

УДК 629.113

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_97

**ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЗАКОНА
ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОЙ КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ
ПРИ ЦИКЛИЧНЫХ 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

Исследована сфера применения основанного на генетическом алгоритме метода определения оптимального закона движения беспилотной колесной машины по заданному маршруту. Использование в составе трансмиссии двух тяговых электродвигателей в совокупности с редукторами, имеющими разное передаточное отношение, позволяет использовать электродвигатели со значительно меньшей суммарной мощностью, чем в случае попытки обеспечить диапазон трансмиссии машины одним электродвигателем. Показано, что это позволяет обеспечить меньшие массу, габаритные размеры и стоимость электропривода. Кроме того, при наличии двух тяговых электроприводов (электромашин в совокупности с редукторами, имеющими различные передаточные отношения), можно перераспределять тягу между ними таким образом, чтобы суммарные потери энергии были минимальны. Для повышения энергоэффективности движения беспилотной колесной машины предлагается использовать установленный при помощи разработанного метода закон управления моментным и быстроходным приводом, т.е. оптимизировать не только скорость на маршруте, но и коэффициент распределения тяги между двигателями.

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

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Назаренко, С.В. Применение генетического алгоритма для определения оптимального закона движения беспилотной колесной машины при циклических грузоперевозках / С.В. Назаренко, Б.В. Косицын, Б.В. Падалкин, А.А. Стадухин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 4. С. 97-110.

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_97

**APPLICATION OF GENETIC ALGORITHM TO DETERMINE THE
OPTIMAL LAW OF MOTION OF UNMANNED WHEELED VEHICLE
IN 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 is devoted to the application of the method based on a genetic algorithm for determining the optimal law of motion of an unmanned wheeled vehicle along a given route. The use of two traction electric motors as part of the transmission in combination with gearboxes having different gear ratios allows the use of electric motors with significantly lower total power than in the case of an attempt to provide the transmission range of the machine with one electric motor. The article shows that this makes it possible to provide less weight, overall dimensions and cost of the electric drive. In addition, in the presence of two traction electric drives (electric machines in combination with gearboxes having different gear ratios), it is possible to redistribute traction between them in such a way that the total energy losses are minimal. It is proposed to use the law of control of torque and high-speed drive obtained using the developed method to increase the energy efficiency of the movement of an unmanned wheeled vehicle, that is, to optimize not only the speed on the route, but also the coefficient of traction distribution between the motors

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. Application of genetic algorithm to determine the optimal law of motion of unmanned wheeled vehicle in cyclic cargo transportation. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 4. Pp. 97-110. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_97

Введение

В статье [1] предложено использовать генетический алгоритм для получения закона энергоэффективного движения беспилотной колесной машины (БКМ) при циклических грузоперевозках, обеспечивающий возможность управлять электроприводом БКМ, состоящим из двух одинаковых электромашин, соединенных с трансмиссией через редукторы с разным фиксированным передаточным отношением (рис. 1, справа).

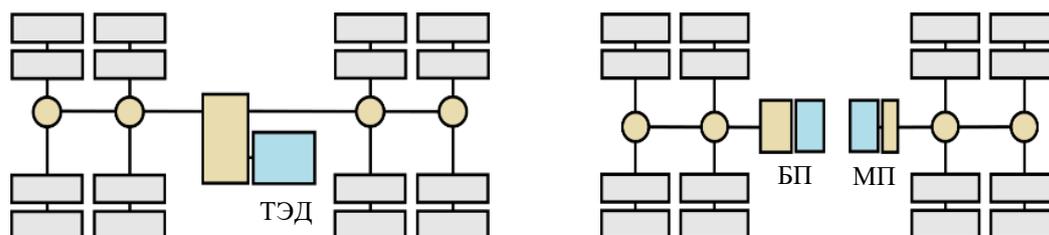


Рис. 1. Принципиальные схемы трансмиссий исследуемых машин

Fig. 1. Schematic diagrams of transmissions of the vehicles under study

Электродвигатель с большим передаточным отношением называется моментным приводом (МП), с меньшим – быстроходным приводом (БП). Такое устройство трансмиссии позволяет, с одной стороны, обеспечивать требуемую максимальную скорость движения и требуемую максимальную силу тяги, с другой – не требует применения ступенчатой трансмиссии (и переключения передачи в движении). Необходимо также отметить, что при движении БКМ электродвигатели БП и МП будут нагружены различным образом, что позволит за счет рационального распределения развиваемой ими мощности достичь лучшей энергоэффективности для трансмиссии в целом. Для оценки эффективности предложенного подхода в данной работе также исследуется БКМ с одним тяговым электродвигателем (ТЭД), обеспечивающим весь требуемый диапазон машины (рис. 1, слева). Генетические алгоритмы широко используются наряду с другими методами для решения сложных задач оптимизации, потенциально имеющих много локальных минимумов, в частности – задачи поиска пути [2], определения оптимального скоростного режима [3-4], перемещения груза от поставщиков к потребителям с учетом распределительных центров, ограничения времени снабжения задействованного парка транспортных машин, затрат на дорогу и т.д. [5, 6].

Для использования генетического алгоритма требуется определить наборы варьируемых параметров (называемых особями), соответствующие операции с ними (функции создания, мутации и рекомбинации) и целевую функцию (функцию приспособленности) [1]. Краткая характеристика предлагаемого метода с использованием генетического алгоритма состоит в следующем: в качестве целевой функции оптимизации выбрана суммарная мощность потерь тяговых электродвигателей БКМ (потери в электродвигателях определялись с использованием методики [7]), варьируемыми параметрами являлись скорость движения V_k и коэффициент распределения тяги между двигателями h_k на каждом участке, функции генетического алгоритма были модифицированы таким образом, чтобы обеспечить заданное время на маршруте, не превышение максимально допустимой скорости на участке, а также максимальных ускорений (в том числе исходя из тяговых возможностей БКМ). При учете ограничений использовалась математическая модель криволинейного движения машины в естественных координатах [8, 9].

Методика исследования и исходные данные

Основные параметры исследуемой колесной машины представлены в табл. 1. Параметры ТЭД и передаточные числа трансмиссии выбраны таким образом, чтобы обеспечить одинаковую максимальную скорость и максимальную силу тяги для двух вариантов БКМ (вариант 1 с одним ТЭД и вариант 2 с двумя ТЭД – МП и БП, рис. 1). На рис. 2 представлены динамические характеристики рассматриваемых БКМ.

