

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-106-118

Шабанов Д.В.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

*E-mail: shabanov_dv@internet.ru

ЭФФЕКТИВНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯГОВЫХ СИЛ МЕЖДУ РОБОТАМИ ПРИ ГРУППОВОЙ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ГРУЗА

Аннотация. В задаче коллективного перемещения груза колесными роботами имеется кинематическая избыточность приводов, что позволяет распределять тяговые силы без изменения траектории и скорости движения системы. Благодаря этому возможно задать дополнительные критерии качества движения, которые должна стремиться выполнить система управления при распределении тяговых сил. Также, эффективное распределение позволит роботам перемещаться с большей скоростью без возникновения проскальзывания колес, чем при классических подходах к управлению.

Роботы и груз, объединенные в одну систему механически и информационно, образуют транспортную ячейку переменной конфигурации (ТЯПК). Рассматриваются следующие критерии качества движения: отсутствие проскальзывания колес, поддержание заданной скорости, отсутствие мягких ударов, минимизация работы в генераторном режиме, соблюдение желаемых конечных зарядов аккумуляторов роботов после прохождения маршрута. Предложенные алгоритмы эффективного распределения тяговых сил основаны на поиске локального минимума и на принципе обучения Хебба.

Проведены тесты в среде Simulink с использованием динамической математической модели ТЯПК. В рассматриваемом частном случае новые алгоритмы распределения позволили увеличить максимальную допустимую скорость вхождения в поворот на 27 % в сравнении с классическими подходами к управлению. При движении с меньшей скоростью новые алгоритмы распределения показали положительные результаты по дополнительным критериям качества движения.

Изложенный материал также может быть применен к многоколесным роботам с поворачиваемыми приводными колесами.

Ключевые слова: колесный робот, мобильный робот, поперечные силы колес, распределение моментов, тяговые силы, многоколесный транспорт.

Введение. В мобильной робототехнике существуют задачи перемещения груза с использованием кинематически избыточного количества приводов. К ним относятся задачи управления многоколесными транспортными системами [1, 2], задачи коллективного и мультиагентного перемещения груза [3, 4]. При разработке систем управления принимается некое правило распределения моментов между приводами, позволяющее избавиться от избыточности и свести задачу к соблюдению заданных траектории и скорости движения. Чаще всего либо применяется равное распределение моментов (например, в работе [5]), либо используется кинематический подход, при котором каждый из приводов стремится поддерживать необходимую скорость вращения колеса, используя ПИД-регулятор, как это делается для двухколесных роботов [6]. Таким же образом определяются начальные значения моментов в работе [7] для последующей корректировки регулятором с нечеткой логикой.

Однако, существуют алгоритмы распределения нагрузки между агентами или приводами, позволяющие использовать избыточность приводов для повышения качества транспортировки. При коллективном перемещении груза роботами

без жесткой связи сила может распределяться так, чтобы груз гарантированно не съехал с них [8]. Существует схожая задача распределения моментов между приводами электромобилей. Распределение моментов может быть реализовано исходя из энергоэффективности [9, 10], пропорционально вертикальной нагрузке [11], или исходя из комбинации критериев (энергоэффективность, опасность проскальзывания колес, положение педали газа и радиус поворота) [12]. Существующие алгоритмы, используемые в электромобилях, неприменимы к колесным роботам, так имеются различия в кинематике, скорости движения, маневренности и инерционных характеристиках.

В работе рассматривается транспортная ячейка переменной конфигурации (ТЯПК) [13]. Она состоит из платформы с грузом и группы роботов, выполняющих функцию тягачей (рис. 1, а). Роботы могут поворачиваться вокруг оси стыковочного узла, чтобы занять правильное угловое положение, и создавать тяговые силы для передвижения платформы. Также, стыковочный узел позволяет передавать вертикальную нагрузку на робота для лучшего сцепления приводных колес с полом. С точки зрения динамики

такая система аналогична многоколесному роботу с поворотными приводными колесами (рис. 1, б). Количество и расположение роботов (ко-

лес) может быть произвольным и зависит от параметров груза и характера траектории движения.

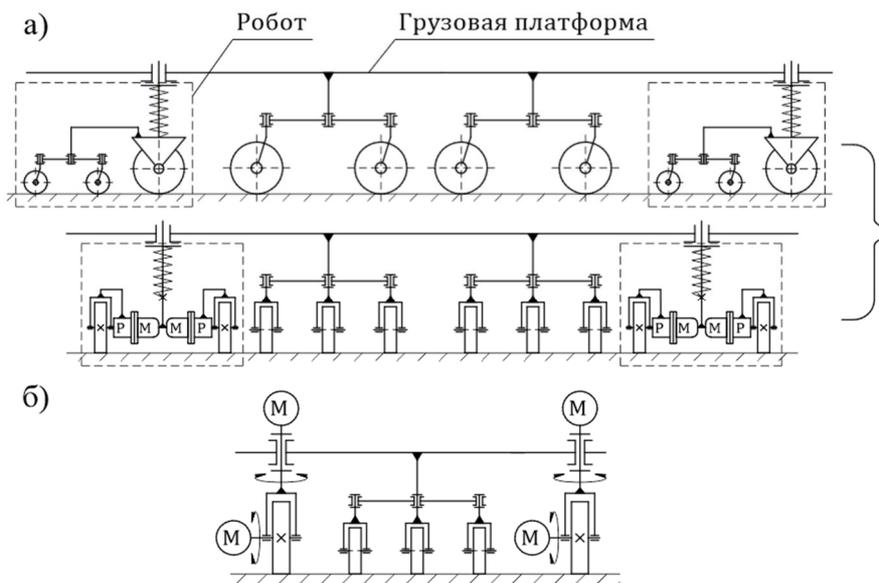


Рис. 1. Транспортная ячейка переменной конфигурации: а – полное представление; б – упрощенное представление

