

УДК 629.113

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_3_116

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАКОНА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОЙ КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ГРУЗОПЕРЕВОЗКАХ

С.В. НазаренкоORCID: 0009-0003-1382-5589 e-mail: Sergey.Nazarenko@kamaz.ru

ПАО «КАМАЗ»

*Набережные Челны, Россия***Б.Б. Косицын**ORCID: 0009-0003-3004-1073 e-mail: kositsyn_b@bmstu.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

*Москва, Россия***Б.В. Падалкин**ORCID: 0009-0009-2048-3701 e-mail: padalkin@bmstu.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

*Москва, Россия***А.А. Стадухин**ORCID: 0009-0009-2048-3701 e-mail: ant.m9@ya.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Москва, Россия

Проведен анализ применения беспилотных колесных машин для осуществления циклических грузоперевозок при реализации технологических процессов на складах, терминалах и производствах. На основании этого предложена концепция беспилотной колесной машины, привод которой осуществляется двумя одинаковыми тяговыми электродвигателями, соединенными с трансмиссией через редукторы с разными передаточными отношениями. В рамках исследования ставится задача рационального распределения тяги между указанными электродвигателями, а также задача определения оптимального скоростного режима беспилотной машины, направленного на минимизацию потерь энергии при движении. Рассматриваются используемые в подобных случаях алгоритмы оптимизации, предложен метод определения закона энергоэффективного движения беспилотной колесной машины при циклических грузоперевозках, основывающийся на генетическом алгоритме. Главная особенность предлагаемого метода – способ учета ограничений, действующих на маршруте: время в пути, максимальные значения ускорений/замедлений, тяговые возможности привода и максимальная разрешенная скорость на участке. Для этого предложены модифицированные функции создания, мутации и рекомбинации, которые необходимы для работы генетического алгоритма. В качестве апробации рассматриваемого метода выполнены предварительные расчеты, позволившие определить параметры генетического алгоритма для проведения дальнейших исследований по синтезу оптимальных законов движения беспилотных колесных машин.

Ключевые слова: беспилотная машина, колесная машина, энергоэффективность, генетический алгоритм, закон движения, оптимизация, циклические грузоперевозки.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Назаренко, С.В. Метод определения закона энергоэффективного движения беспилотной колесной машины при циклических грузоперевозках / С.В. Назаренко, Б.В. Косицын, Б.В. Падалкин, А.А. Стадухин // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023. № 3. С. 116-130. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_3_116

METHOD FOR DETERMINING THE LAW OF ENERGY EFFICIENT MOVEMENT OF AN UNMANNED WHEELED VEHICLE DURING CYCLIC CARGO TRANSPORTATION

S.V. Nazarenko

ORCID: 0009-0003-1382-5589 e-mail: Sergey.Nazarenko@kamaz.ru

ПАО «КАМАЗ»

Naberezhnye Chelny, Russia

B.B. Kositsyn

ORCID: 0009-0003-3004-1073 e-mail: kositsyn_b@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

B.V. Padalkin

ORCID: 0009-0009-2048-3701 e-mail: padalkin@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

A.A. Stadukhin

ORCID: 0009-0009-2048-3701 e-mail: ant.m9@ya.ru

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

Abstract. The article analyzes the use of unmanned wheeled vehicles for the implementation of cyclic cargo transportation in the implementation of technological processes in warehouses, terminals and industries. The concept of an unmanned wheeled vehicle is proposed, the drive of which is carried out by two identical traction motors connected to the transmission through gearboxes with different gear ratios. The task of rational thrust distribution between the indicated electric motors is posed, as well as the task of determining the optimal speed mode of an unmanned vehicle, aimed at minimizing energy losses during movement. The article considers the optimization algorithms used in such cases and proposes a method for determining the law of energy-efficient movement of an unmanned wheeled vehicle in cyclic cargo transportation, based on a genetic algorithm. The main feature of the proposed method is the way to take into account the restrictions on the route: travel time, maximum acceleration / deceleration values, drive traction capabilities and the maximum allowed speed on the section. Modified functions of creation, mutation and recombination, which are necessary for the operation of the genetic algorithm are proposed. Preliminary calculations have been performed as an approbation of the proposed method. They made it possible to determine the parameters of the genetic algorithm, allowing further research on the synthesis of optimal laws of motion for unmanned wheeled vehicles.

Key words: unmanned vehicle, wheeled vehicle, energy efficiency, genetic algorithm, law of motion, optimization, cyclic cargo transportation.

FOR CITATION: S.V. Nazarenko, B.V. Kositsyn, B.V. Padalkin, A.A. Stadukhin. Method for determining the law of energy efficient movement of an unmanned wheeled vehicle during cyclic cargo transportation. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 3. Pp. 116-130. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_3_116

Введение

В настоящее время эксплуатация беспилотных колесных машин (БКМ) в основном производится в специально подготовленной среде, например, при внутривоздушных перевозках (перевозки в масштабах склада, терминала [1], промышленного предприятия). Это делает их маршрут циклическим (повторяющимися), а самих БКМ – участниками производственного процесса. С одной стороны, здесь требуется для каждого маршрута жестко определить время в пути и по возможности снизить затраты на передвижение, а с другой

стороны – определенность среды и режима эксплуатации позволяет заранее спланировать и оптимизировать маршрут [2]. Необходимость движения в стесненных условиях (и, возможно, в закрытых помещениях) требует от БКМ высокой маневренности, возможности малых скоростей движения и отсутствия вредных выбросов, что делает желательным применение в машине тягового электропривода.

Имеющийся опыт разработки транспортных машин с тяговым электроприводом показывает необходимость применения двух или более механических диапазонов [3], т.е. в составе трансмиссии требуется применять коробку передач. Это в некоторой мере обесценивает часть преимуществ применения тягового электропривода, в частности, затрудняет обеспечение бесступенчатого разгона (и требует автоматизации переключения передач). Рациональным решением данной инженерной проблемы может быть использование в составе БКМ двух тяговых электродвигателей (ТЭД), один из которых предназначен для обеспечения высокой скорости движения – быстроходный привод (БП), а второй позволяет преодолевать повышенное сопротивление движению – моментный привод (МП). Для этого можно использовать электромашины одинаковые, но имеющие разное фиксированное передаточное отношение в редукторах. Здесь возникает дополнительная задача рационального перераспределения мощности между БП и МП с целью обеспечения меньших затрат энергии. Схожий принцип повышения энергоэффективности электропривода исследовался в [4], однако в данной работе мощность электродвигателей суммировалась в планетарном ряде, а не на грунте.

Для нахождения оптимального закона управления транспортными машинами применяются различные подходы: аналитические вариационные методы, дискретное динамическое программирование Беллмана [5] и различные методы оптимизации. В случае решения такого класса задач, как определение (синтез) рациональной траектории движения до цели с обходом препятствий, используются: алгоритмы муравьиной тропы [6], генетические алгоритмы оптимизации [7], методы роя частиц [8]. Все они способны работать со сложными нелинейными задачами и находить глобальные минимумы целевой функции. Имеется ряд исследований, где генетические алгоритмы используются для решения разнообразных логистических задач (задач перемещения груза от поставщиков к потребителям с учетом распределительных центров, ограничения времени снабжения, задействованного парка транспортных машин, затрат на дорогу и т.д.) [9, 10]. Также следует отметить работы [11, 12], где с помощью генетического алгоритма определяется оптимальный скоростной режим рельсового транспорта.