Таблица 1.

Параметры исследуемых беспилотных колесных машин

Table 1.

Parameters of the studied unmanned wheeled vehicles

| Параметр | Вариант I | Вариант II |
|---|-----------|------------|
| Снаряженная масса машины, $m_{\text{снар}}$, кг | 24000 | |
| Полная масса машины, $m_{\text{полн}}$, кг | 44000 | |
| Максимальная скорость машины, v_{max} , км/ч | 60 | |
| Радиус качения колеса без скольжения, r_0 , м | 0,461 | |
| Площадь лобовой проекции, $F_{\text{лоб}}$, м ² | 10,2 | |
| Коэффициент аэродинамического сопротивления, c_x | 0,7 | |
| КПД механической части трансмиссии | 0,97 | |
| Мощность, необходимая для достижения максимальной скорости, $N_{\text{треб}}$, кВт | 169 | |

Окончание табл. 1.

Параметры исследуемых беспилотных колесных машин

Table 1 (continued).

Parameters of the studied unmanned wheeled vehicles

| Параметр | Вариант I | Вариант II |
|---|--------------|------------|
| Максимальная частота вращения вала электродвигателя, $n_{ЭДmax}$, об/мин ($\omega_{ЭДmax}$, 1/с) | 3500 (366,5) | |
| Диапазон электродвигателя, $d_{ЭД} = \frac{M_{ЭДmax} \cdot \omega_{ЭДmax}}{N_{ЭД,d}}$ | 5 | |
| Максимальный момент электродвигателя, $M_{ЭДmax}$, Нм | 8091 | 2308 x 2 |
| Мощность электродвигателя с учетом диапазона, $N_{ЭД,d}$, кВт | 593 | 169 x 2 |
| Передаточное отношение для обеспечения максимальной скорости (быстроходного привода) $i_{тр,в}$ | 10,45 | 10,45 |
| Передаточное отношение моментного привода $i_{тр,н}$ | – | 26,18 |

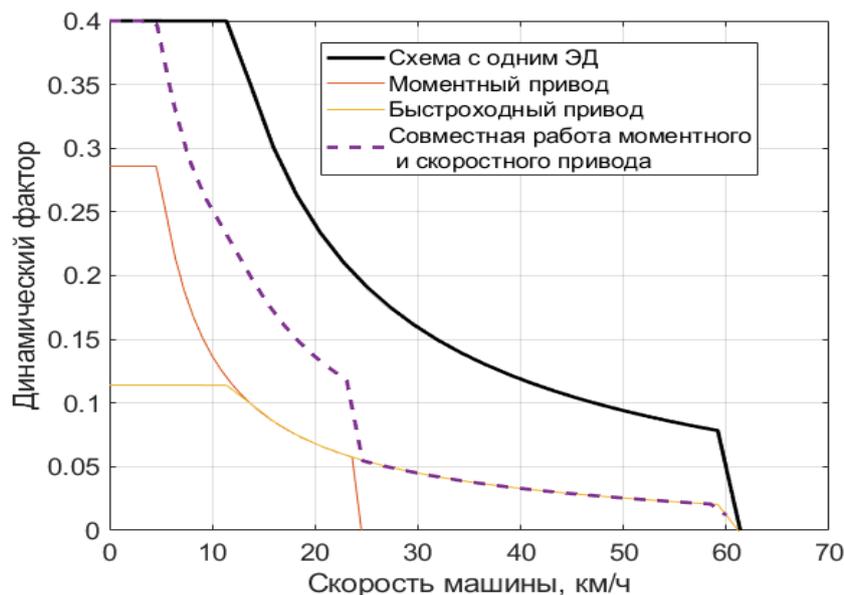


Рис. 2. Динамические характеристики для схемы с одним тяговым двигателем (вариант I) и для схемы с двумя тяговыми двигателями (вариант II, в том числе, при движении только на моментном или быстроходном приводе)

Fig. 2. Dynamic characteristics for a scheme with one traction motor (option I) and with two traction motors (option II, including when driving only on a torque or high-speed drive)

Анализ представленных данных позволяет заключить, что применение в составе привода БКМ двух тяговых электродвигателей позволяет использовать привод с меньшей общей мощностью и, соответственно, массой и габаритными размерами, по сравнению с исполнением привода с одним электродвигателем (338 кВт при варианте II, 593 кВт при варианте I). При этом предполагается, что избыточную энерговооруженность варианта I беспилотной машины не удастся использовать для увеличения средней скорости, так как по условиям тягового расчета требуемая максимальная мощность $N_{треб} = 169$ кВт. Кроме того при циклических грузоперевозках время движения по маршруту должно быть задано. В диапазоне скоро-

стей движения 0-25 км/ч БКМ варианта II может использовать два своих тяговых электродвигателя в разной степени. На рис. 3 показана синтезированная по методике [7] характеристика эффективности двигателя, выбранного для варианта беспилотной КМ варианта II. Изолиниями обозначены зоны с различным КПД. Видно, что эффективность работы электродвигателя зависит как от частоты вращения ротора, так и от развиваемого крутящего момента. В качестве примера на рис. 3 звездочками обозначены режимы работы электродвигателя при движении КМ со скоростью 10 км/ч при коэффициенте сопротивления 0,1 при обеспечении тяги только моментным приводом или только быстроходным приводом. Видно, что в первом случае КПД электромашины более 0,92, а во втором – менее 0,85. Из этого следует, что при наличии двух электромашин в совокупности с редукторами, имеющими различные передаточные отношения, для повышения энергоэффективности движения необходимо перераспределять тягу между ними таким образом, чтобы суммарные потери энергии были минимальны.