Система управления ТЯПК (рис. 2) построена таким образом, что направление движения задается исключительно поворотом роботов на необходимый угол α_i , а соблюдение скорости движения обеспечивается регулятором кинетической энергии. Величина T_{ICR}^* , вычисляемая блоком контроля скорости, является желаемым суммарным моментом, который должны создать

приводы относительно мгновенного центра скоростей (МЦС) ячейки. Момент T_{ICR}^* может быть получен различными комбинациями линейных сил F_i , создаваемых роботами:

$$\sum r_{ICRi} F_i = T_{ICR}^* \tag{1}$$

где r_{ICRi} – расстояние от МЦС до i -го робота.

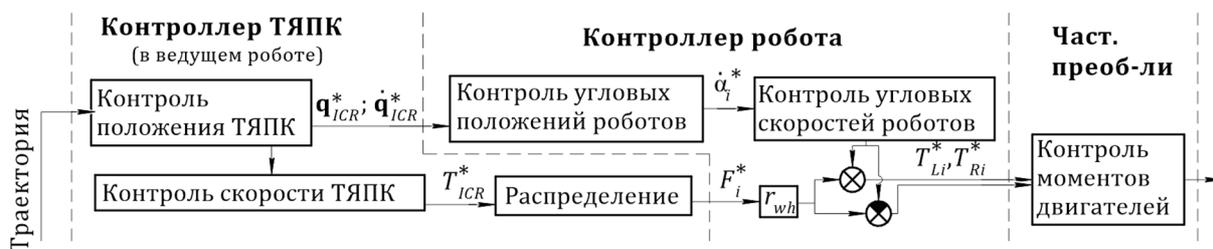


Рис. 2. Структура системы управления ТЯПК

Таким образом, имеется одно уравнение (1) и n неизвестных сил F_i (n – количество роботов), что позволяет задаться некоторыми дополнительными уравнениями, способствующими повышению эффективности работы системы.

Целью данной работы является создание алгоритма распределения тяговых сил между роботами, позволяющего увеличить скорость транспортировки груза без проскальзывания колес, и учитывающего дополнительные критерии качества транспортировки груза.

Критерии качества движения. Для оценки эффективности алгоритмов распределения используются следующие критерии в порядке приоритета:

- 1) отсутствие проскальзывания колес;
- 2) отсутствие мягких ударов;
- 3) соблюдение заданной законом движения скорости движения;
- 4) минимизация работы роботов в генераторном режиме;
- 5) стремление уровней заряда аккумуляторов роботов к желаемым.

Поскольку критерии 1-4 также актуальны и для многоколесных роботов со схожей кинематикой (например, [14-16]), ТЯПК будет рассматриваться как эквивалентный робот (рис. 1, б). Каждый тяговый робот, входящий в состав ТЯПК, условно заменяется колесом, способным поворачиваться на заданный угол, и создавать заданную

тяговую силу F_i (рис. 3). Критерий, связанный с желаемым уровнем заряда роботов, актуален только для ТЯПК, поэтому в рамках него нет

условной замены тяговых роботов на приводные колеса.

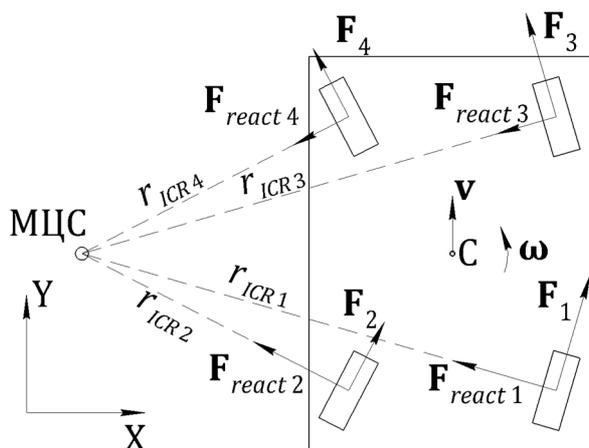


Рис. 3. Векторы сил и скоростей

Принимается, что максимальная сила трения скольжения между колесом и полом не превышает максимальную тяговую силу F_i , которую может создать привод. Следовательно, ограничение момента привода не учитывается.

Отсутствие проскальзывания колес определяется выражением

$$F_{fri} < (F_{zi} + m_r g) \mu = F_{max}, \quad (2)$$

где F_{fri} – сила трения скольжения между колесом номер i и полом; F_{zi} – сила прижатия колеса к полу узлом сцепки; m_r – собственная масса привода (робота); μ – коэффициент трения скольжения покоя между колесом и полом; F_{max} – максимальная допустимая величина силы трения скольжения.

