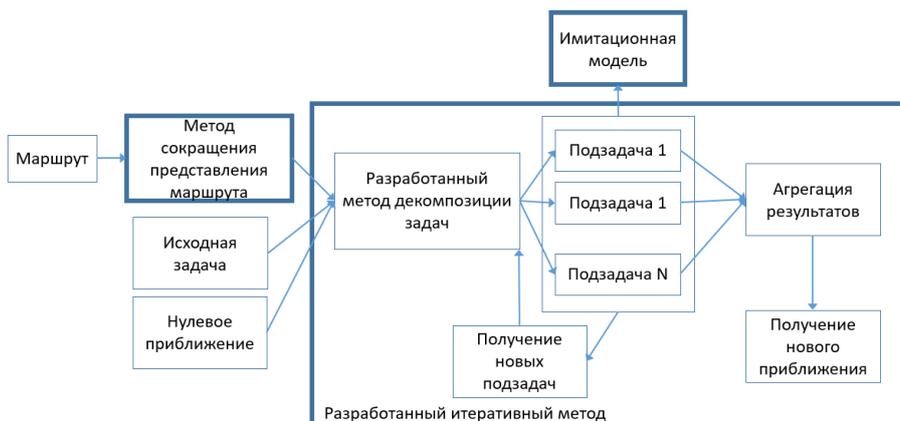


Рис. 1. Общая схема предлагаемого решения

Ниже приведён список разработанных методов с их особенностями реализации.

**1. Имитационная модель движения солнцемобиля на дистанции с векторизованными вычислениями и возможностью применения аппарата автоматического дифференцирования.** Структура модели показана на Рис. 2.

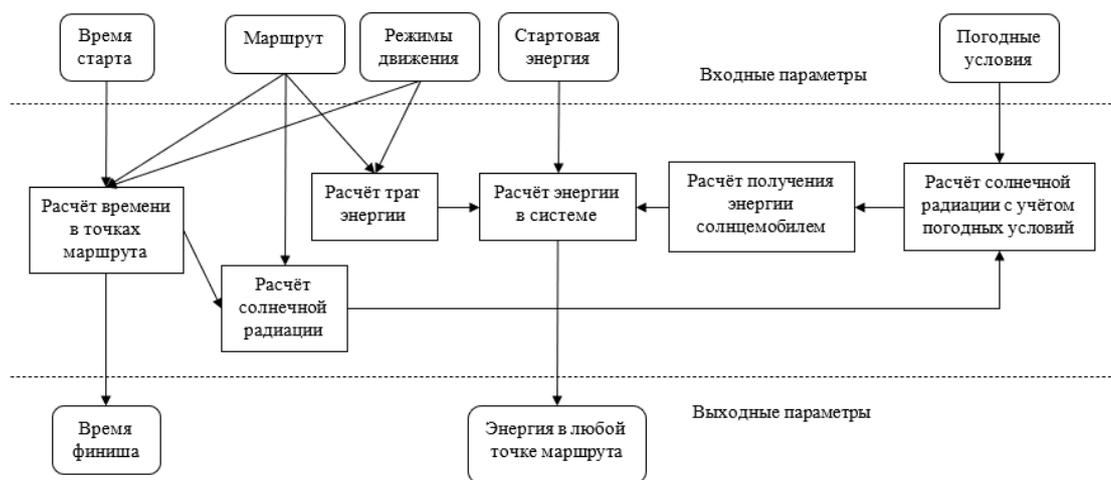


Рис. 2. Структура имитационной модели

Математическая модель помогает осуществлять комплекс расчётов, необходимых для симуляции движения солнцемобиля на заданном маршруте. По своему классу это дискретная детерминированная имитационная модель динамической системы с шагом дискретности по минимальной единице описания маршрута движения. Модель позволяет задавать маршрут движения и погодные условия в качестве параметров. В качестве независимых переменных выступают скорости движения на каждой из частей маршрута, время и энергия в системе на момент старта. В качестве зависимых переменных – энергия в системе в любой точке маршрута и общее время прохождения дистанции (или момент времени финиша как эквивалент). Для этого на каждой из частей маршрута вычисляются по разностным уравнениям: траты энергии на передвижение солнцемобиля, получаемая от

солнечных панелей энергия, количество энергии в системе, время прохождения участка. В результате получается следующая модель энергетического баланса:

$$\begin{aligned} E_i &= E_{i-1} + E_{i-1}^+ - E_{i-1}^-, 2 \leq i \leq N \\ E_1 &= E_{\max} \\ 0 &\leq E_i \leq E_{\max} \end{aligned} \quad (1.1)$$