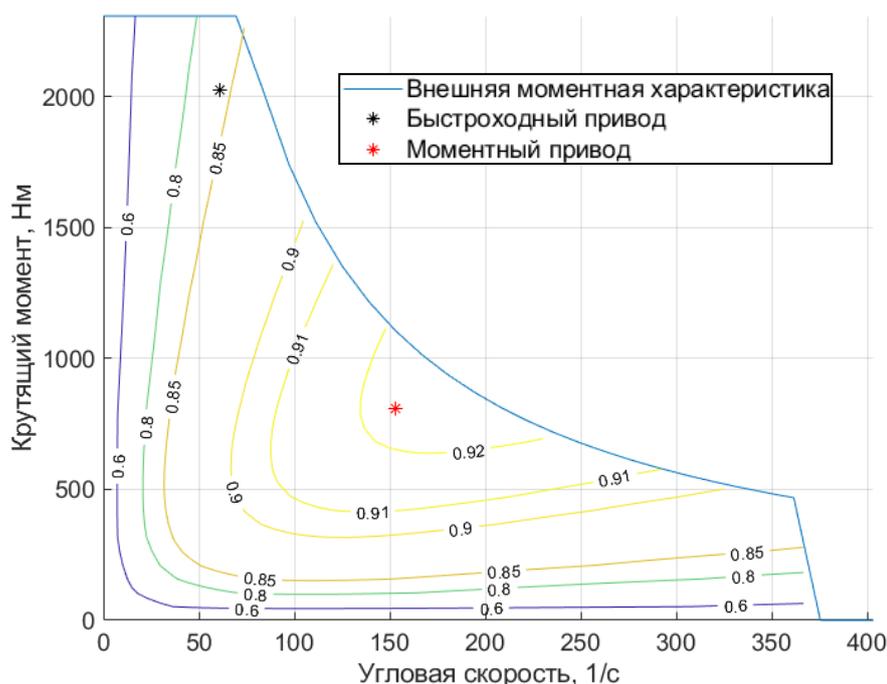


Рис. 3. Моментная скоростная характеристика электродвигателя с обозначением областей КПД

Fig. 3. Torque speed characteristic of an electric motor with designation of efficiency areas

Пример технологического маршрута машины

В целях проверки работоспособности предлагаемого метода определения закона оптимального управления тяговыми электродвигателями БКМ необходимо задаться типичным для циклических грузоперевозок маршрутом движения. В настоящем исследовании предложен маршрут, имеющий особенности, характерные для реальной эксплуатации БКМ – повороты, подъемы, спуски и ограничения скорости на участках (рис. 4). Подразумевается, что маршрут соответствует работе беспилотной КМ в изолированном технологическом пространстве (автоматизированный производственный цех или грузовой терминал) и не предполагает случайных и неожиданных препятствий.