Проведенный анализ позволяет судить о том, что для задачи определения оптимальных законов управления тяговым электроприводом беспилотной колесной машины (в том числе, для нескольких тяговых электродвигателей в составе трансмиссии) целесообразно использовать генетический алгоритм (ГА). ГА потенциально обладает хорошей производительностью, особенно учитывая то, что расчет ГА можно остановить, используя лучшее на текущий момент решение, которое в той или иной степени приближенно к оптимальному. Кроме того, ГА позволяет проводить оптимизацию не по одному варьируемому параметру, а по нескольким (например, не только по поддерживаемой машиной скорости, но и по степени распределения тяги между электродвигателями).

Постановка задачи оптимизации с применением генетического алгоритма

Как и в случае других алгоритмов, в ГА оптимизация выполняется исходя из некоторого критерия, который описывается целевой функцией (в терминах генетического алгоритма – функция приспособленности). Целевая функция предназначена для сравнения различных наборов варьируемых параметров оптимизируемой системы (т.е. особей) между собой. В процессе каждого шага алгоритма оптимизации каждого поколения (рис. 1) особи с большим значением целевой функции (то есть наименее приспособленные) удаляются. На их место записываются новые особи, полученные одним из двух путей:

- 1) с помощью функции мутации, которая осуществляет малые изменения случайных параметров в наборе (случайных генов особи);
- 2) с помощью функции рекомбинации, которая обменивает значения генов между двумя особями одного поколения.

Поскольку происходит удаление наименее приспособленных особей (отбор), среднее значение целевой функции в каждом поколении уменьшается (особи становятся все более приспособленными). При достижении заданного значения целевой функции или при отсутствии ее изменений от поколения к поколению оптимизация останавливается, а лучший представитель последнего поколения считается оптимальным решением. С целью применения генетического алгоритма для формирования оптимального закона движения БКМ трассу предлагается представить набором участков одинаковой длины (рис. 2), на каждом из которых известны кривизна движения k_k , угол наклона опорной поверхности α_k и ограничение максимальной скорости $V_{max k}$, где индекс k – номер участка.

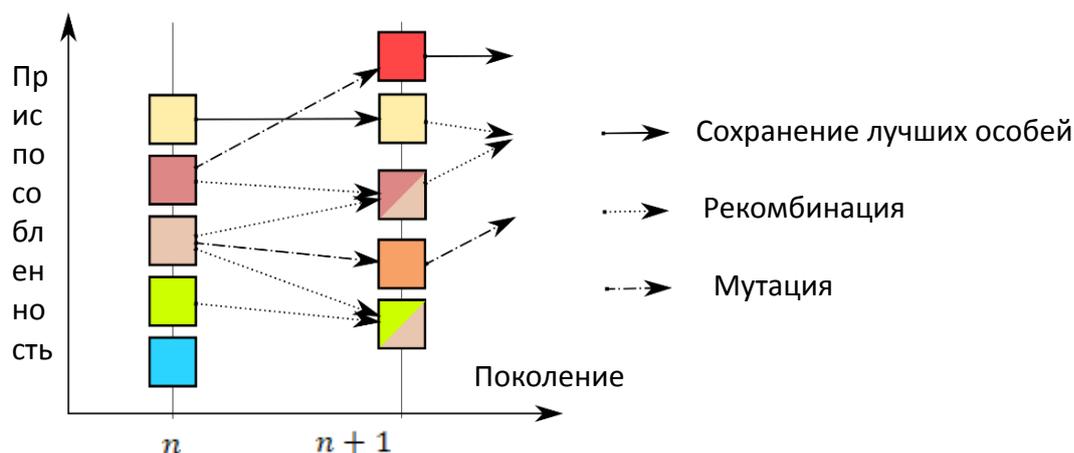


Рис. 1. Схематичное описание работы генетического алгоритма

Fig. 1. Schematic description of the genetic algorithm

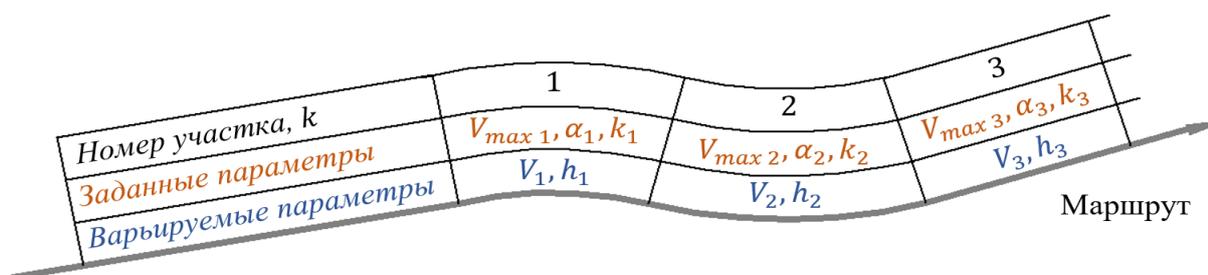


Рис. 2. Представление маршрута движения как набора участков

Fig. 2. Representing a driving route as a set of segments

Каждому участку ставится в соответствие требуемая скорость движения V_k , и для случая беспилотной КМ с двумя тяговыми двигателями – коэффициент распределения тяги между двигателями h_k . Величины V_k и h_k являются для задачи оптимизации варьируемыми параметрами (то есть геномом особи).

В качестве значения целевой функции генетического алгоритма в зависимости от решаемой задачи можно назначить различные параметры – общую энергию, затраченную на движение КМ, среднее по участкам значение продольных ускорений КМ и т.д. Для задач данного исследования целевая функция вычислялась как суммарная энергия, потерянная в тяговых электродвигателях при движении по маршруту $E_{пот.эдс}$. Такой подход обладает

большей чувствительностью по сравнению с анализом общей энергии, затраченной на движение и, соответственно, приводит к более быстрой сходимости алгоритма оптимизации.

$$E_{\text{пот.эдS}} = \sum_k N_{\text{пот.эдk}} \cdot t_k, \quad (1)$$

где $N_{\text{пот.эдk}}$ – общая мощность потерь тяговых электродвигателей при движении машины по участку k (вычисляется для каждого ТЭД в соответствии с методом [13]); t_k – время, затраченное на преодоление участка k .

Для работы генетического алгоритма следует задать функции создания, мутации и рекомбинации особей. При этом для учета ограничений при выполнении оптимизации во всех функциях необходимо обеспечить выполнение следующих условий при варьировании параметров V_k и h_k (т.е. генома) нового поколения:

- 1) общее время движения по маршруту должно соответствовать заданному t_S (для предотвращения скопления машин в зонах погрузки/разгрузки так как при циклических грузоперевозках машины являются участниками жесткого технологического процесса);
- 2) развиваемая двигателями тяга не должна выходить за внешнюю механическую характеристику;
- 3) максимальное продольное ускорение/замедление не должно превосходить заданное;
- 4) максимальная скорость не должна превосходить ограничение скорости на участке $V_{\text{max } k}$.

В остальном геном особей должен быть подвержен случайным изменениям путем мутации или рекомбинации для того, чтобы от поколения к поколению целевая функция уменьшалась.