В рамках работы рассматривается частный случай, в котором величина F_{zi} одинакова для всех колес, что позволяет оперировать только значением F_{max} . Численной характеристикой качества работы алгоритма является величина Q_{fr} , определяющаяся как максимальная величина линейной скорости робота v , при которой не возникает проскальзывания колес.

Мягким ударом считаем превышение производной силы некоего порогового значения J_{max} :

$$\frac{dF_i(t)}{dt} \leq J_{max}. \quad (3)$$

Для оценки качества движения по этому критерию используется величина Q_{hit} :

$$Q_{hit} = \sum \int_0^{t_1} J_{hi}(t) dt; \quad (4)$$

$$J_{hi}(t) = \begin{cases} 0; & \left| \frac{dF_i(t)}{dt} \right| \leq J_{max} \\ \left| \frac{dF_i(t)}{dt} \right| - J_{max}; & \left| \frac{dF_i(t)}{dt} \right| > J_{max} \end{cases}, \quad (5)$$

где t_1 – время перемещения груза; J_{hi} – превышение $dF_i(t)/dt$ сверх желаемого предельного уровня.

Для соблюдения заданной скорости транспортировки достаточно выполнение равенства (1). Величина T_{ICR} задается контуром регулирования кинетической энергии, что подробно описано в работе [13]. Для этого критерия не используется численный показатель. В процессе определения величины Q_{fr} проверяется, что отклонение скорости движения от заданной не должно превышать 5%.

Критерий минимизации работы в генераторном режиме необходим для снижения энергозатрат системы, не способной рекуперировать энергию. Для численного сравнения определяется количество энергии, рассеянной в тепло при торможении:

$$Q_{gen} = \sum \int_0^{t_1} r_{ICRi}(t) F_{negi}(t) |\omega(t)| dt; \quad (6)$$

$$F_{negi}(t) = \begin{cases} 0; & F_i(t) > 0 \\ -F_i(t); & F_i(t) \leq 0 \end{cases}, \quad (7)$$

где F_{negi} – линейная сила, создаваемая приводным колесом в направлении, противоположном направлению движения; ω – скорость вращения робота вокруг МЦС. Скалярное значение силы F_i считается положительным, если сила направлена в сторону движения робота.

Контроль уровней заряда аккумуляторов роботов уделяется мало внимания в научной литературе. В случае непредвиденного неравномерного использования роботов может появиться необходимость в их экстренной замене [17], что требует большего времени на транспортировку и использование дополнительных роботов. Этого можно избежать, если централизованная логистическая система управления будет определять желаемые конечные уровни заряда, а системы управления роботов будут стремиться выполнять это. При этом централизованная логистическая система должна оценивать риск разряда аккумулятора робота [18], на основе чего принимать решение, стоит ли его использовать в следующем перемещении груза.

Необходимость распределения сил, исходя из уровней заряда аккумуляторов, демонстрируется следующим примером (рис. 4). Необходимо выполнить перемещение грузов 1 и 2 с помощью шести и трех роботов соответственно. В первом

случае (рис. 4, б) роботы имеют равный, “средний” уровень заряда аккумуляторов после перемещения груза 1. Поскольку этого недостаточно для перемещения груза 2, они отправляются на зарядную станцию, а транспортировка груза 2 выполняется другими роботами.

В другом случае (рис. 4, в) роботы разрядились неравномерно в процессе транспортировки груза 1. Три робота имеют минимальный необходимый заряд аккумуляторов и будут отправлены на зарядную станцию. Другие три робота имеют заряд аккумуляторов достаточный для транспортировки груза 2, что позволяет использовать оставшиеся на зарядной станции роботы для выполнения других задач. Приведенный пример является лишь частным случаем, демонстрирующим влияние уровней заряда аккумуляторов на логистику транспортной системы. Возможность планировать потребление энергии аккумулятора позволит максимально эффективно использовать транспортную систему.