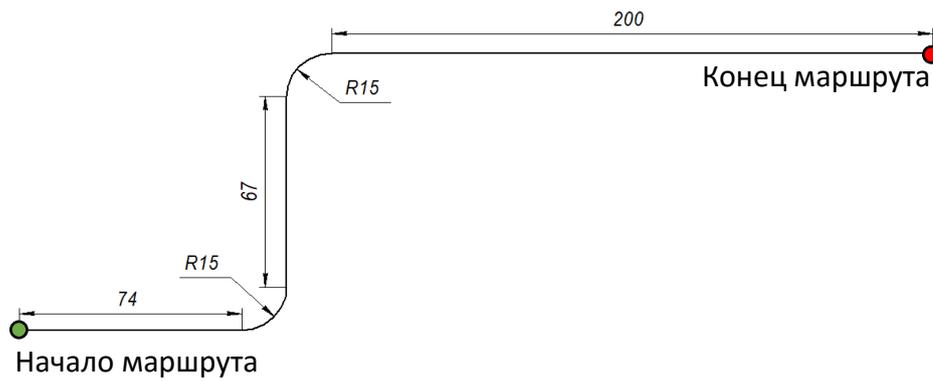


Рис. 4. Схема типового маршрута движения беспилотной колесной машины

Fig. 4. Scheme of a typical route for an unmanned wheeled vehicle

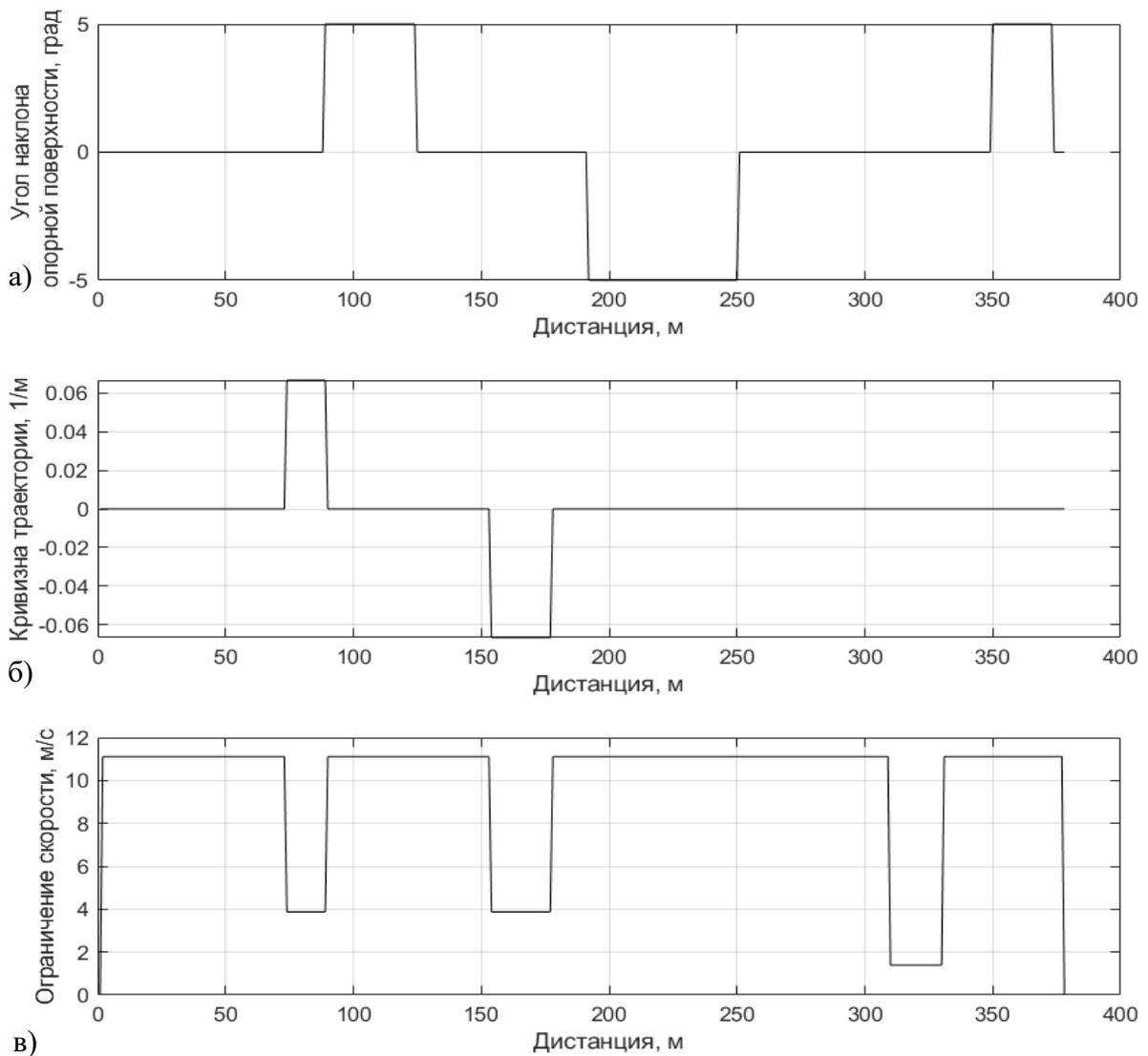


Рис. 5. Зависимость условия движения от пройденной дистанции для типового маршрута беспилотной колесной машины:

а) угол наклона опорной поверхности; б) кривизна траектории; в) ограничение максимальной скорости)

Fig. 5. Dependence of movement conditions on the distance traveled for a typical route of an unmanned wheeled vehicle:

a) angle of inclination of the supporting surface; b) trajectory curvature; c) maximum speed limit

Общая длина такого маршрута составляет 378 м. Для работы с алгоритмом оптимизации его предлагается разбить на участки длиной 1 м. Имеющиеся повороты, подъемы, спуски и ограничения максимальной скорости отражены на рис. 5. Первые два участка ограничения максимальной скорости заданы, исходя из условия безопасного прохождения поворотов, а третий имитирует прохождение технологического участка, где требуется снизить скорость. При циклических грузоперевозках движение маршруту осуществляется в двух направлениях: в прямом направлении БКМ движется с полной массой, а обратно – со снаряженной массой (т.е. без груза). Для обоих вариантов БКМ было предусмотрено несколько режимов движения – от медленного (прохождение маршрута в одну сторону за 300 с) до быстрого (за 100 с). Прохождение данной трассы существенно быстрее, чем за 100 с затруднительно в связи с требованиями безопасности прохождения поворотов. Прохождение маршрута медленнее, чем за 300 с позволяет беспилотной машине двигаться с неизменной скоростью и не представляет существенного интереса для оптимизации.

Определение скорости БКМ на маршруте

При определении оптимального закона изменения скорости БКМ на маршруте оптимизация проводилась для 200 поколений, по 100 представителей в каждом (параметры выбраны на основе исследования [1]). Максимальное ограничение на ускорение и на замедление было установлено 1 м/с^2 . Коэффициент сопротивления прямолинейному движению назначен $f_{\text{тр}} = 0,02$. На рис. 6 показаны значения целевой функции для лучшего и худшего представителя каждого поколения. Для примера рассмотрен процесс определения закона оптимального управления в случае быстрого (100 с) движения по маршруту беспилотной КМ варианта I в прямом направлении (с полной загрузкой).

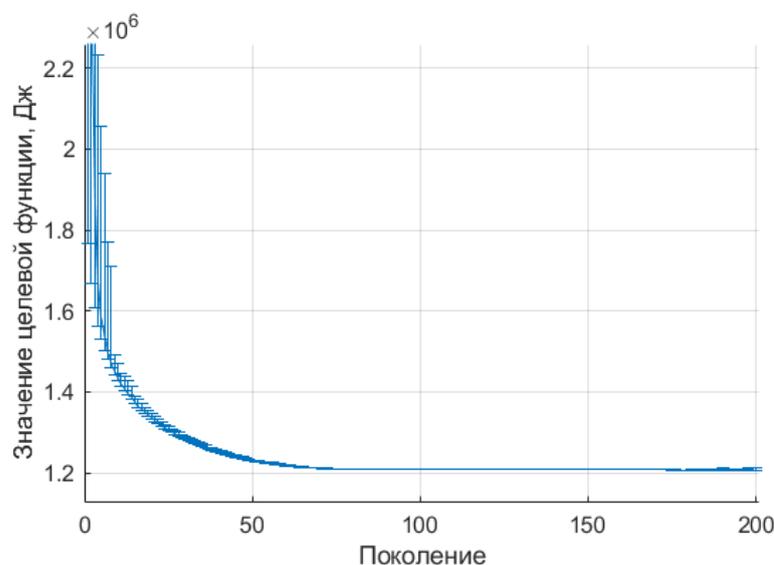


Рис. 6. Наибольшее (худшее), среднее и наименьшее (лучшее) значение целевой функции для каждого поколения при оптимизации прохождения по маршруту машины с одним тяговым двигателем (верхняя часть графика не показана)

Fig. 6. The largest (worst), average and smallest (best) value of the objective function for each generation when optimizing the route of a vehicle with one traction motor (the upper part of the graph is not shown)

Первое поколение было получено с помощью специальной функции создания и, несмотря на то, что его представители укладываются в заданные ограничения по времени движения и предельным ускорениям, движение здесь не является оптимальным по затраченной энергии. В данном случае лучший представитель первого поколения имеет значение целевой

функции $3,81 \cdot 10^6$ Дж. Как видно из рис. 7, скорость на участках для этого случая представляет собой несколько измененный и «отмасштабированный» закон ограничения скорости на участках (рис. 5, в).

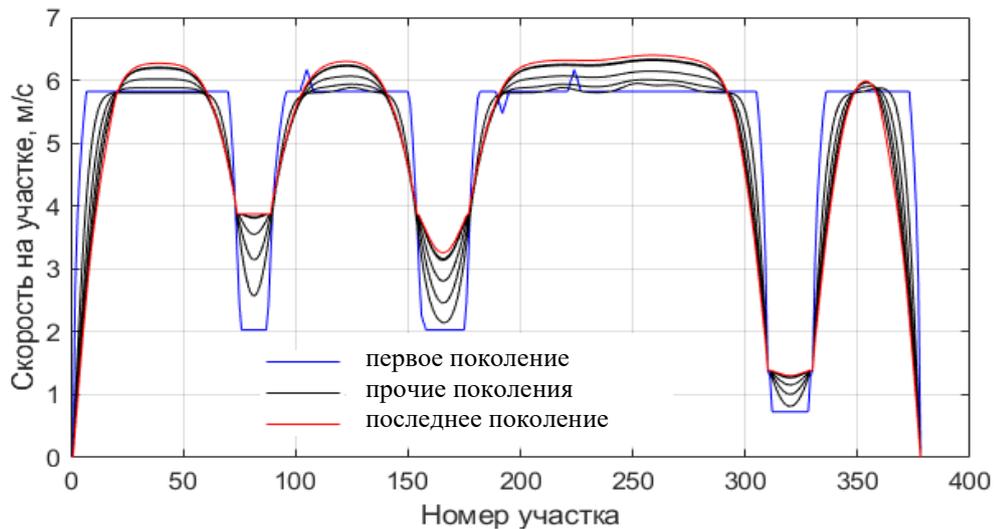


Рис. 7. Лучшие представители каждого десятого поколения при оптимизации прохождения по маршруту машины с одним тяговым двигателем