При этом траты энергии выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} E^- &= \sum_{i=1}^{N-1} \left( \frac{D_i + W_{x_i} + R_i}{\eta} \cdot \Delta s_i + \frac{P \Delta s_i}{V_i} \right) = \\ &= \sum_{i=1}^{N-1} \left( \frac{\frac{P}{2R_A T} V_i^2 S_{front} C_D + mg \sin \alpha_i + mg(\mu_1 + \mu_2 V_i \cos \alpha_i)}{\eta} \cdot \Delta s_i + \frac{P \Delta s_i}{V_i} \right) \end{aligned} \quad (1.2)$$

А поступления энергии задаются следующим соотношением:

$$E_i^+ = \sum_{i=1}^N E_i^+(S_i, T_i) = \sum_{i=1}^N E_i^+(S_i, T_i, \sum_{j=1}^{i-1} V_j) \quad (1.3)$$

В указанных соотношениях:  $E_i$  - количество энергии после прохождения  $i$ -го участка маршрута,  $E_i^+$  - поступления энергии на  $i$ -ом участке,  $E_i^-$  - траты энергии  $i$ -ом участке,  $N$  - количество участков маршрута,  $D_i$ ,  $W_{x_i}$  и  $R_i$  - силы аэродинамического сопротивления, тяжести и сопротивления качению на  $i$ -ом участке маршрута,  $\Delta s_i$  - длина  $i$ -го участка маршрута,  $V_i$  - скорость прохождения  $i$ -го участка маршрута,  $P$  - операционные потери,  $R_A$  - газовая постоянная,  $S_{front}$  - лобовая площадь,  $C_D$  - коэффициент аэродинамического сопротивления,  $m$  - масса солнцемобиля,  $\mu_1$  и  $\mu_2$  - коэффициенты трения шин.

Отличительными достоинствами модели являются возможность применения аппарата автоматического дифференцирования и расчётов в векторизованном виде для всего маршрута целиком, вместо последовательного расчёта по участкам. Векторизация вычислений повышает производительность модели благодаря использованию параллелизма на уровне данных и упрощает исходный код. Применение автоматического дифференцирования, основанного на использовании полиморфизма типов и перегрузке операторов, в разработанной модели внутри оптимизируемого функционала позволяет использовать более широкий класс методов оптимизации, при этом процедуры вычисления градиента и гессиана не требуют отдельной реализации и дают точный результат. Кроме того, использование автоматического дифференцирования позволяет легко получать значения производных в системах, которые сложно описываются математическим представлением.

**2. Метод повышения производительности расчёта энергообеспечения солнцемобиля, состоящий в уменьшении количества независимых переменных путём построения сокращённого представления маршрута, отличающийся изменением**

***схемы дискретизации маршрута через параметрическое объединение участков с пересчётом характеристик участков с помощью численного интегрирования.***

Данные маршрута представлены в виде точек на географической местности. Далее из них высчитывается необходимое для моделирования представление в виде участков между точками, где добавляются характеристики: протяжённости, средней высоты над уровнем моря, перепад высот, информации о погодных условиях.

Метод состоит в выборе ключевых точек представления маршрута на основе его рельефа и последующем построении представления маршрута поверх них. Ключевые точки выбираются таким образом, чтобы уменьшить количество участков маршрута, но при этом нести как можно больше критичной информации о рельефе маршрута. Построение представления маршрута поверх выбранных точек производится с пересчётом характеристик, учитывая информацию по всем доступным точкам маршрута.

Были рассмотрены две следующих версии выбора ключевых точек:

1. Объединение по подъёмам, спускам и ровным участкам;
2. Параметрическое объединение соседних участков трассы.

В первой версии метод основывается на объединении участков по экстремумам высот. Таким образом, объединяются все непрерывные подъёмы, спуски и участки без изменения высоты. Критерий выбора верхних точек выглядит следующим образом ( $h_i$  – высота  $i$ -й точки маршрута над уровнем моря):

$$\begin{aligned} h_{i-1} \leq h_i > h_{i+1} \\ h_{i-1} < h_i \geq h_{i+1} \end{aligned} \quad (1.4)$$

Для нижних точек использован следующий критерий:

$$\begin{aligned} h_{i-1} \geq h_i < h_{i+1} \\ h_{i-1} > h_i \leq h_{i+1} \end{aligned} \quad (1.5)$$

Во второй версии метод основывается на объединении участков по степени наклона профиля дорожного полотна. Для реализации водится настраиваемый параметр  $k$ , отвечающий за пороговое значение разницы наклона дорожного полотна:

$$|\alpha_i - \alpha_{i+1}| \geq k, k = [0, \infty) \quad (1.6)$$

При разнице наклона меньше  $k$ , участки объединяются. Если же разница больше или равна, то участки остаются прежними ( $\alpha_i$  – угол наклона дорожного полотна  $i$ -го участка маршрута).