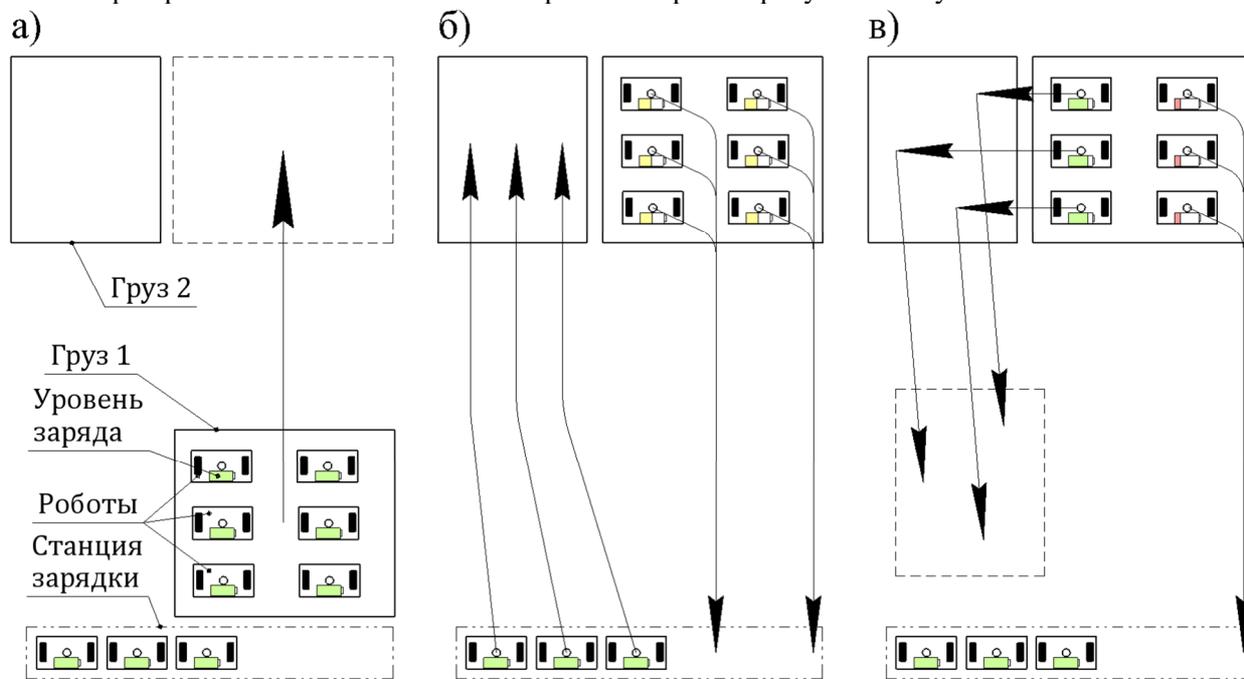


Рис. 4. Задача перемещения двух грузов:

- а) начальное состояние; б) последствия равномерного использования зарядов аккумуляторов роботов;
- в) эффективность неравномерного использования зарядов аккумуляторов роботов

Качество движения по этому критерию оценивается разностью итоговых фактических и желаемых уровней заряда аккумуляторов, приведенных к количеству механической энергии:

$$Q_{en} = \sum |E_i - E_i^*|, \quad (8)$$

где E_i – фактический уровень заряда аккумулятора робота в конце маршрута, приведенный к Дж; E_i^* – желаемый уровень заряда в конце маршрута, приведенный к Дж.

Зависимость силы трения от тяговых сил.

Для соблюдения неравенства (2) необходимо учитывать взаимосвязь силы трения $F_{fr i}$, действующей на каждое из колес и сил F_j , создаваемых каждым приводом. При отсутствии проскальзывания вектор $F_{fr i}$ можно разложить на поперечную составляющую $F_{react i}$ и на продольную, равную и сонаправленную F_i (рис. 3):

$$F_{fr i} = F_i + F_{react i}. \quad (9)$$

Из результатов, полученных в работе [19], возможно определить зависимость $F_{react\ i}$ от F_j :

$$F_{react\ i} = F_{0i} + \sum_{j=1}^n G_{ij} F_j, \quad (10)$$

где F_{0i} – составляющая поперечной реакции колеса, не зависящая от величин F_j ; G_{ij} – двумерный вектор, содержащий коэффициенты для определения силы реакции колеса, вызванной силой F_j . Матрица G имеет размерность $n \times n \times 2$.

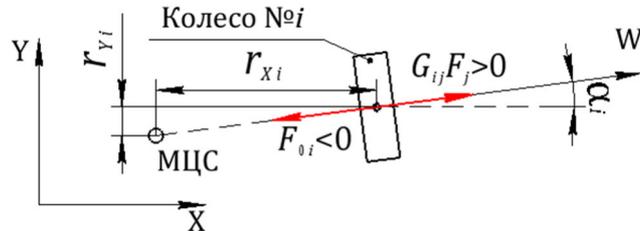


Рис. 5. Положение колеса в плоскости и направление оси W_i

Равенство (9) в скалярном виде:

$$F_{fr\ i}^2 = F_i^2 + F_{react\ i}^2 = F_i^2 + (F_{0i} + \sum_{j=1}^n G_{ij} F_j)^2. \quad (12)$$

$$2F_{fr\ i} \frac{dF_{fr\ i}}{dt} = 2F_i \frac{dF_i}{dt} + 2 \left(F_{0i} + \sum_{j=1}^n G_{ij} F_j \right) \left(\frac{dF_{0i}}{dt} + \sum_{j=1}^n \frac{dG_{ij}}{dt} F_j + \sum_{j=1}^n G_{ij} \frac{dF_j}{dt} \right). \quad (13)$$

Все величины, используемые в (13), кроме dF_i/dt и $dF_{fr\ i}/dt$, вычисляются по значениям с датчиков обратной связи и математической модели. В том числе, производные G_{ij} и F_{0i} вычисляются исключительно в численном виде.

Составление линейных уравнений. Составим линейные уравнения, соответствующие критериям, в общем виде:

$$A(t) J^*(t) = C(t), \quad (14)$$

$$J_j(t) = \frac{dF_j(t)}{dt}, \quad (15)$$

где $J^*(t)$ – вектор-столбец, содержащий значения оптимальных, с точки зрения конкретного критерия, величин $dF_j(t)/dt$; $A(t)$ – вектор-строка коэффициентов; $C(t)$ – свободный член.

Индексом i обозначается номер колеса, относительно которого рассматривается критерий; индексом j – все приводные колеса, влияющие на выполнение критерия.