Fig. 7. The best representatives of every tenth generation when optimizing the route of a vehicle with one traction motor

В процессе оптимизации было получено решение с меньшими потерями энергии в электродвигателе ($1,29 \cdot 10^6$ Дж). Видно, что данное решение отличается меньшими действующими ускорениями и несколько большей максимальной скоростью. На рис. 8 показано, что решение удовлетворяет заданным ограничениям по скорости и ускорению, причем ускорение на некоторых участках достигает предельных значений.

Режим работы тягового электродвигателя беспилотной КМ варианта I при движении по маршруту в прямом направлении можно оценить по рис. 9. Как видно на данном маршруте тяговые возможности двигателя полностью не используются, несмотря на малое заданное время прохождения маршрута.

Разработанная методика выбора закона управления тяговыми электродвигателями была применена для исследования БКМ варианта II в аналогичных условиях движения (заезд в прямом направлении, полная масса КМ, время преодоления маршрута 100 с). Проводилось два отдельных этапа оптимизации: сначала определялась скорость на участках V_k (при этом коэффициент h_k для каждого участка принимался 0,5), затем определялись значения h_k (использовались скорости на участках V_k , полученные на первом этапе). При определении h_k число поколений было выбрано 1000, число особей – 200 (рис. 10).

Программное обеспечение, разработанное для данных исследований, позволяет произвести одновременную (в один этап) оптимизацию по скорости V_k и по коэффициенту h_k . В табл. 2 приведены результаты вычислений для случая одновременного варьирования V_k и h_k на участках в сравнении с отдельным варьированием. Как можно заметить, даже длительные расчеты при совместном варьировании параметров не гарантируют получение лучшего результата. Это связано с малой чувствительности целевой функции к изменению параметров h_k по сравнению с V_k и ограниченным количеством циклов оптимизации.

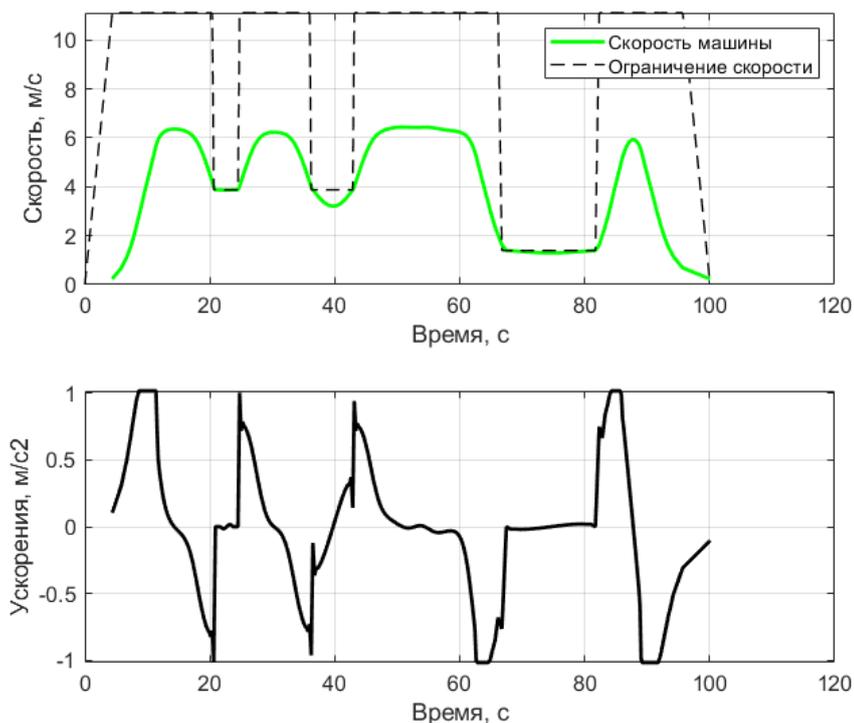


Рис. 8. Ускорения и скорости, реализуемые при движении беспилотной колесной машины по маршруту

Fig. 8. Accelerations and speeds realized when an unmanned wheeled vehicle moves along a route

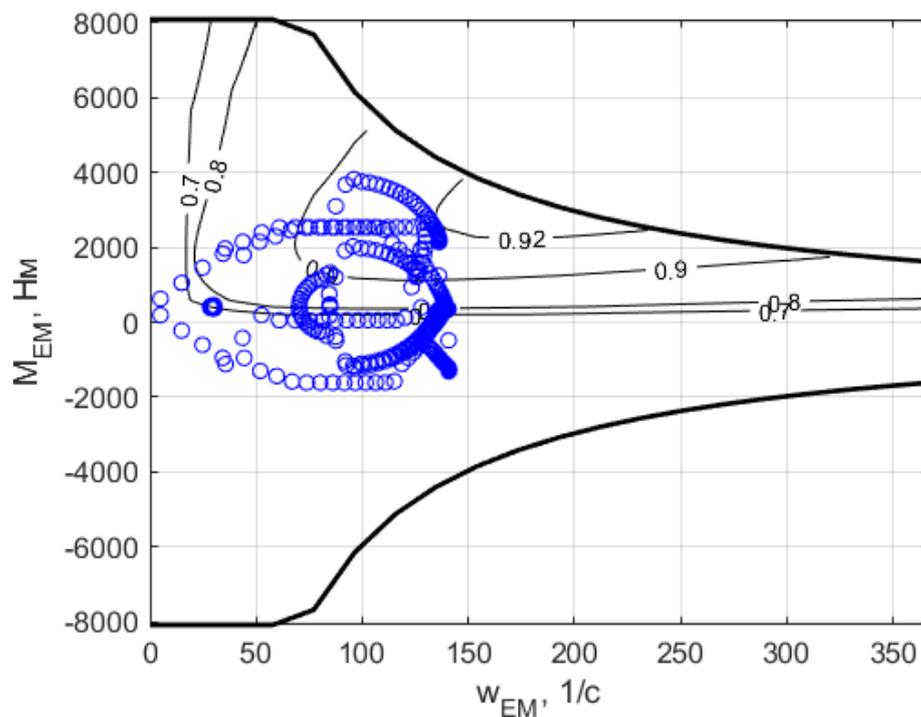


Рис. 9. Внешняя скоростная характеристика тягового электродвигателя и его режимы использования при движении по трассе колесной машины варианта I