Соответствие времени движения на маршруте заданному

Это соответствие предлагается обеспечивать путем «нормализации», т.е. путем умножения изначальной (ненормированной, полученной мутацией или рекомбинацией) скорости движения на каждом участке V'_k на некоторый коэффициент K_V . Для определения этого коэффициента на первом этапе установим время Δt , которое требуется машине для прохождения каждого элементарного участка пути:

$$\Delta t = \Delta S / V_{\text{cp}}, \quad (2)$$

где ΔS – длина участка, V_{cp} – средняя скорость прохождения участка.

Средняя скорость зависит от скоростей на участках следующим образом:

$$V_{\text{cp}} = \frac{V_k + V_{k+1}}{2}. \quad (3)$$

Тогда, с учетом введения коэффициента K_V :

$$\Delta t = \frac{2\Delta S}{V_{k+1} + V_k} = \frac{2\Delta S}{V'_{k+1} \cdot K_V + V'_k \cdot K_V}. \quad (4)$$

В данном выражении следует также учесть заданные ограничения максимальной скорости на участках $V_{\text{max } k}$. Тогда окончательно время прохождения каждого элементарного участка вычисляется по формуле:

$$\Delta t = \frac{2 \Delta S}{\min(V'_{k+1} \cdot K_V, V_{\text{max } k+1}) + \min(V'_k \cdot K_V, V_{\text{max } k})}. \quad (5)$$

Таким образом, коэффициент K_V для каждого набора варьируемых параметров (особи) и заданного времени прохождения маршрута t_S можно найти из решения следующего уравнения:

$$t_S - \sum_k \frac{2 d_s}{\min(V'_{k+1} \cdot K_V, V_{\text{max } k+1}) + \min(V'_k \cdot K_V, V_{\text{max } k})} = 0, \quad (6)$$

где d_s – длина участка пути, на которые разбит маршрут (в данном исследовании принят постоянной величиной).

В итоге в предложенных далее функциях создания мутации и рекомбинации ГА сначала вычисляются даже не собственно скорости на участках, а относительные скорости V'_k , которые, если умножить их на K_V , обеспечат заданное время движения на маршруте. На рис. 3 показан пример нормализации исходного скоростного режима (100 секунд на маршруте) с целью обеспечения большего и меньшего времени на маршруте.

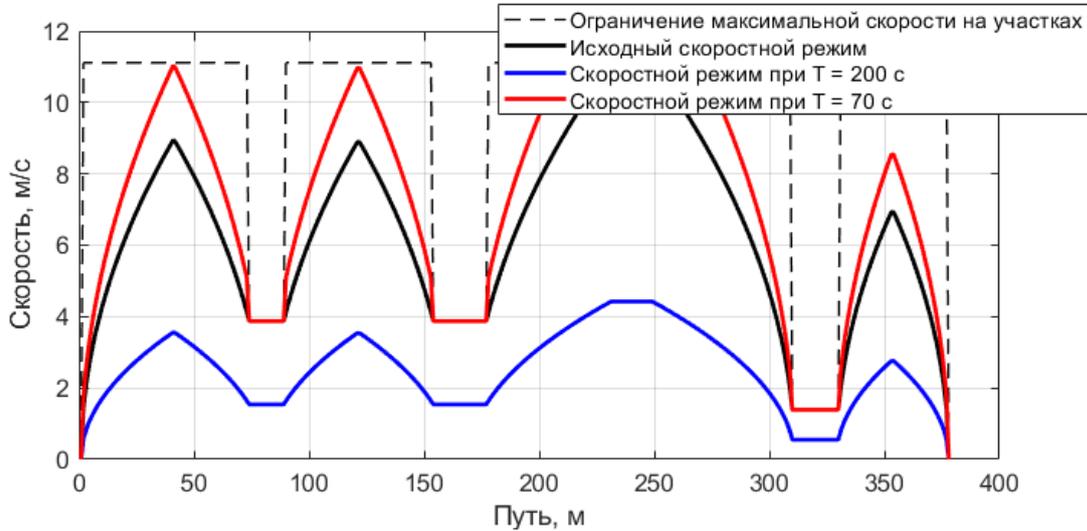


Рис. 3. Пример нормализации скорости для обеспечения заданного времени на маршруте

Fig. 3. Example of speed normalization to ensure a given time on the route

Ограничения на максимальное ускорение (замедление) и возможности тяговых электродвигателей учитываются в соответствии с принципом, изложенным в [14]. Для учета ограничений на ускорения производится последовательный обход маршрута с вычислением скоростей $V_{a.пр.k}$ на участках в прямом направлении, т.е. скорость машины на текущем участке пути k должна быть ограничена, если ускорение при переходе с предыдущего участка на текущий превышает допустимые ограничения. При вычислении скоростей $V_{a.об.k}$, учитывающих ограничения на максимальное замедление, производится последовательный обход маршрута в обратном направлении. Итоговая скорость на участке $V_{a.k}$ определяется как минимальная из вычисленных. Указанное можно записать в виде следующих выражений и представить в виде рис. 4.

$$V_{a.пр.k} = \min(V_k, \sqrt{V_{a.пр.k-1}^2 + 2a_{max}d_s}, V_{зд.k}), \tag{7}$$

где a_{max} – ограничения на продольные ускорения при разгоне и торможении беспилотной КМ (в том числе, с учетом сцепных свойств движителя с ОП); $V_{зд.k}$ – максимальная скорость КМ с учетом ограничения тягового электродвигателя по тяге.

$$V_{a.об.k} = \min(V_k, \sqrt{V_{a.об.k+1}^2 - 2a_{max}d_s}, V_{т.k}), \tag{8}$$

где $V_{т.k}$ – максимальная скорость КМ с учетом ограничения тормозных механизмов (или тягового двигателя в режиме торможения).

$$V_{a.k} = \min(V_{a.пр.k}, V_{a.об.k}), \tag{9}$$

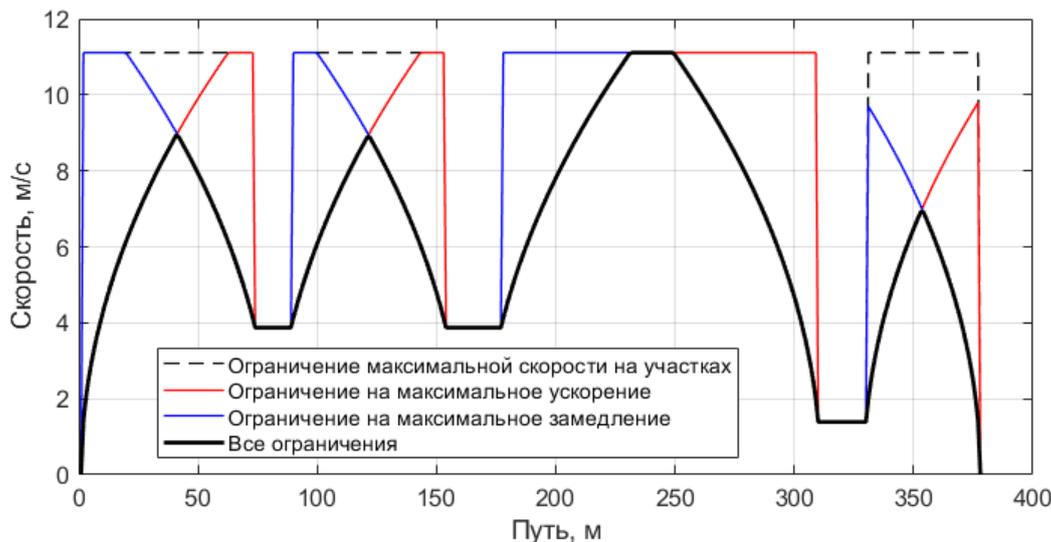


Рис. 4. Пример вычисления скорости на маршруте с учетом ограничений на максимальное ускорение и максимальное замедление