Параметрическое объединение позволяет настраивать степень сокращения представления трассы: от исходного представления, до чрезмерно сильного (в тысячи раз).

***3. Алгоритм обеспечения наименьшего времени прохождения маршрута солнцемобилем, осуществляющий декомпозицию исходной задачи на подзадачи, который отличается итеративным уточнением результатов моделирования для формирования новых подзадач и ограничений их совместимости.***

Разработанный метод позволяет получать детальное решение для всего маршрута в короткие сроки за счёт постепенного уточнения укрупнённого решения за несколько итераций. Основой метода является использование подхода «разделяй и властвуй»: вместо решения одной большой оптимизационной задачи предлагается решать много задач меньшего размера и затем решения этих задач совместить в общее решение. Общая схема работы метода представлена на Рис. 3.

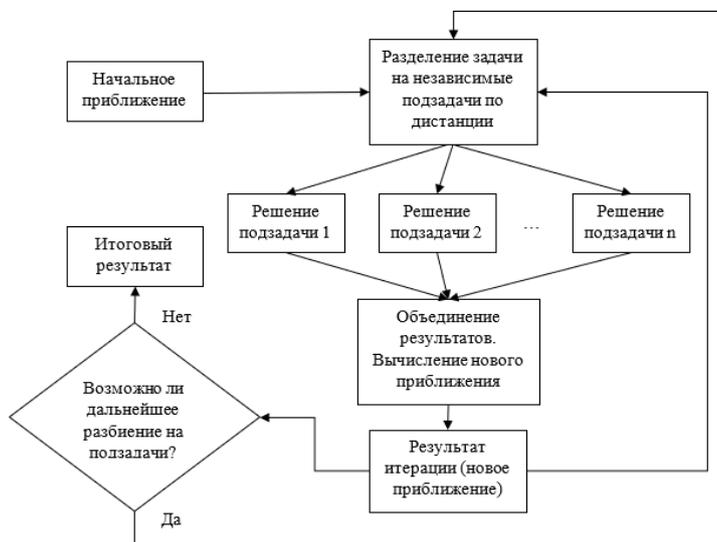


Рис. 3. Схема работы метода

Метод объединяет в себе следующие решения:

1. Изменение постановки задачи оптимизации на меньшее количество независимых переменных для получения начального приближения;
2. Декомпозиция исходной задачи оптимизации на подзадачи по частям маршрута с применением дополнительных ограничений, обеспечивающих совместимость подзадач;
3. Последовательное решение подзадач;
4. Агрегация результатов подзадач оптимизации в полный набор управляющих переменных;
5. Получение нового приближения путём использования полученного набора управляющих переменных в имитационной модели.

Начальное приближение строится аналогично существующим подходам: уменьшается количество независимых переменных, что значительно снижает вычислительную сложность и позволяет получить начальное приближение. Весь маршрут разделяется на  $m$  частей, и на каждую из частей вместо полного набора управляющих переменных процесса оптимизации, остаётся только одна переменная. Для имитационной модели независимые переменные процесса оптимизации распространяются по границам каждой из выделенных  $m$  частей с сохранением возможности применения аппарата автоматического дифференцирования. Пример распределения режимов движения во вход имитационной модели можно увидеть на Рис. 4.

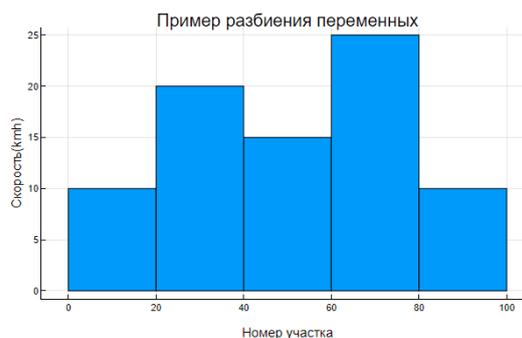


Рис. 4. Распределение пяти режимов движения на маршрут из ста участков.

После получения начального приближения становится возможным динамическое разделение исходной задачи на подзадачи благодаря информации о значениях зависимых переменных в точках разделения маршрута на подзадачи и автоматическому созданию процедур оптимизируемого функционала. Для обеспечения совместимости подзадач вводится дополнительное ограничение: энергия на финише каждой подзадачи в результате должна быть равна энергии на старте следующей подзадачи. Для последней подзадачи энергия на финише должна стремиться к нулю. Каждая из подзадач рассматривается как независимая задача оптимизации на своём участке маршрута. Для каждой подзадачи происходит уменьшение количества независимых переменных процесса оптимизации с сохранением возможности применения аппарата автоматического дифференцирования.