Fig. 9. External speed characteristics of the traction electric motor and its operating modes when a wheeled vehicle driving on the track, option I

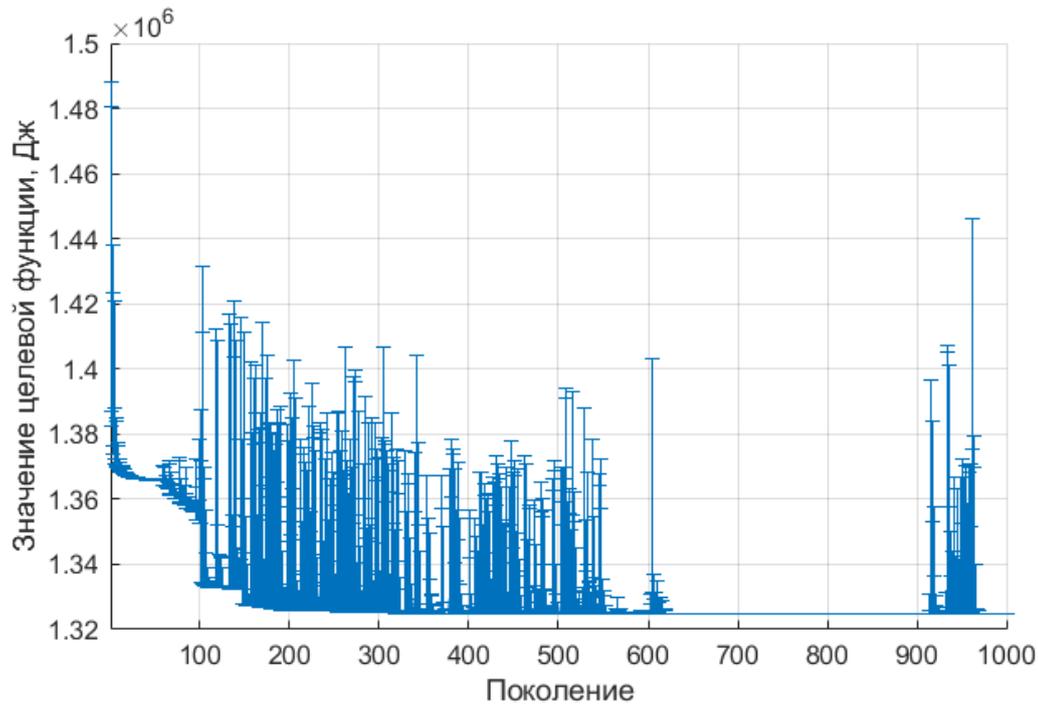


Рис. 10. Наибольшее (худшее), среднее и наименьшее (лучшее) значение целевой функции для каждого поколения при оптимизации по коэффициенту h_k при движении по маршруту машины с двумя тяговыми электродвигателями (КМ варианта II)

Fig. 10. The largest (worst), average and smallest (best) value of the objective function for each generation when optimized by the coefficient h_k when driving along the route of a vehicle with two traction electric motors (wheeled vehicle option II)

Таблица 2.

Затраты энергии на движение и энергия потерь в тяговых электродвигателях. Результаты оптимизации при раздельном и совместном варьировании параметров скорости на участках и степеней использования двигателей на участке

Table 2.

Energy consumption for movement and energy losses in traction motors. Optimization results with separate and joint variation of speed parameters in sections and degrees of engine use in sections

| Тип расчета | Затраты энергии на движение, Дж / Потери энергии ТЭД, Дж |
|--|---|
| Раздельное варьирование 200 поколений, 100 особей, затем 1000 поколений, 100 особей | 4965622 / 1331346 |
| Совместное варьирование 200 поколений, 100 особей | 5036834 / 1406883 |
| Совместное варьирование 500 поколений, 100 особей | 5010865 / 1380139 |
| Совместное варьирование 1000 поколений, 100 особей | 5017059 / 1385482 |

Таким образом, в данном исследовании использовать одновременное варьирование параметров V_k и h_k нецелесообразно. На рис. 11 представлены полученные для КМ варианта II скорости на участках. Можно заметить затрудненный набор скорости машиной, особенно на участках 90-120, где на трассе имеется подъем. Причина в том, что тяговые электродвига-

тели в этом заезде значительную часть времени работают на внешней характеристике, тем не менее, заданное время движения по маршруту обеспечено.

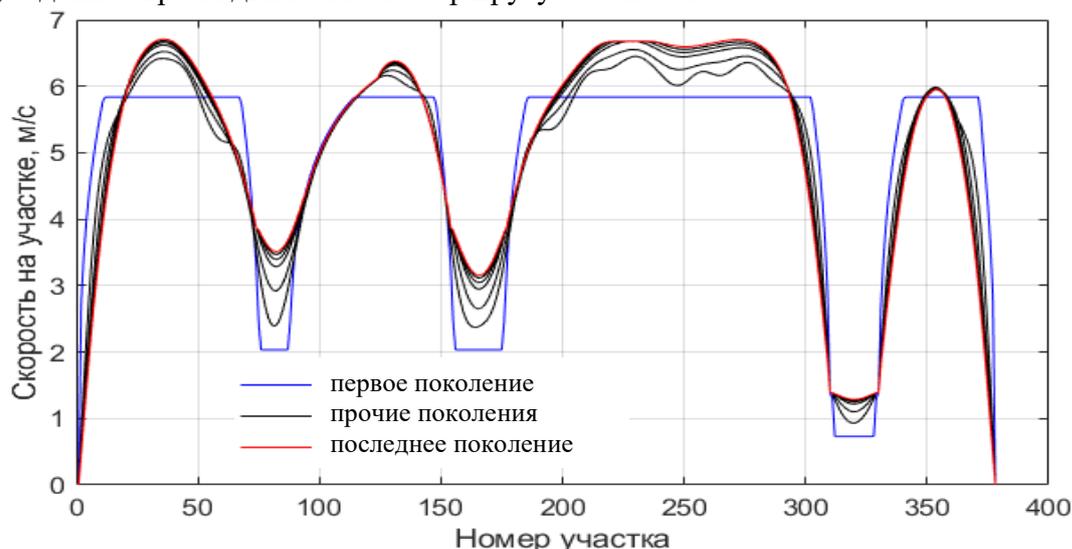


Рис. 11. Лучшие представители каждого десятого поколения при оптимизации прохождения по маршруту машины с двумя тяговыми двигателями (варианта II)