Fig. 4. An example of calculating the speed on the route, taking into account the restrictions on maximum acceleration and maximum deceleration

В формулах (7) и (8) используются величины скоростей $V_{эд,к}$ и $V_{т,к}$, зависящие от механических характеристик тягового двигателя, тормозной системы и условий движения. Для получения этих величин необходимо решить обратную задачу динамики движения БКМ, опираясь на математическую модель, которая главным образом характеризуется следующим дифференциальным уравнением:

$$(m\delta + J_z k_k^2) \frac{dV_k}{ds} V_k + J_z \frac{dk_k}{ds} V_k^2 \cdot k_k = \frac{M_k}{r_0} - mg(f_{крив} \cos(\alpha_k) + \sin(\alpha_k)) - c_x F_{лоб} \rho \frac{V_k^2}{2}, \quad (10)$$

где:

δ – коэффициент учета вращающихся масс;

J_z – момент инерции КМ относительно вертикальной оси;

k_k – кривизна траектории как функция от пути s ;

V_k – скорость машины;

M_k – общий крутящий момент, создаваемый на ведущих колесах;

$f_{крив}$ – коэффициент сопротивления при криволинейном движении КМ;

α – угол наклона опорной поверхности в продольном направлении.

Из уравнения (10) можно определять крутящий момент M_k , который необходимо создать на ведущих колесах при заданном режиме движения, а именно известном на каждом участке ускорении $(dV_k/ds)V_k$, скорости V_k , кривизне траектории k_k и угле наклона опорной поверхности α_k . Получив из решения уравнения (10) суммарный крутящий момент M_k , требуемый на ведущих колесах для обеспечения заданного режима движения можно определить соответствующий ему момент электродвигателя $M_{эд}$ для исследуемого варианта БКМ.

Полученный крутящий момент $M_{эд}$ должен обеспечиваться (быть меньше) суммарной внешней скоростной характеристикой всех ТЭД БКМ $M_{сум}(\omega_{сум})$. В ином случае необходимо скорректировать скорость на участке V_k и определить требуемый крутящий момент M_k заново. В данном исследовании нахождение предельной скорости на участке, исходя из максимальной тяги ТЭД, реализовано путем численного решения уравнения вида:

$$(m\delta + J_z k_k^2) \frac{dV_k}{ds} V_k + J_z \frac{dk_k}{ds} V_k^2 \cdot k_k + mg(f_{\text{крив}} \cos(\alpha_k) + \sin(\alpha_k)) + c_x F_{\text{лоб}} \rho \frac{V_k^2}{2} - \frac{M_{\text{СУВСК}}(\omega_{\text{су}}) i_{\text{тр.в}} \eta_{\text{тр}}}{r_0} = 0. \quad (11)$$

В случае определения оптимального закона управления приводом машины с двумя ТЭД в геном добавляется параметр h_k , определяющий вклад крутящего момента электродвигателей быстрого и моментного привода на каждом участке маршрута. Тогда с учетом параметра h_k двигатель МП должен развить на колесах следующий крутящий момент:

$$M_{\text{ЭДМПтреб}} = \frac{M_k h_k}{i_{\text{тр.н}} \eta_{\text{тр}}}, \quad (12)$$

где $i_{\text{тр.н}}$ – передаточное отношение МП КМ с двумя ТЭД.

В случае, если электродвигатель МП при заданном h_k в силу своей внешней скоростной характеристики $M_{\text{ЭДвск}}(\omega_{\text{эд}})$ не способен реализовать требуемый крутящий момент $M_{\text{ЭДМПтреб}}$, недостающую тягу должен обеспечить БП, т.е. можно записать:

$$\begin{aligned} M_{\text{ЭДМП}} &= \min(M_{\text{ЭДМПтреб}}, M_{\text{ЭДвск}}(\omega_{\text{эд}})); \\ M_{\text{кмп}} &= M_{\text{ЭДМП}} i_{\text{тр.н}} \eta_{\text{тр}}; \\ M_{\text{ЭДБП}} &= \frac{(M_k - M_{\text{кмп}})}{i_{\text{тр.в}} \eta_{\text{тр}}}, \end{aligned} \quad (13)$$

где:

$M_{\text{ЭДМП}}$ – текущий требуемый крутящий момент электродвигателя МП;

$M_{\text{ЭДБП}}$ – текущий требуемый крутящий момент электродвигателя БП;

$M_{\text{ЭДвск}}(\omega_{\text{эдМП}})$ – значение крутящего момента в соответствии с внешней скоростной характеристикой электродвигателя БКМ;

$M_{\text{кмп}}$ – момент на ведущих колесах беспилотной КМ, обеспечиваемый МП.

Вопросам определения параметров БКМ – мощности ТЭД, передаточных чисел трансмиссии и т.д., предполагается посвятить дальнейшие исследования.

Генетические операторы (функции создания, мутации и рекомбинации)

Функция создания (инициализации) популяции генетического алгоритма необходима для начального задания варьируемых параметров для первого поколения особей. От этих начальных значений не требуется обеспечивать высокую приспособленность (малое значение целевой функции), однако необходимо достаточное разнообразие, чтобы успешно решить задачу глобальной оптимизации. Обычно [15] варьируемые параметры первого поколения задаются с помощью равномерного случайного распределения (распределение Монте-Карло), однако исследователи могут модифицировать функцию создания для достижения большего генетического разнообразия. В работе [16] 90 % популяции создается случайным распределением, а 10 % – с помощью специального алгоритма.

Следует учесть то, что значения варьируемых параметров должны лежать в рамках заданных ограничений. В данном исследовании подразумевается, что начальная и конечная скорости КМ равны 0, ни на одном участке скорость не может быть меньше 0, максимальная скорость на участках ограничена при постановке задачи оптимизации, кроме того полученные скорости должны обеспечить заданное общее время на маршруте. Работа функции создания начинается с получения случайного распределения скоростей и степеней использования двигателей для заданного количества представителей первого поколения.

Затем, с целью обеспечения заданного времени движения на маршруте, применяется нормирование скорости (определение K_v). В случае, если решение уравнения динамики (11) для разыгранного набора скоростей невозможно, скорости назначаются равными некоторой

фиксированной величине (в данном назначается $V'_k = V_{max}/2$, затем проводится нормализация по времени). Прочие ограничения на распределение скоростей по маршруту, вызванные предельным ускорением и возможности тягового привода, в функции создания не применяются, чтобы обеспечить лучшее начальное разнообразие особей. На рис. 5 показан пример получения скоростей на участках с помощью функции создания. Видно влияние ограничений скорости и неудавшиеся попытки решения уравнения динамики. В остальном решение интереса не представляет, так как очевидно содержит большие ускорения и малую энергоэффективность движения. Далее на каждом шаге генетического алгоритма (т.е. к каждому поколению) применяются так называемые генетические операторы, предназначенные для изменения варьируемых параметров. Традиционно это функции мутации и рекомбинации (скрещивания), которые имитируют процессы, протекающие в живой природе. Обычно заранее задают долю представителей поколения, к которым будет применен тот или иной оператор (либо вероятность применения оператора).