Для критерия отсутствия проскальзывания i -го колеса уравнение (13) приводится к виду (14), при этом $C(t)$ зависит от величины желаемого изменения силы трения $dF_{fr\ i}(t)/dt$. Поскольку этот

Векторы $F_{react\ i}$, G_{ij} и F_{0i} расположены на оси W_i , проходящей через ось вращения колеса в сторону увеличения координаты X (рис. 5). Коллинеарность векторов позволяет оперировать их скалярами $F_{react\ i}$, G_{ij} и F_{0i} . Знак скаляра принимается положительным, если вектор направлен в сторону увеличения X :

$$G_{ij} = |G_{ij}| \text{sign}(G_{ijX}); F_{0i} = |F_{0i}| \text{sign}(F_{0iX}). \quad (11)$$

Для избавления от нелинейности продифференцируем выражение (12):

критерий актуален только при опасном приближении $F_{fr\ i}$ к F_{max} , используется виртуальное реле, включение которого происходит при достижении значения $R_{fr1} \cdot F_{max}$, выключение – при достижении $R_{fr2} \cdot F_{max}$. При выключенном реле соответствующий критерий должен игнорироваться, при включенном реле значение желаемого $dF_{fr\ i}(t)/dt$ задается П-регулятором:

$$\frac{dF_{fr\ i}(t)}{dt} = k_{p,fr} (R_{fr2} F_{max} - F_{fr\ i}(t)). \quad (16)$$

П-регулятор и реле показаны на схеме (рис. 6). Для следующих критериев по аналогии будут использованы виртуальные реле и П-регуляторы для задания недостающих желаемых величин.

Критерий отсутствия проскальзывания колес задает n уравнений вида (14), некоторые из которых должны быть проигнорированы при отключенном виртуальном реле.

Для составления уравнения, соответствующего критерию поддержания заданной скорости, продифференцируем уравнение (1):

$$\sum r_{ICRj}(t) J_j^*(t) = \frac{d\Gamma_{ICR}(t)}{dt} - \sum \left(\frac{dr_{ICRj}(t)}{dt} F_j(t) \right). \quad (17)$$

Желаемое изменение момента относительно МЦС также зададим через обратную связь:

$$\frac{dT_{ICR}(t)^*}{dt} = k_{psp} (T_{ICR}^*(t) - T_{ICR}(t)). \quad (18)$$

Вычисление значения $T_{ICR}^*(t)$ описано в [13]. Критерий поддержания заданной скорости задает одно уравнение в общем виде.

Минимизация работы в генераторном режиме заключается в поддержании величины $F_i(t)$ в положительной области. Реализуется это аналогично с контролем отсутствия проскальзывания

колес – с помощью виртуального реле и П-регулятора (рис. 6). Пороги срабатывания выбраны равными $0,05F_{max}$ и $0,02F_{max}$.

$$A_i(t)J_i^*(t) = C_i(t) = k_{pgen} (0,05F_{max} - F_i(t)). \quad (19)$$

Аналогично критерию отсутствия проскальзывания колес, данный критерий задает n уравнений в общем виде, некоторые из которых должны быть проигнорированы при отключенном виртуальном реле. При этом A_i равно единице, остальные коэффициенты A равны нулю.