Fig. 11. The best representatives of every tenth generation when optimizing the route of a vehicle with two traction motors (option II)

Оптимизация коэффициента распределения тяги между МП и БП в целом показывает стремление коэффициента h_k к значению 0,85 (т.е. приоритетное использование МП) с ожидаемым увеличением использования БП (уменьшением h_k) при больших скоростях движения (рис. 12).

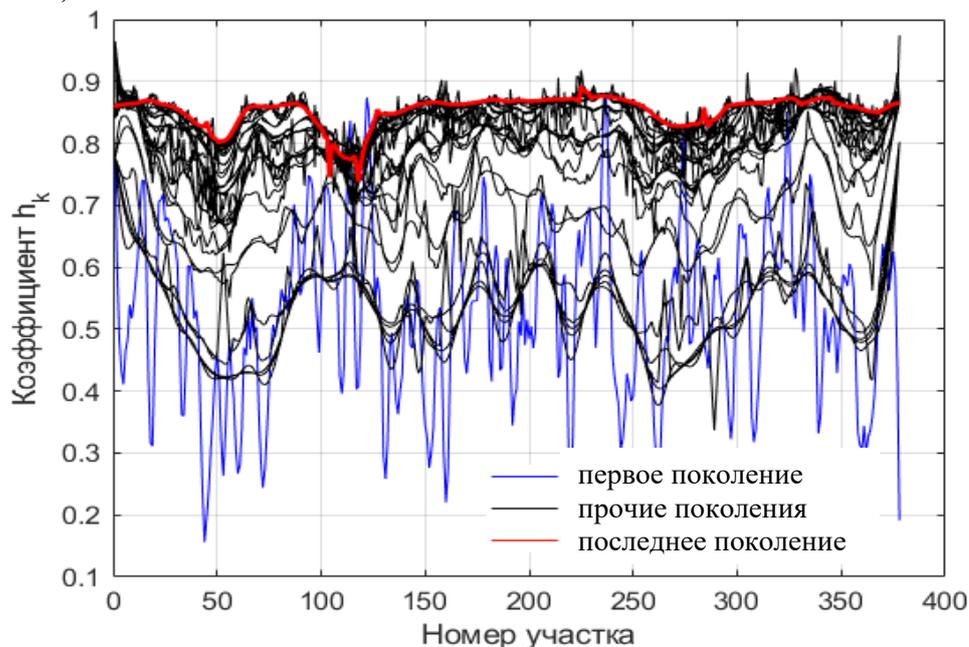


Рис. 12. Лучшие представители каждого десятого поколения оптимизации коэффициента распределения тяги между МП и БП при прохождении по маршруту машины с двумя тяговыми двигателями (варианта II)

Fig. 12. The best representatives of every tenth generation of optimization of the coefficient of traction distribution between the torque drive and the high-speed drive when driving along the route of a machine with two traction motors (variant II)

По рис. 13 можно отметить, что электродвигатели в данном заезде больше работают в зоне с меньшим значением КПД по сравнению с рис. 9.

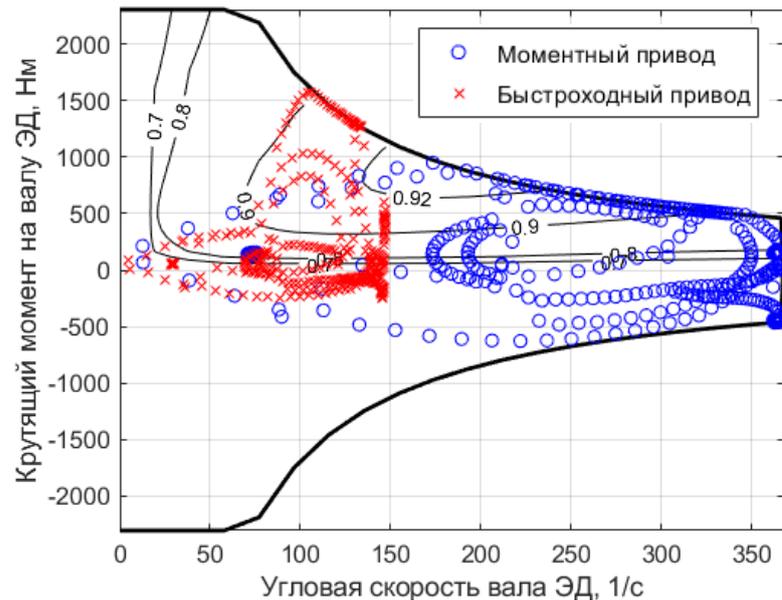


Рис. 13. Внешняя скоростная характеристика тягового электродвигателя и его режимы работы при движении по трассе машины с двумя тяговыми двигателями (варианта II)

Fig. 13. External speed characteristics of the traction electric motor and its operating modes when a wheeled vehicle with two traction motors driving on the track (option II)

В результате первого этапа (оптимизация скорости на маршруте) получено, что суммарные потери в электродвигателях составили $1,39 \cdot 10^6$ Дж. После второго этапа оптимизации (коэффициента распределения тяги между МП и БП) $1,32 \cdot 10^6$ Дж. Потери в данном случае были несколько больше, чем в случае беспилотной машины варианта I ($1,29 \cdot 10^6$ Дж). Это связано с высокой загруженностью тяговых электродвигателей и, соответственно, с необходимостью их эксплуатации в неэффективном режиме для обеспечения заданной средней скорости. Однако необходимо учитывать преимущество машины варианта II, которое состоит в использовании электродвигателей меньшего размера и массы. В случае увеличения требуемого времени прохождения маршрута появляется возможность повышения энергоэффективности движения КМ за счет оптимизации коэффициента h_k , а также благодаря использованию электродвигателей меньшей мощности. В табл. 3 представлены обобщенные результаты определения законов оптимального управления для обоих вариантов БКМ и разного времени прохождения маршрута в прямом направлении.