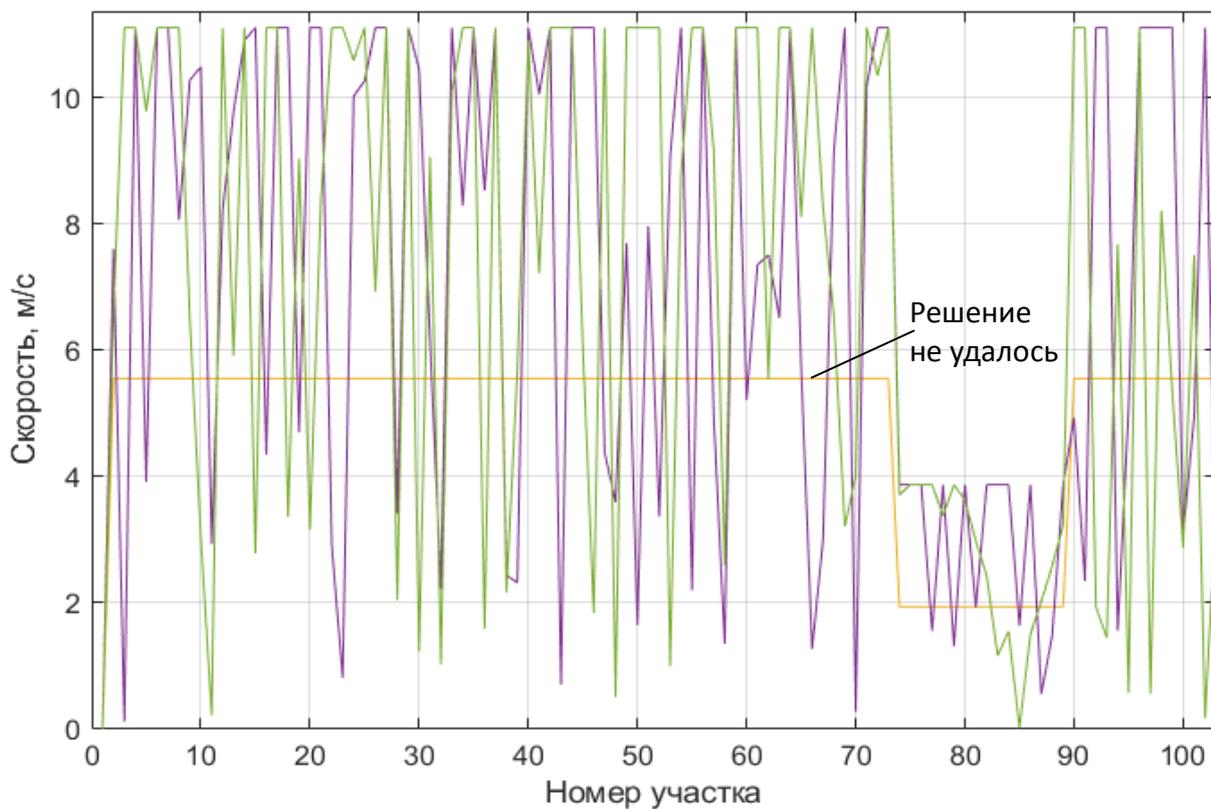


Рис. 5. Пример получения наборов варьируемых параметров (скоростей на участках) первого поколения с помощью функции создания (инициализации)

Fig. 5. An example of obtaining sets of variable parameters (velocities in sections) of the first generation using the creation (initialization) function

Функция мутации осуществляет случайное по величине изменение одного или нескольких варьируемых параметров. Величина изменения параметров не должна быть слишком велика, в некоторых реализациях ГА величина изменения уменьшается по мере приближения к последнему поколению [15]. Случайные изменения скорости могут иметь следствием большие и разнонаправленные ускорения между участками. Это приводит к повышенным потерям при движении КМ, которые, хоть и естественным образом, исправляются в результате дальнейшей оптимизации, но недостаточно быстро и эффективно. Можно значительно ускорить сходимость метода, если при каждом применении генетического оператора осуществлять «сглаживание» скоростей на участках. Поскольку генетические операторы применяются многократно, достаточно слабого «сглаживания» (с малой шириной окна). В данном

исследовании хорошо себя показал фильтр скользящего среднего с нулевым смещением по фазе и шириной окна 3. На рис. 6 приведено сравнение результатов оптимизации с фильтром и без фильтра при прочих равных условиях. Можно отметить более плавный полученный скоростной режим в вычислениях с фильтрацией (который также обеспечивает меньшие потери в электродвигателях) при одинаковом количестве поколений.

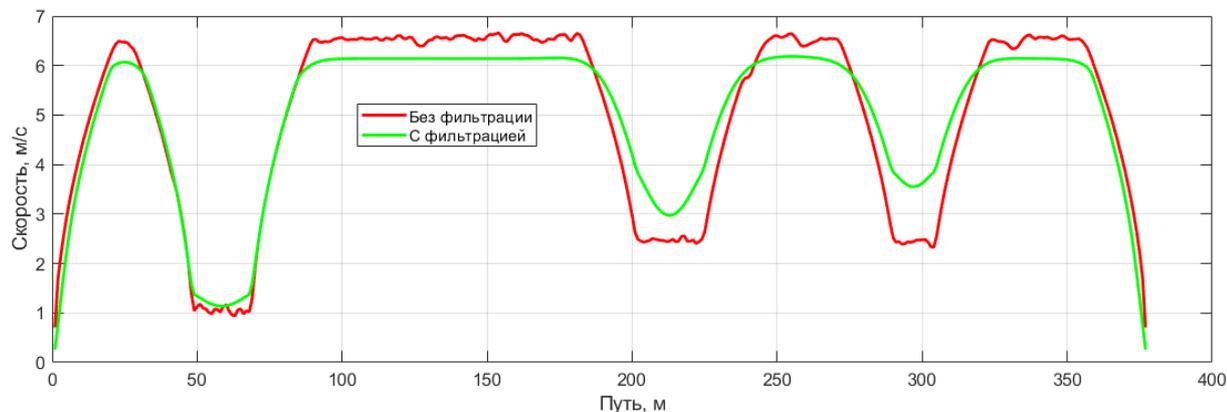


Рис. 6. Пример получения скоростного режима с использованием фильтра скользящего среднего и без него

Fig. 6. An example of obtaining a speed mode with and without a moving average filter

В функции мутации предлагается учитывать ограничения на максимальное ускорение и замедление, а также вызванные тяговыми возможностями колесной машины. С целью получения лучшего разнообразия варьируемых параметров для ранних поколений допустимое продольное ускорение ограничивалось 4 м/с^2 , для последних 10 % поколений максимальное ускорение было установлено 1 м/с^2 .

В итоге предложенная функция мутации осуществляет следующие действия:

- изменение случайных генов особи (каждый ген имеет вероятность подвергнуться мутации в 1 %), величина максимального изменения уменьшается с каждым поколением;
- применение «сглаживающего» фильтра скользящего среднего;
- нормирование скорости для обеспечения заданного времени на маршруте;
- учет ограничений по максимальным ускорениям/замедлениям и тяговым возможностям привода беспилотной КМ.