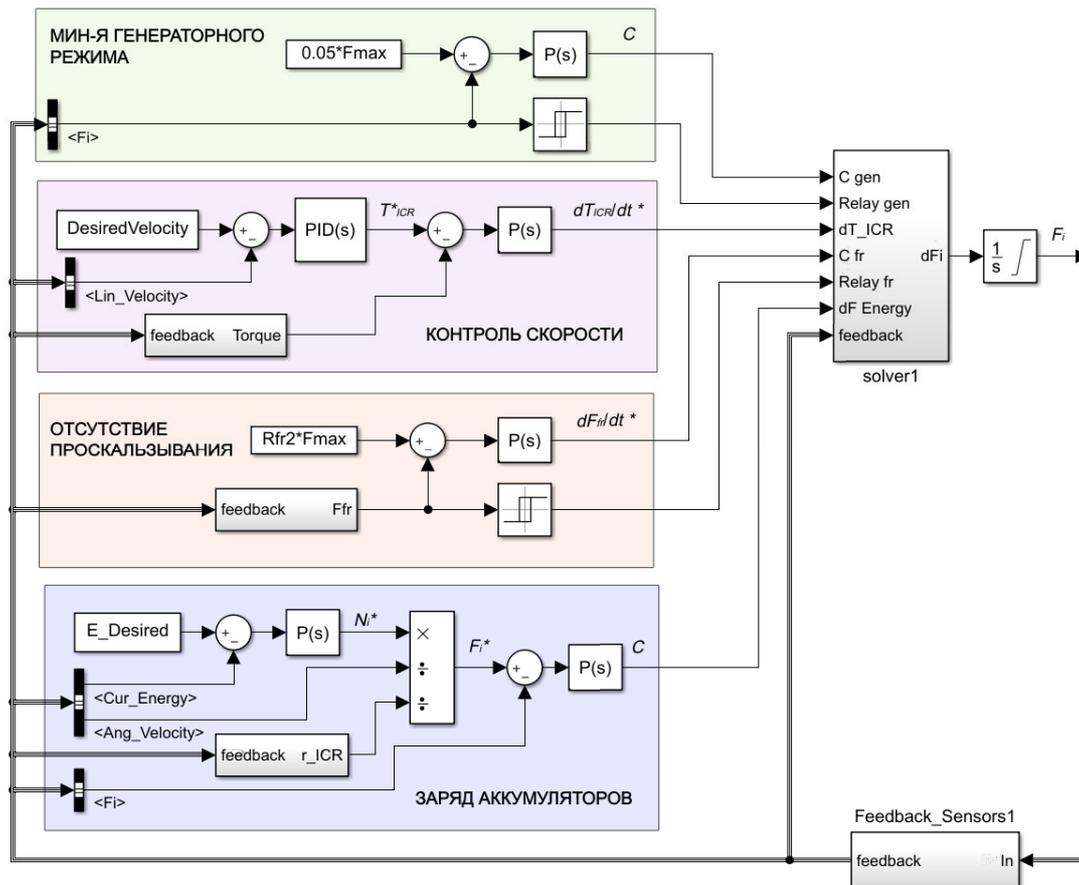


Рис. 6. Обратная связь и виртуальные реле

Стремление системы к желаемым уровням зарядов аккумуляторов роботов задается двухконтурной системой. Первый контур задает желаемую линейную силу F_i исходя из расхождения

желаемого и фактического уровней заряда роботов. Второй контур задает желаемое значение $J_i(t)$ исходя из разницы между желаемой величиной линейной силы и фактической (рис.7):

$$A_i(t)J_i^*(t) = C_i(t) = k_{pen2} \left(\frac{1}{r_{ICRi}(t)\omega(t)} k_{pen1} (E_i^* - E_i(t)) - F_i(t) \right). \quad (20)$$

Данный критерий добавляет n уравнений в общем виде. Поскольку он не зависит от линейных сил, создаваемых другими роботами, A_j равно нулю для всех j , кроме равного i .

Контроль мягких ударов зависит от способа определения конечного значения J_i , что подробнее описано в следующем разделе.

Распределение сил. В предыдущем разделе получены $3n+1$ уравнений, соответствующие обозначенным критериям, и содержащие n неизвестных. Алгоритмы распределения сил между приводами (роботами) должны задавать значения J_i^* , учитывая приоритетность уравнений и состояния виртуальных реле.

Первый алгоритм распределения заключается в поиске локального минимума заданной функции стоимости CF :

$$CF(\mathbf{J}^*) = \sum_{k=1}^{3n+1} Rel_k p_k (C_k - \mathbf{A}_k \mathbf{J}^*)^2 + \sum_{i=1}^n J_i^{*2}, \quad (21)$$

где k – номер уравнения из предыдущего раздела; \mathbf{A}_k и C_k – соответствующие величины из уравнения номер k , записанного в виде (14); Rel_k – значение активности виртуального реле (0 или 1), соответствующего уравнению k ; p_k – коэффициент приоритетности критерия.

Второе слагаемое выражения (21) нужно для ограничения мягких ударов.

Второй алгоритм распределения основан на принципе обучения Хебба [20]. Простейшая форма обучения Хебба для нейронных сетей имеет вид:

$$\Delta \omega_{kj}(n) = \eta \cdot y_k(n) \cdot x_j(n), \quad (22)$$

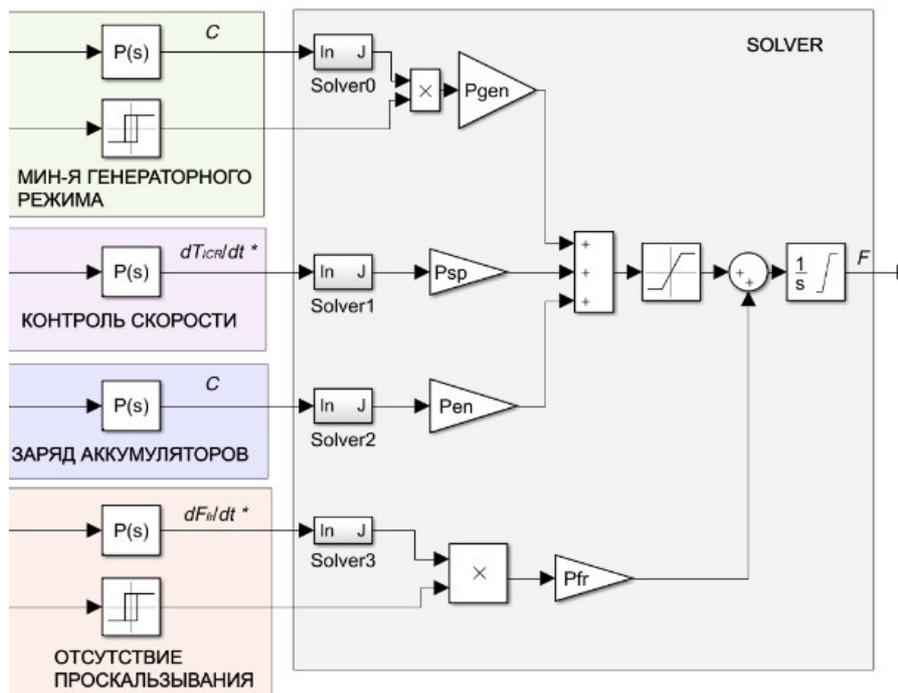


Рис. 7. Упрощенная структура системы распределения сил на основе принципа Хебба

Таким образом, чем больший вклад в достижение значения C_k может принести изменение силы F_i , тем больше она должна быть изменена. Коэффициенты A'_k нормированы таким образом, чтобы сумма их модулей равнялась 1.