По результатам решения подзадач получают новые независимые переменные, которые методом распространения по границам разбиений внутри подзадач формируются во входной вектор режимов движения имитационной модели, что позволяет получить очередное приближение. Затем текущее разбиение на участки разделяется ещё глубже, и процесс выделения подзадач и их решения с агрегацией результатов повторяется до тех пор, пока размеры участков маршрута для подзадач не станут меньше или равными числу независимых переменных процессов оптимизации подзадач.

В результате последней итерации формируется итог, который состоит из агрегации большого количества решений подзадач, где не требуется уменьшение количества независимых переменных. С каждой итерацией происходит уточнение результата. В начале метода одна независимая переменная процесса оптимизации покрывала большое количество участков маршрута, а в конце – один участок маршрута.

**В третьей главе** рассмотрена реализация предложенных методов и алгоритмов из второй главы в виде программного обеспечения SPbPUStrat, предназначенного для формирования эффективного использования энергии солнцемобилем SOL, построенным в СПбПУ. Представлена архитектура решения и особенности реализации. Описано типичное использование разработанного программного обеспечения

Программное средство реализовано на языке высокого уровня Julia в виде клиент-серверного приложения и состоит из двух частей (Рис. 5): расчётного модуля и пользовательского интерфейса, оформленных в виде проектов с открытым исходным кодом. Взаимодействие модулей в разработанном программном обеспечении упрощено за счёт использования одного мультипарадигменного языка программирования высокого

уровня вместо традиционного подхода с использованием разных языков для различных частей системы (разные языки для моделирования, формализации задачи оптимизации и прикладной части программного обеспечения). Используемый язык был использован как в декларативном (алгебраическое моделирование), так и в императивном (имитационное моделирование) ключе, в связке с библиотекой решателя задач оптимизации и прикладной частью на этом же языке программирования. В результате было уменьшено количество интеграционного кода и повышена скорость разработки программного обеспечения.

Расчётный модуль сочетает в себе реализацию имитационной модели, обработки данных маршрута и предложенной схемы оптимизации, используя библиотеки CSV.jl, DataFrames.jl, Distributions.jl, ForwardDiff.jl, Optim.jl и Plots.jl. Модуль предоставляет доступ к основным методам и может быть встроен в другие программные средства.