Следует обратить внимание на то, что применение ограничения по максимальным ускорениям/замедлениям после нормирования скоростей обеспечит некоторое отклонение по времени на маршруте. Однако практика показала, что многократное применение рассмотренной функции мутации в каждом поколении приводит к практически полному соответствию заданному времени в последнем поколении. На рис. 7 представлены значения варьируемых параметров (скорость на участках) для раннего этапа оптимизации, которые получены после применения оператора мутации. Следует отметить наличие существенных отличий между особями, которые являются необходимыми для дальнейшего уменьшения целевой функции. Функция рекомбинации должна получать новую особь путем сочетания генома представителей (обычно двух) одного поколения.

Существуют различные подходы к созданию такой функции – применять оператор рекомбинации к случайным или лучшим представителям поколения, учитывать только тех потомков, которые обеспечивают лучшую приспособленность, использовать больше генов особи с лучшей приспособленностью и т.д. В некоторых источниках [17], по аналогии с эволюцией макроскопических животных, функция рекомбинации ГА считается ключевой, а мутация называется вспомогательным оператором. В данной работе итеративным путем получено, что рекомбинацию целесообразно использовать только для достижения некоторой дополнительной изменчивости между поколениями.

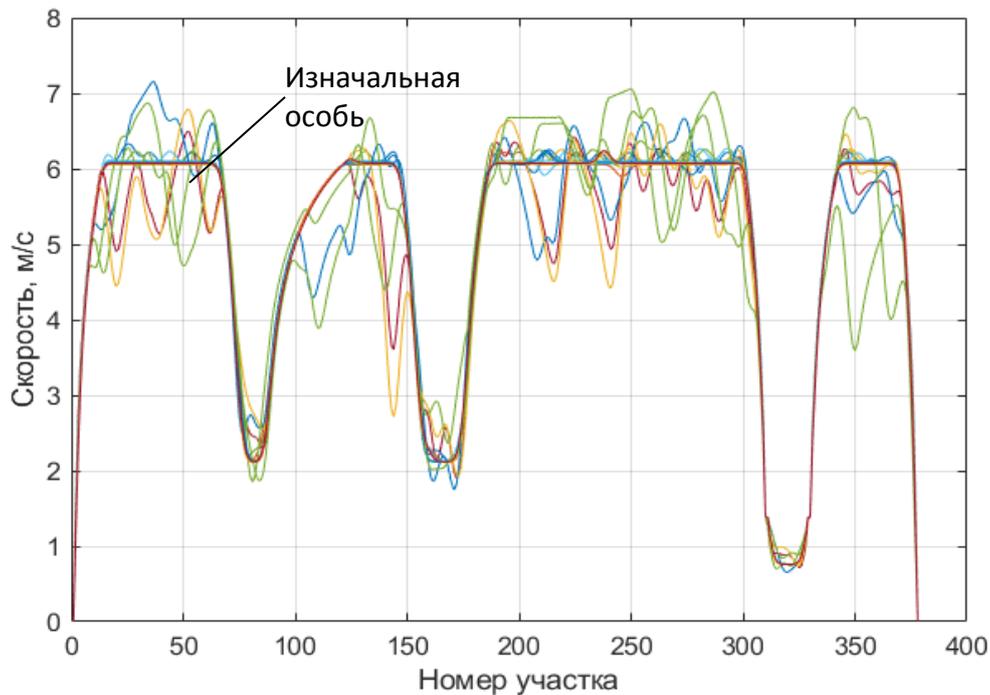


Рис. 7. Пример применения к популяции функции мутации на одном из ранних этапов оптимизации

Fig. 7. An example of applying a mutation function to a population at one of the early stages of optimization

В задачах оптимизации со сложно сочетающимися или дискретными варьируемыми параметрами [16] распространена ситуация, когда произвольный обмен генами приводит к созданию некорректных особей, которые могут не укладываться в заданные ограничения оптимизационной задачи. Это значительно усложняет написание функций рекомбинации. В данной работе ситуация аналогичная – замена варьируемого параметра особи (например, скорости КМ) приводит к изменению времени на маршруте и, возможно, к превышению заданного максимального ускорения. Последующее нормирование и учет ограничений на ускорения могут значительно сократить разнообразие получившихся особей, поэтому предлагается часть ограничений не учитывать.

Таким образом, функция рекомбинации (рис. 8) выполняет следующие операции:

- составление особи из генов двух предков (каждый ген имеет 50 % вероятность оказаться в потомке);
- применение «сглаживающего» фильтра скользящего среднего;
- нормирование скорости для обеспечения заданного времени на маршруте.

В настоящем исследовании принято, что 1 % лучших особей (с округлением до большего целого числа) переносится в следующий шаг оптимизации без изменений, к 10 % особей поколения применяется оператор рекомбинации, а к остальным – оператор мутации.

Общая схема алгоритма оптимизации

Условие окончания алгоритма оптимизации обычно заключается в отсутствии значимого изменения значения функции приспособленности лучшего представителя популяции на протяжении нескольких поколений, либо расчет можно останавливать просто по истечении заданного количества поколений.

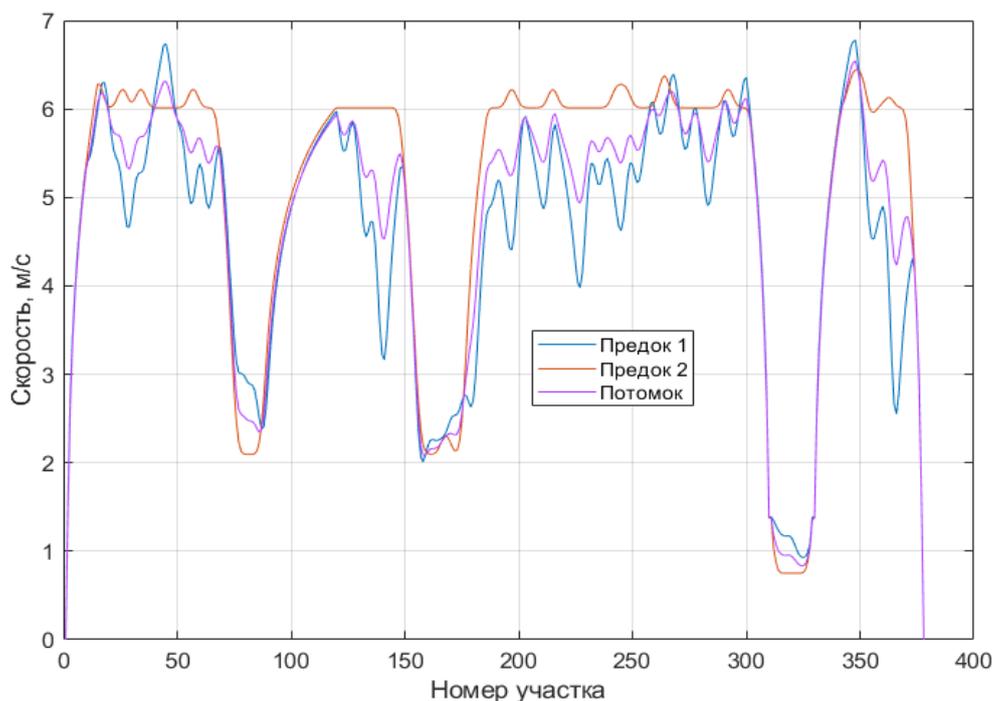


Рис. 8. Пример получения потомка из предков с помощью функции рекомбинации

Fig. 8. An example of obtaining a descendant from ancestors using the recombination function

В дальнейшем для надежности используется второй вариант остановки вычислений, так как для генетического алгоритма характерны периоды, когда много поколений подряд существенных изменений нет, а затем происходит непредсказуемый «всплеск» разнообразия особей и последующее существенное улучшение функции приспособленности. С учетом этого предлагается следующий алгоритм получения закона движения и управления тяговыми двигателями БКМ по известному маршруту с применением генетического алгоритма (рис. 9). Схема показана для более общего случая определения скоростного режима. Определение параметра использования моментного привода h_k предлагается осуществлять аналогичным образом, но без необходимости нормирования скорости, и учета остальных ограничений.