$$J_i^* = Rel_k p_k C_k A'_{ki} = Rel_k p_k C_k \frac{A_{ki}}{\sum_{j=1}^n |A_{kj}|}, \quad (23)$$

$$\mathbf{J}^* = \frac{Rel_k p_k C_k}{\sum_{j=1}^n |A_{kj}|} \mathbf{A}_k. \quad (24)$$

где $\Delta \omega_{kj}$ – изменение синаптического веса; η – коэффициент скорости обучения; x_j и y_k – предсинаптический и постсинаптический сигналы, соответственно; n – номер шага итерационного процесса обучения.

Проведем аналогию между задачей распределения сил между приводами (роботами) и задачей обучения нейронной сети:

- аналогом синаптического веса является величина линейной силы F_i , создаваемой приводом;
- аналогом изменения синаптического веса является искомая величина J_i^* ;
- аналогом предсинаптического (входного) сигнала является нормированный коэффициент A'_{ki} ;
- аналогом постсинаптического (выходного) сигнала является значение C_k .

Для каждого уравнения существует свой набор \mathbf{J}^* . Результирующее, общее значение \mathbf{J}^* задается как их сумма:

$$\mathbf{J}^* = \sum_{k=1}^{3n+1} \frac{Rel_k p_k C_k}{\sum_{j=1}^n |A_{kj}|} \mathbf{A}_k. \quad (25)$$

Упрощенная структура системы распределения сил показана на рисунке 7. Стоит обратить внимание на то, что, несмотря на использование принципа обучения Хебба, в предложенном алгоритме не используется машинное обучение как таковое. Для минимизации мягких ударов ограничивается сумма слагаемых, не связанных с ограничениями проскальзывания.

Проверка алгоритмов в среде Simulink.

Системы распределения сил тестируются при движении четырехколесного робота (четыреагентной ТЯПК) по траектории, изображенной на рисунке 8, а. Траектория задана кривой

Безье четвертого порядка во избежание резких изменений скоростей и ускорений.

Расположение колес (роботов) относительно центра масс груза показано на рисунке 8, б. Для сравнения также рассматривается движение двухколесного робота (рис. 8, в).

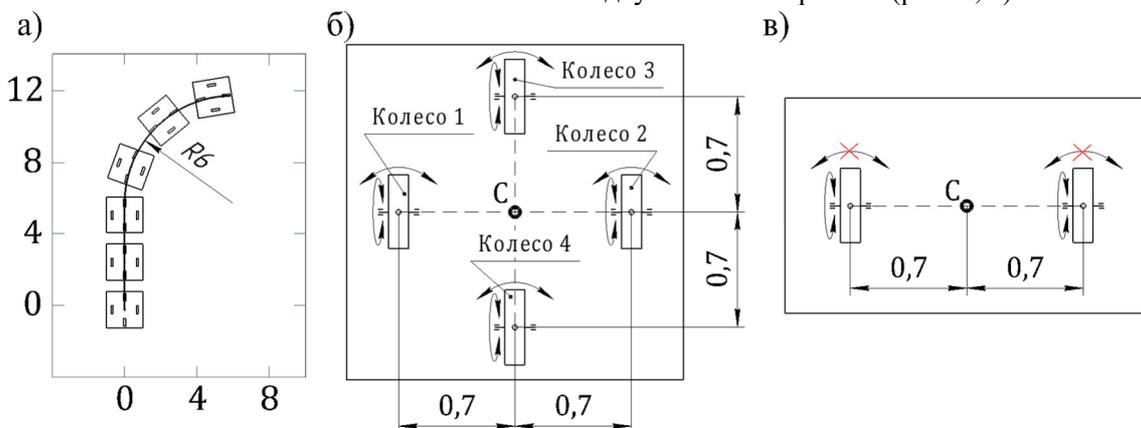


Рис. 8. Тестирование в Simulink: а) траектория движения; б) расположение приводных колес (роботов) относительно центра масс; в) расположение колес двухколесного робота

Параметры системы:

- масса груза и роботов: $m=1000$ кг;
- момент инерции груза и роботов относительно центра масс $I=1000$ кг·м²;
- приведенная сила сопротивления качению $F_{roll}=200$ Н;
- максимальная сила трения скольжения на колесе (роботе) $F_{max}=122$ Н;
- максимальная сила трения скольжения на колесе двухколесного робота $F_{max}=250$ Н;
- начальный уровень заряда каждого из роботов 2000 Дж;
- желаемые конечные уровни заряда роботов $[1700, 1000, 1700, 700]^T$ Дж.