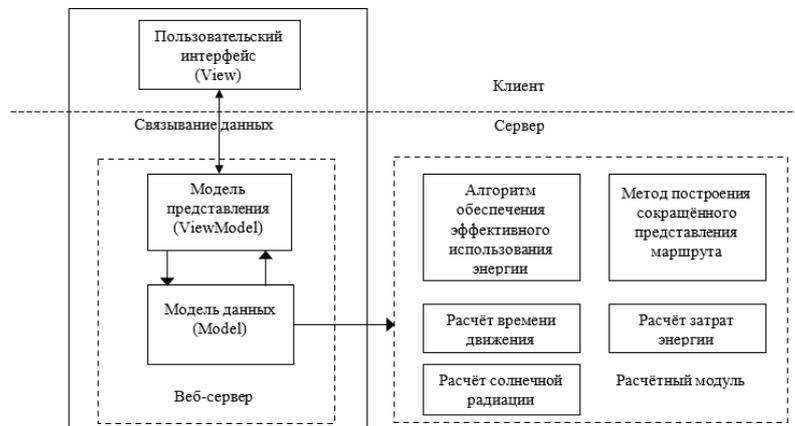


Рис. 5. Модульная структура разработанного программного обеспечения

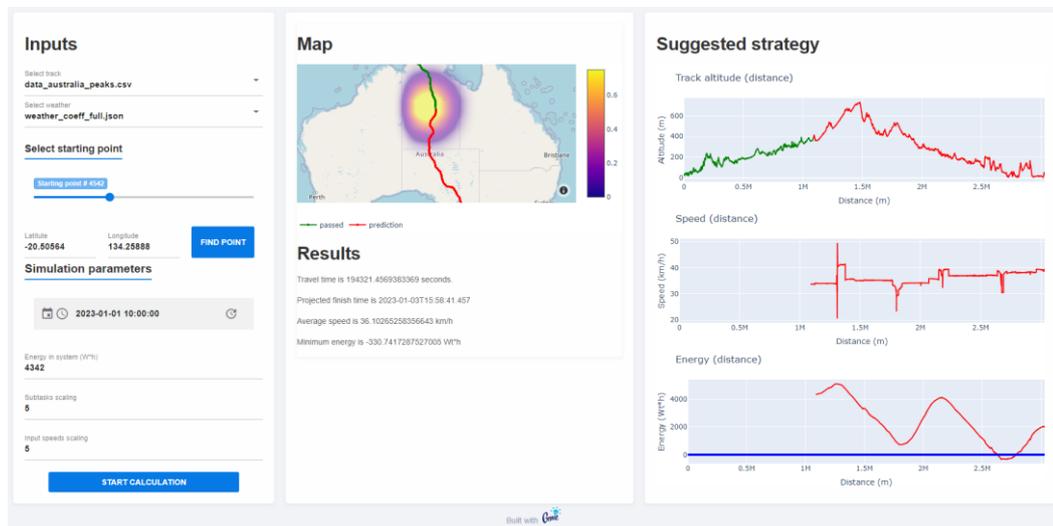


Рис. 6. Пользовательский интерфейс разработанного программного средства

Пользовательский интерфейс разработан с помощью фреймворка Genie для языка Julia, позволяющего реализовывать реактивные веб-приложения с применением паттерна Model-View-Controller. В дополнение к Julia так же использовался язык HTML для формирования разметки веб-страницы пользовательского интерфейса. Интерфейс программного средства представлен на Рис. 6.

Программное средство позволяет выбрать маршрут, указать погодные условия и параметры текущего состояния солнцемобиля: количество энергии, местонахождение и абсолютное время начала движения. После выбора этих параметров становится возможным начать расчёт эффективного использования энергии на дистанции маршрута. Результаты расчёта отображаются в пользовательском интерфейсе.

**В четвёртой главе** приведена оценка эффективности разработанных методов и алгоритмов, представленных во второй главе, на основе реализованного программного комплекса, описанного в третьей главе. Оценка приведена для каждого метода по отдельности, а также для всего программного комплекса в целом. Представлена апробация решения командой Polytech Solar. Указаны прочие применения разработанного подхода и возможные сферы применения разработанных методов и алгоритмов.

### **1. Оценка производительности имитационной модели.**

Модель позволяет производить численные эксперименты по движению транспортных средств с солнечными панелями в различных условиях. При соответствующих модификациях, модель может быть адаптирована для других типов транспортных средств с возможностью накопления энергии по ходу движения (ветрогенераторы и т.д.). Результат работы модели можно увидеть на Рис. 7.

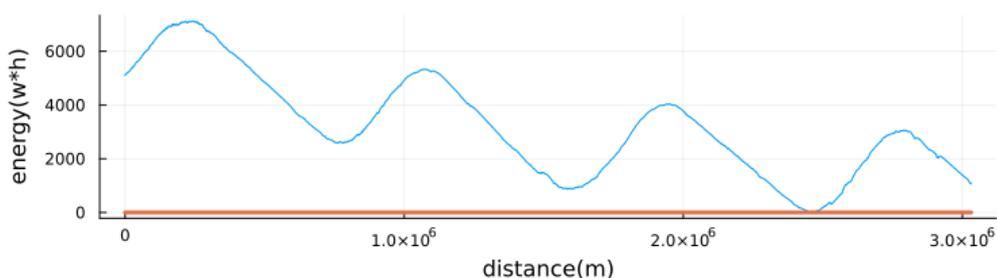


Рис. 7. Результат работы имитационной модели (энергия в системе)

За счёт применения парадигмы массивного программирования и оптимизирующего JIT-компилятора, использующего SIMD-инструкции, удалось построить высокопроизводительную модель движения солнцемобиля на дистанции. Время работы модели составляет 0.008660 секунды (8.66 мс) в среднем для полного представления маршрута размером в 41720 участков, что критично важно для дальнейшего запуска процессов оптимизации. Здесь и далее указывается среднее время работы моделей и алгоритмов при минимум десяти запусках, т.к. во время первого запуска происходит JIT-компиляция запускаемой процедуры.

На основе разработанной модели движения солнцемобиля был проведён вычислительный эксперимент по оценке производительности в задачах оптимизации относительно использовании автоматического дифференцирования. Результаты приведены в Таблица 1. Были использованы методы оптимизации 0-го и 1-го порядка на различном размере задач оптимизации. Методы 1-го порядка (BFGS и метод сопряжённых градиентов (МСГ)) были использованы как с численной аппроксимацией градиентов через численное дифференцирование (ЧД), так и с помощью сгенерированных функций по расчёту градиента с помощью автоматического дифференцирования (АД). В качестве результатов приведено время оптимизационного процесса в верхней части таблицы и значение целевой

переменной в нижней части. Методы оптимизации 1-го порядка с применением автоматического дифференцирования (BFGS, АД и МСГ, АД) позволяют получить как меньшее значение целевой переменной, так и более быстрое время выполнения процесса оптимизации за счёт применения автоматически полученной процедуры вычисления градиента. Это позволяет сделать вывод, что применение автоматического дифференцирования повышает производительность оптимизационного процесса.