Применение генетического алгоритма для определения оптимального закона движения беспилотной колесной машины по заданному маршруту

Настоящая работа ограничена описанием основных подходов применения ГА для определения оптимального закона движения БКМ. Основные исследования и результаты предполагается привести в следующем исследовании. На данном этапе алгоритм апробируется для определения области его эффективного применения, а именно – для оценки требуемого числа поколений (итераций алгоритма оптимизации) и размера популяции (числа особей в каждом поколении). Увеличение количества поколений позволяет функции приспособленности более точно приблизиться к некоторому локальному минимуму. При этом делать чрезмерно много поколений нецелесообразно, так как для задач локальной оптимизации существуют более вычислительно эффективные алгоритмы (так, в инструментах программного комплекса MATLAB [15] есть возможность последующего автоматического вызова другого алгоритма оптимизации с использованием результатов работы ГА). Большое количество особей в каждом поколении позволяет ГА эффективнее искать глобальный минимум целевой функции. Увеличение обоих параметров (размера популяции и числа поколений) значительно увеличивает время вычислений, что затрудняет использование алгоритма в исследовательских целях и может не позволить использовать его на практике для действующей БКМ.

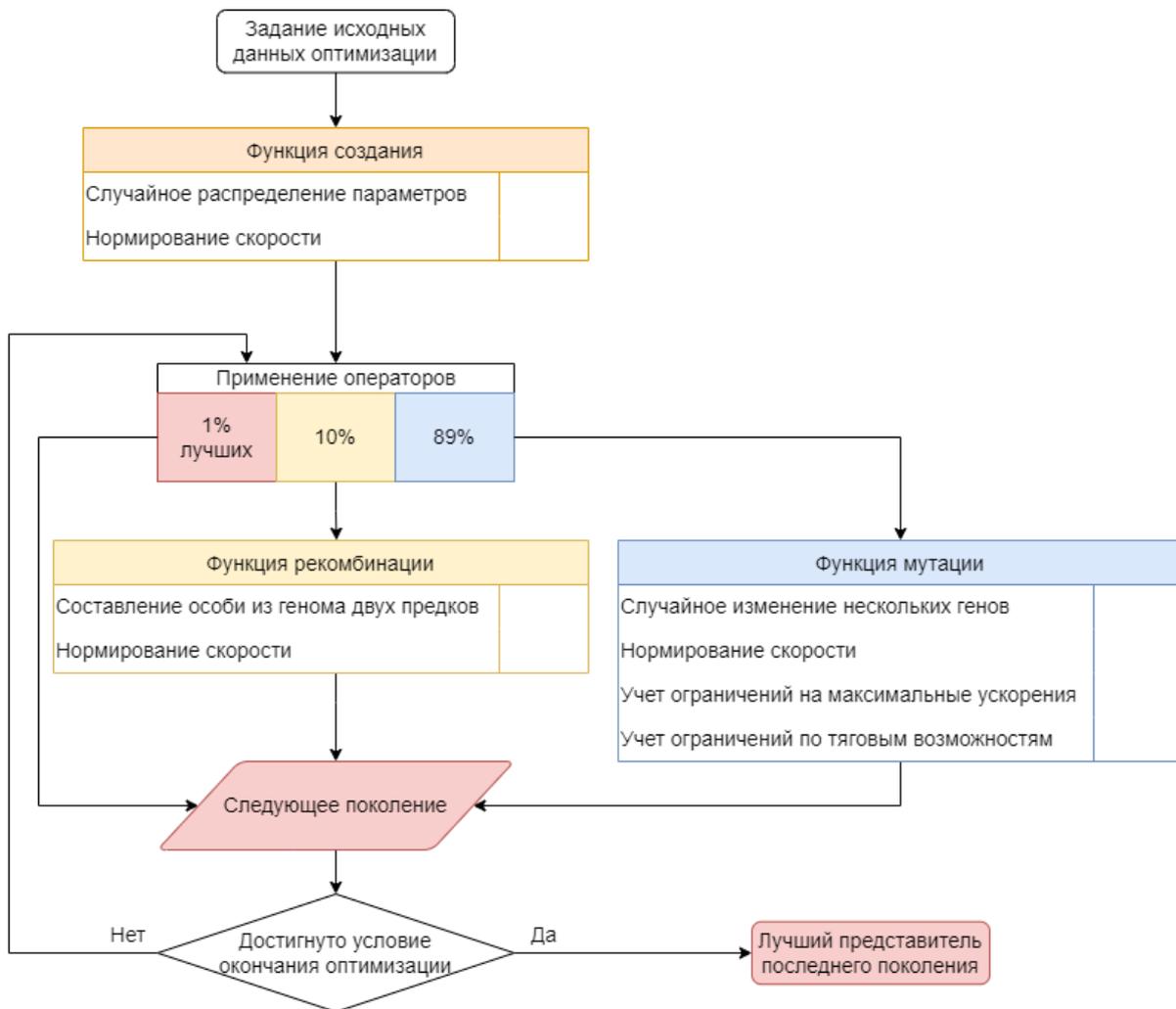


Рис. 9. Блок-схема алгоритма оптимизации, используемого в работе для определения скорости и степени использования двигателей беспилотной колесной машины при движении по известному маршруту

Fig. 9. Block diagram of the optimization algorithm used to determine the speed and degree of use of the engines of an unmanned wheeled vehicle when moving along a known route

С целью определения рационального сочетания параметров ГА были проведены пробные расчеты скоростного режима при движении БКМ на заданном маршруте. Результаты представлены в табл. 1, причем следует отметить, что рассчитанные случаи имеют одинаковое общее количество существовавших особей (20000 шт. за все поколения).

Таблица 1.

Затраты энергии на движение и энергия потерь в тяговых электродвигателях. Результаты оптимизации при различных настройках алгоритма

Table 1.

Energy costs for movement and energy losses in traction motors. Optimization results for different algorithm settings

Размер популяции	20	200	100	1000
Число поколений	1000	100	200	20
Затраты энергии, Дж	5040699	5020655	5009855	5062251
Потери энергии ТЭД, Дж	1408869	1394662	1387240	1431165

Табл. 1 позволяет судить о том, что для достижения лучшей эффективности вычислений (скорейшей сходимости алгоритма оптимизации) следует соблюдать баланс между количеством особей и поколений. В дальнейших исследованиях задачу определения скоростного режима предлагается решать с использованием 200 поколений по 100 особей. Определение степени использования ТЭД МП и БП требует меньше времени, затраченного на вычисления, так как динамика БКМ от параметра h_k не зависит, нет необходимости осуществлять дополнительное нормирование скорости (и численно решать уравнения). Поэтому для случая варьирования h_k было назначено увеличенное количество поколений (1000 поколений и 100 особей в каждом). На рис. 10 показана типичная картина такой оптимизации (в качестве целевой функции использовалось значение потерь в электродвигателях, формула (1)). Более 1000 поколений для ГА в данном случае назначать нецелесообразно.