Таблица 3.

Энергия потерь в тяговых электродвигателях при движении по маршруту в прямом направлении с полной загрузкой колесной машины

Table 3.

Energy losses in traction motors when moving along a route in the forward direction with a fully loaded wheeled vehicle

| Энергия потерь в электромашинах, МДж | Время на маршруте, с | | | | |
|---------------------------------------|----------------------|------|------|------|------|
| | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| Вариант I | 1,29 | 1,18 | 1,34 | 1,55 | 1,74 |
| Вариант II, оптимизация V_k | 1,39 | 1,14 | 1,18 | 1,28 | 1,39 |
| Вариант II, оптимизация V_k и h_k | 1,32 | 1,05 | 1,06 | 1,13 | 1,23 |
| Преимущество Вар II перед Вар I, % | -2,3 | 11 | 20,9 | 27,1 | 29,3 |

Проведено исследование заездов БКМ в обратном направлении без груза (табл. 4).

Таблица 4.

Энергия потерь в тяговых электродвигателях при движении по маршруту в обратном направлении без груза

Table 4.

Energy losses in traction motors when moving along the route in the opposite direction without load

| Энергия потерь в электромашинах, МДж | Время на маршруте, с | | | | |
|---------------------------------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| Вариант I | 0,94 | 0,950 | 1,08 | 1,25 | 1,43 |
| Вариант II, оптимизация V_k | 1,11 | 0,914 | 0,915 | 0,981 | 1,06 |
| Вариант II, оптимизация V_k и h_k | 1,08 | 0,882 | 0,877 | 0,934 | 1,00 |
| Преимущество Вар II перед Вар I, % | -14,9 | 7,2 | 18,8 | 25,3 | 30,1 |

Представленные результаты позволяют заключить, что по мере снижения нагрузки на тяговые электромашины (большее время на маршруте – меньше средняя скорость), энергия потерь БКМ с двумя электродвигателями (вариант II) становятся меньше, чем у БКМ с одним электродвигателем (вариант I). Также при снижении скорости растет эффект от дополнительной оптимизации по коэффициенту h_k , определяющему вклад крутящего момента электродвигателей быстроходного и моментного привода. При этом в обоих вариантах БКМ по мере роста времени на маршруте общие потери в электродвигателях вначале падают, а затем начинают повышаться. Это связано с тем, что принятая характеристика эффективности электродвигателей обладает наибольшим значением КПД в районе центра характеристики (в номинальном режиме работы).

В ходе исследования движения КМ по выбранному маршруту также установлено:

- по потерям энергии КМ варианта II (с двумя ТЭД) имеет преимущество в тех случаях, когда не требуется длительная работа тяговых электродвигателей на внешней характеристике и есть возможность «управлять» их тягой, т.е. при длительном/среднем заданном времени прохождения маршрута (до 25-30 % при сравнении вариантов I и II с учетом оптимизации по h_k);
- в случае высокой загруженности электродвигателей, при малом заданном времени на маршруте, более эффективной является КМ варианта I (от 2 до 15 % при сравнении вариантов I и II с учетом оптимизации по h_k);
- во всех проведенных заездах наблюдается заметный эффект от применения оптимизации по степени загрузки электродвигателей моментного и быстроходного привода (от 3 до 12 % при сравнении варианта II без оптимизации по h_k и варианта II с оптимизацией по h_k), что подтверждает эффективность разработанного метода.

Заключение

В работе использовался разработанный авторами ранее метод определения оптимального закона движения беспилотной колесной машины (БКМ) по заданному маршруту, основанный на применении генетического алгоритма. Применение в составе трансмиссии двух ТЭД в совокупности с редукторами, имеющими разное передаточное отношение (БКМ вариант II), позволяет использовать электродвигатели со значительно меньшей суммарной мощностью (до 43 %), чем в случае попытки обеспечить диапазон трансмиссии машины одним электродвигателем (БКМ вариант I). Это позволяет обеспечить меньшие массу, габаритные размеры и стоимость электропривода БКМ варианта II. При этом для повышения энергоэф-

фактивности следует использовать получаемый при помощи разработанного метода закон управления моментным и быстроходным приводом, т.е. оптимизировать не только скорость движения на маршруте, но и коэффициент распределения тяги между двигателями h_k . Наилучшие результаты (т.е. наименьшие потери энергии) удастся получить в тех случаях, когда не требуется длительная работа тяговых электродвигателей на внешней характеристике и есть возможность «управлять» их тягой.

Библиографический список

1. **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. Стадучин // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023. № 3. С. 116-130.
2. **Hellström, T.** Path planning for off-road vehicles with a simulator-in-the-loop. Electronic resource URL: 2023. https://www.researchgate.net/publication/268426994_Path_planning_for_off-road_vehicles_with_a_simulator-in-the-loop (дата обращения: 06.06.2023).
3. **Chang, C.S., Sim, S.S.** Optimising train movements through coast control using genetic algorithms// IEE Proceedings-Electric Power Applications. 1997. №144. P. 65-73.
4. 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.
5. **Dzupire N.** A Multi-Stage Supply Chain Network Optimization Using Genetic Algorithms / N. Ch. Dzupire, Y. Nkansah-Gyekye // Mathematical Theory and Modeling. 2014. Vol. 4, № 8.
6. **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, 35(8), 2011. Pp. 3905-3917.
7. **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. Стадучин, К.С. Балковский // Известия МГТУ «МАМИ». 2020. Вып. № 2 (44). С. 58-67.
8. **Карташов, А.Б.** Метод определения энергоэффективного закона движения карьерного автосамосвала / А.Б. Карташов, Б.Б. Косицын, Г.О. Котиев, Д.М. Дубинкин, С.В. Назаренко // Горное оборудование и электромеханика, 2020. № 3 (148). С. 11-24. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-3-11-24
9. **Косицын, Б.Б.** Научные методы повышения подвижности боевых колесных машин путем совершенствования тормозных свойств: Дисс. ... докт. техн. наук. – М.: МГТУ, 2021. – 280 с.

*Дата поступления
в редакцию: 19.07.2023*

*Дата принятия
к публикации: 10.10.2023*