Таблица 1. Использование автоматического дифференцирования в задачах оптимизации

Размер задачи	Nelder-Mead	BFGS, ЧД	BFGS, АД	МСГ, ЧД	МСГ, АД
Время оптимизации (с)					
25	0,378	0,100	<b>0,006</b>	0,204	0,363
75	32,726	0,546	0,084	<b>0,023</b>	0,099
150	62,609	0,457	<b>0,152</b>	1,608	0,169
300	159,439	32,641	0,832	1,418	<b>0,625</b>
500	531,791	19,581	3,160	208,245	<b>2,000</b>
Результат с оптимизированными воздействиями (с)					
25	<b>356,857</b>	<b>356,810</b>	<b>356,810</b>	<b>356,810</b>	<b>356,810</b>
75	1992,816	1756,572	1676,040	1643,247	<b>1578,299</b>
150	4084,410	3756,140	3642,381	<b>3504,665</b>	3508,342
300	9526,859	8869,733	9020,479	<b>7827,724</b>	7870,441
500	16977,256	14209,110	14636,160	14037,576	<b>13905,262</b>

## **2. Оценка эффективности сокращения представления маршрута с изменённой схемой дискретизации**

Было проведено сравнение качества моделирования при использовании исходного представления и с применением разработанных методов на разработанной модели движения солнцемобиля. Сравнение проводилось в точках маршрута, которые присутствуют как в исходном, так и в сокращённом представлении, по разнице значений в них. В каждой точке сравнивалось количество полученной энергии, потраченной энергии, общий баланс энергии в системе, момент времени.

Для обеих версий ошибка во времени прохождения оказалась на уровне ошибок округления разрядной сетки ( $10^{-11}$ ). Для непараметрического варианта ошибка в уровне энергии оказалась суммарно до единиц Вт\*ч при общей ёмкости в тысячи Вт\*ч, что даёт погрешность в сотые доли процента. Для параметрического варианта, приведён пример исследования влияния параметра  $k$  на точность и результирующее количество участков (Рис. 8. а). Оптимальным  $k$ , снижающим количество участков маршрута, но при этом не ухудшающим качество моделирования, является диапазон значений от 1.75 до 2.25. При этом уменьшение количества участков достигает от 40.42 до 111.93 раз соответственно. Параметрическое объединение при  $k=0.7$  по результатам близко к объединению по спускам и подъёмам (Рис. 8. б).

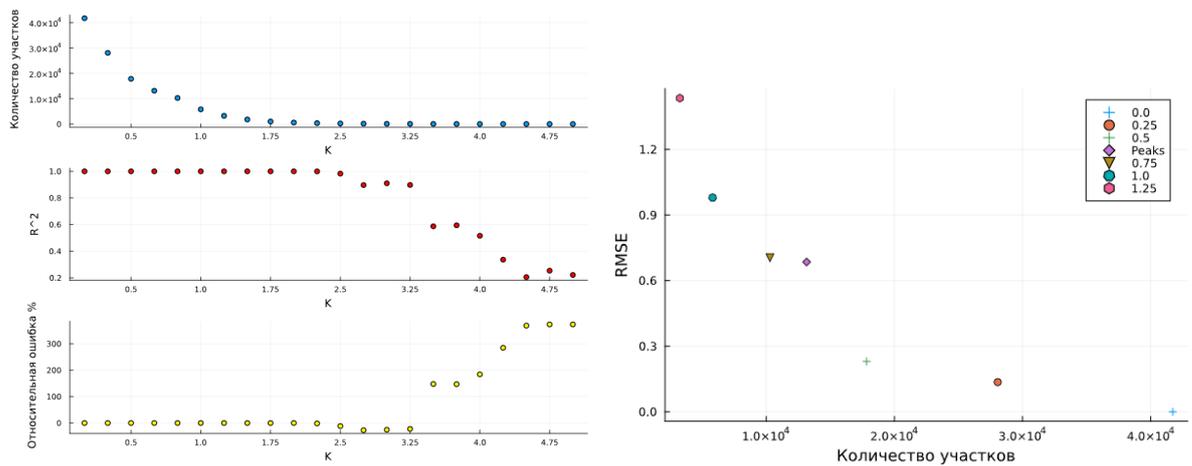


Рис. 8. а) Характеристики маршрута при различных значениях параметра k. б) Сравнение качества моделирования разработанных методов сокращения представления маршрута

Выигрыш производительности моделирования от использования сокращённого представления маршрута в целях моделирования получается линейно зависящим от сокращения количества участков маршрута (Рис. 9) и достигает 40.25 раз для параметрического метода при  $k=1.75$  и 3.2 раз для объединения по экстремумам.

Применение сокращенного представления маршрута в процессах оптимизации позволяет уменьшить целевое значение (время прохождения дистанции) в 1.3 раза в среднем, и время оптимизационного процесса (см. Рис. 10) в десятки раз при росте длины маршрута.