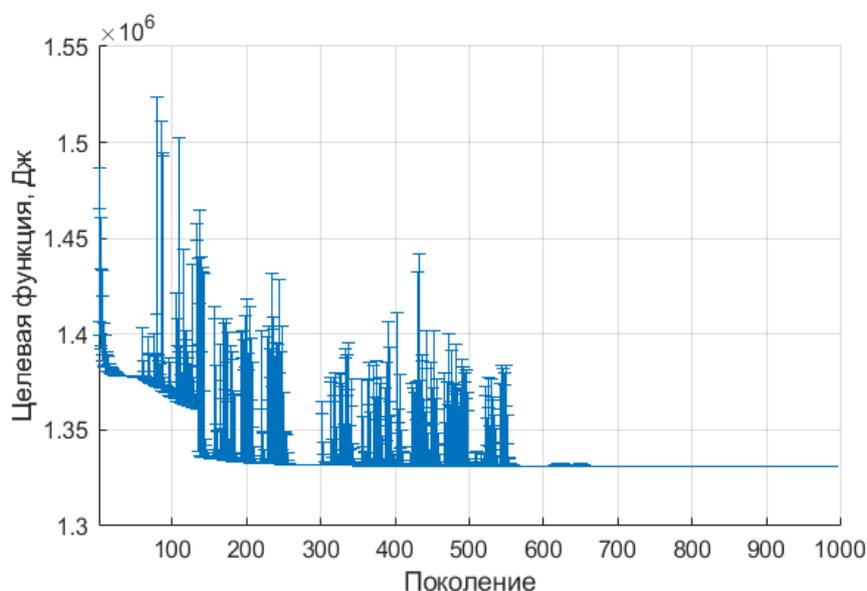


Рис. 10. Пример оптимизации с варьированием степени использования электродвигателей (показаны максимальные и минимальные значения целевой функции для каждого поколения)

Fig. 10. An example of optimization with varying the degree of use of electric motors (the maximum and minimum values of the objective function for each generation are shown)

Заключение

В статье представлен метод определения оптимального скоростного режима и степени использования электродвигателей беспилотной колесной машины при циклических грузоперевозках, базирующийся на генетическом алгоритме. Алгоритм оптимизации предполагает наличие заданного маршрута, разбитого на участки равной длины, каждый из которых характеризуется кривизной, углом наклона опорной поверхности и ограничением максимальной скорости движения машины. В результате работы алгоритма определяется требуемая скорость движения колесной машины и коэффициент распределения тяги между электродвигателями на каждом участке пути. В качестве целевой функции оптимизации используется суммарная энергия потерь в тяговых электродвигателях при движении по маршруту.

На данном этапе представлены только предварительные результаты исследований, выполненных с помощью алгоритма. Основная цель вычислений заключалась в оценке соотношения требуемого количества поколений и требуемого числа особей в каждом поколении для эффективного использования алгоритма. Полученные данные позволяют перейти непосредственно к разработке оптимального закона управления БКМ.

Библиографический список

1. Automated port terminal in Qingdao handles 790,000 TEUs within first year. [Electronic document] Access mode http://www.xinhuanet.com/english/2018-05/12/c_137174428.htm (дата обращения: 06.06.2023).
2. **Bertazzi, L.** An exact approach for cyclic inbound inventory routing in a level production system / L. Bertazzi, D. Laganà, J.W. Ohlmann, R. Paradiso // *European Journal of Operational Research*. Volume 283. Issue 3. 2020. P. 915-928. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.11.060
3. **Горелов, В.А.** Метод определения параметров электромеханической трансмиссии фронтального погрузчика / В.А. Горелов, Б.Б. Косицын, А.А. Стадухин, О.И. Чудаков // *Тракторы и сельхозмашины*. 2021. Вып. 5. С. 38-45.
4. **M. De Carlo, G. Mantriota.** Electric vehicles with two motors combined via planetary gear train // *Mechanism and Machine Theory*. V. 148. 2020 DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.103789
5. **Косицын, Б.Б.** Метод определения энергоэффективного закона движения электробуса по городскому маршруту: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 165 с.
6. **Vahid, S. A.** Optimal path planning for unmanned surface vehicle using new modified local search ant colony optimization / S. Vahid, A. Dideban // *J Mar Sci Technol* 27, 1207-1219. 2022. DOI: 10.1007/s00773-022-00898-2
7. **Hellström, T.** Path planning for off-road vehicles with a simulator-in-the-loop. Electronic document [Access mode] https://www.researchgate.net/publication/268426994_Path_planning_for_off-road_vehicles_with_a_simulator-in-the-loop (дата обращения: 06.06.2023).
8. **Qian, Q.** Optimal path planning for two-wheeled self-balancing vehicle pendulum robot based on quantum-behaved particle swarm optimization algorithm / Q. Qian, J. Wu, Z. Wang // *Pers Ubiquit Comput* 23, 2019. 393–403 p. DOI: 10.1007/s00779-019-01216-1
9. **Dzupire. N. Ch.** A Multi-Stage Supply Chain Network Optimization Using Genetic Algorithms/ Nelson Christopher Dzupire, Yaw Nkansah-Gyekye // *Mathematical Theory and Modeling*. Vol.4, No.8, 2014.
10. **Kuo, R.J.** A hybrid of genetic algorithm and particle swarm optimisation for solving bi-level linear programming problem—A case study on supply chain model / R.J. Kuo, Y.S. Han // *Applied Mathematical Modelling*. 2011. 35(8). 3905-3917 p.
11. **Chang, C.S.** Optimising train movements through coast control using genetic algorithms / C.S. Chang, S.S. Sim // *IEE Proceedings-Electric Power Applications*. 1997. № 144. P. 65-73.
12. An optimal automatic train operation (ATO) control using genetic algorithms (GA) / Seong Ho [et al.] // *Proceedings of IEEE. IEEE Region 10 Conference. 160 TENCON 99. «Multimedia Technology for Asia-Pacific Information Infrastructure»* (Cat. No.99CH37030). 1999. № 1. P. 360-362.
13. **Падалкин, Б.В.** Метод оценки эффективности применения электромеханических трансмиссий транспортных средств на этапе проектирования / Б.В. Падалкин, В.В. Иваненков, Б.Б. Косицын, А.А. Стадухин, К.С. Балковский // *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2020. Вып. № 2 (44). С. 58-67. DOI: 10.31992/2074-0530-2020-44-2-58-68
14. **Косицын, Б.Б.** Научные методы повышения подвижности боевых колесных машин путем совершенствования тормозных свойств: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: МГТУ, 2021. – 280 с.
15. Mathworks. Genetic Algorithm Options [Electronic document] Access mode <https://www.mathworks.com/help/gads/genetic-algorithm> (дата обращения: 06.06.2023).
16. **Ombuki, B.** Multi-Objective Genetic Algorithms for Vehicle Routing Problem with Time Windows / B. Ombuki, V.J. Ross, F. Hanshar // *Appl Intell* 24, 2006. Pp.17-30.
17. **Андреев, А.А.** Применение генетических алгоритмов при оптимизации нелинейных функций // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. 2009. Т.14. №.5-2. С. 1036-1040.

**Дата поступления
в редакцию: 23.06.2023**

**Дата принятия
к публикации: 28.07.2023**