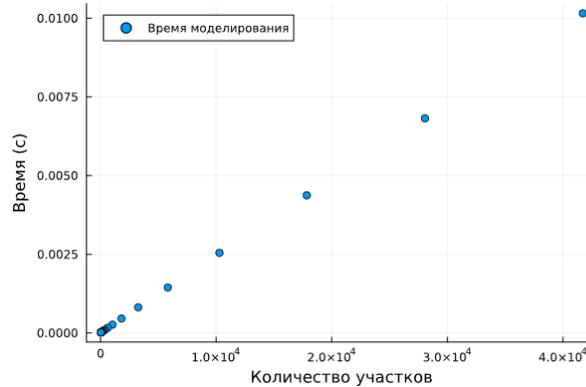


Рис. 9. Время моделирования при различном количестве участков

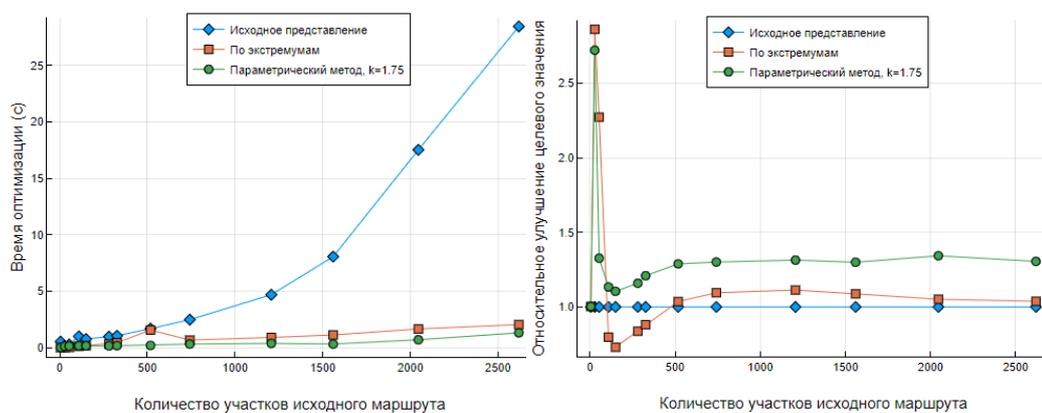


Рис. 10. Влияние сокращённого представления маршрута на процессы оптимизации

### **3. Оценка эффективности алгоритма обеспечения наименьшего времени прохождения маршрута солнцемобилем**

Для проверки качества работы разработанного алгоритма был проведён вычислительный эксперимент на трассе World Solar Challenge по построению эффективного использования энергии на дистанции. Были рассмотрены 3 подхода: наивный (использование одного режима движения на всю дистанцию), существующие методы с укрупнённым решением (несколько режимов движения на всю дистанцию) и разработанный подход (итеративный метод, позволяющий получить по режиму движения на участок маршрута). Было установлено, что разработанный метод позволил найти решение с на 5.6 часов лучшим результатом (улучшение в 5.7%) относительно существующих подходов при более длительном времени вычислений (Таблица 2).

Таблица 2. Сравнение методов формирования эффективного использования энергии

<b>Подход</b>	<b>Время финиша</b>	<b>Абсолютное улучшение результата (ч)</b>	<b>Время вычисления (с)</b>	<b>Количество независимых переменных</b>
Наивный	6Д 05:17:01	+17.6	0.5	Минимальное (1)
Существующий	5Д 11:42:68	0	14.1	Сокращённое (50)
Разработанный алгоритм	<b>5Д 05:56:15</b>	-5.6	222	Полное (41720)

Предложенный алгоритм делает возможным получение детального эффективного использования энергии на всю дистанцию, получая постепенное уточнение по итерациям.

### **4. Общая оценка эффективности**

Для оценки общей эффективности был проведён вычислительный эксперимент, заключающийся в построении эффективной стратегии использования энергии солнцемобилем с помощью общепринятых методов и с помощью разработанных методов и алгоритмов на представленной в работе имитационной модели движения солнцемобиля. Данный эксперимент отличается от предыдущего, т.к. нацелен на демонстрацию итогового результата, и все разработанные методы и алгоритмы здесь применяются одновременно, а не изолированно. В том числе, используется градиентный метод оптимизации за счёт использования автоматического дифференцирования в имитационной модели. Комбинация высокопроизводительной модели с неявным параллелизмом, сокращённого представления маршрута и алгоритма обеспечения наименьшего времени прохождения маршрута позволяет повысить производительность расчёта и получить детальное решение за время, сравнимое с общепринятым подходом (Таблица 3). При этом качество решения значительно лучше (на 6.5 часа). Исходя из этого, становится возможным применение разработанного программного обеспечения в реактивном виде при резком изменении условий с получением детального плана.

Таблица 3. Общие результаты

Подход	Время финиша	Абсолютное улучшение результата (ч)	Время вычисления (с)	Количество независимых переменных
Наивный	6Д 05:17:01	+17.5	0.5	Минимальное (1)
Существующий	5Д 11:42:68	0.0	14.1	Сокращенное (50)
Разработанный алгоритм	<b>5Д 04:54:47</b>	-6.5	21.5	Полное (10k+)

Использование разработанного программного средства позволило принять участие в American Solar Challenge Sun GP 2018, получить приз за лучший новый солнцемобиль. Программное средство зарекомендовало себя с лучшей стороны, позволяя получать прогнозы по режимам движения с необходимой частотой.

Разработанный программный комплекс предоставляет доступ к настройке исходных данных в виде маршрута и параметров солнцемобиля, запуску расчётов, отображению результатов и находится в свободном доступе<sup>12</sup>. За счёт публикации исходного кода, при соответствующей модификации имитационной модели возможно распространение разработанных методов и на другие типы транспортных средств с накоплением энергии по ходу движения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Разработана модель движения солнцемобиля на дистанции с неявным параллелизмом по данным и возможностью автоматического получения процедур расчёта значений производной через автоматическое дифференцирование для взаимодействия с модулем градиентной оптимизации;
2. Разработан метод повышения производительности расчёта энергообеспечения солнцемобиля на основе разработанной имитационной модели, отличающийся изменением схемы дискретизации маршрута для создания изменённого представления моделируемого маршрута через параметрическое объединение участков с пересчётом характеристик участков с помощью численного интегрирования;
3. Разработан алгоритм обеспечения наименьшего времени прохождения маршрута солнцемобилем с поддержкой автоматического дифференцирования, использующий разработанную модель движения солнцемобиля и осуществляющий декомпозицию исходной задачи на подзадачи, отличительной особенностью которого является итеративное уточнение результатов моделирования для формирования новых подзадач и ограничений их совместимости;

<sup>1</sup> [https://github.com/IvanSelin/solar\\_strategy](https://github.com/IvanSelin/solar_strategy) – репозиторий исходного кода расчётного модуля

<sup>2</sup> <https://github.com/IvanSelin/SolarStrategyDashboard> – репозиторий исходного кода пользовательского интерфейса

4. Предложенные модели и методы доведены до реализации в виде программного комплекса с использованием единственного мультипарадигменного языка программирования, что упростило взаимодействие между модулями программного комплекса;
5. В ходе оценки эффективности разработанного программного продукта и используемых в нём методов и алгоритмов установлено получение результатов, превосходящих аналоги;
6. Решены реальные задачи формирования эффективного использования энергии солнцемобилем на примере команды Polytech Solar. Разработанные методы и программное обеспечение могут быть применимы для схожих задач, где транспортные средства имеют возможность накопления энергии по ходу движения.

Результаты работы позволяют сделать вывод, что поставленные исследованием задачи решены, и констатировать достижение общей цели работы.

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Selin I. New methods for efficient energy management of a solar vehicle on a fixed route. Computing, Telecommunications and Control, 2023, Vol. 16, No 4, Pp. 18-27. DOI: 10.18721/JCSTCS.16402
2. Selin I.A., Kasatkin I.I., Zakhlebaev E.A., Hemminger O.P. Building a time-optimal power consumption strategy for a solar car // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. IOP Publishing, 2019. Vol. 643, № 1. P. 012004.
3. Селин И.А. Оценивание и оптимизация стратегии энергосбережения для солнцемобиля // Материалы XII мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2019), Издательство Южного федерального университета. Том 2. 2019.
4. Kasatkin I., Egorov M., Zakhlebaev E., Kotov E., Selin I., Kukolev M. Empirical performance modelling of a lithium-ion battery of a solar car // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. IOP Publishing, 2019. Vol. 643, № 1. P. 012103.
5. Захлебаев Е.А., Касаткин И.И., Селин И.А. Патент на полезную модель RU 196346 U1 «Энергоэффективная электрическая тяговая система электромобиля на солнечных панелях», дата публикации 26.02.2020.
6. Захлебаев Е.А., Селин И.А., Касаткин И.И. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2019665646 «Программа для вычисления оптимального плана использования электромобиля на солнечных панелях на основе прогноза о приходящей и расходуемой энергии», дата публикации: 27.11.2019.
7. Захлебаев Е.А., Селин И.А., Касаткин И.И. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2019665499 «Программа для определения границ проезжей части на основе распознавания видеопотока», дата публикации: 25.11.2019.
8. Стойкоски Н., Селин И.А. Семантическая сегментация кадров автомобильного транспорта // Современные технологии в теории и практике программирования. Политех-пресс, 2020. С.47-49.