С помощью симуляции оцениваются четыре алгоритма распределения сил: кинематический

подход, равное распределение (26), распределение с поиском локального минимума и распределение, основанное на принципе Хейбба (далее для краткости “распределение по Хейббу”). Кинематический подход подразумевает использование ПИД-регулятора для поддержания необходимой линейной скорости v_i движения каждого колеса (робота) (27). Кинематический подход рассматривается как для четырехколесной системы, так и для двухколесного робота. Поиск локального минимума реализован функцией `fminsearch`.

$$F_i = T_{ICR}^* / \sum r_{ICRj}, \quad (26)$$

$$F_i = k_p(v_i^* - v_i) + k_d \frac{d(v_i^* - v_i)}{dt} + k_i \int_0^t (v_i^* - v_i) dt. \quad (27)$$

Таблица 1

Показатели эффективности алгоритмов распределения сил

Алгоритм распределения	Максимальная скорость Q_{fr} , м/с	Мягкие удары Q_{hit} , Н	Работа в генераторном режиме Q_{gen} , Дж	Отклонение конечного уровня заряда Q_{en} , Дж
Кинематический подход (двухколесный робот)	1,22	393 (222)	14 (0)	-
Кинематический подход	1,1	0(0)	0 (0)	1908 (1908)
Равный момент	1,08	0(0)	0 (0)	1805 (1805)
Поиск лок. минимума	1,31	98(35)	0,5 (0,5)	1222 (650)
Распределение по Хейббу	1,4	264(12)	20,5 (0)	148 (86)

В таблице 1 представлены показатели эффективности, вычисленные согласно выражениям (4), (6) и (8). Главным показателем является максимальная скорость движения без возникно-

вения проскальзывания. Для объективного сравнения по показателям Q_{hit} , Q_{en} и Q_{gen} в скобках записаны результаты симуляций при движении со скоростью 1 м/с.

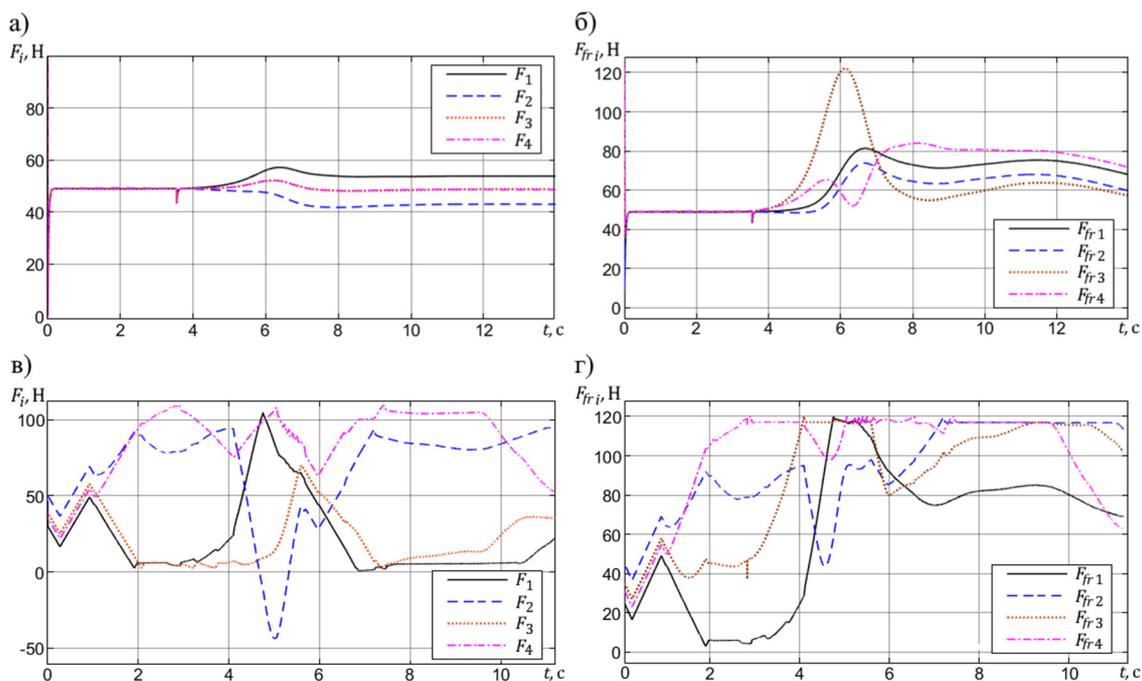


Рис. 9. Симуляция движения на максимальной скорости:

a – тяговые силы приводов (роботов) при кинематическом распределении; *б* – силы трения при кинематическом распределении; *в* – тяговые силы приводов (роботов) при распределении по Хейббу; *г* – силы трения при распределении по Хейббу

Как видно из результатов, новые алгоритмы распределения позволяют увеличить скорость движения системы и учитывают желаемые конечные уровни заряда аккумуляторов. Для примера сравним кинематическое распределение и распределение по Хейббу. Скорости движения - 1,1 м/с и 1,4 м/с соответственно. По графикам, соответствующим кинематическому распределению (рис. 9, а, рис. 9, б), видно, что сила трения колеса (робота) № 3 близка к критичной в момент вхождения в поворот. Силы трения других колес имеют достаточно большой запас, что демонстрирует низкую эффективность распределения,

так как для увеличения скорости движения достаточно увеличить момент другого колеса. В то же время, по графикам с распределением по Хейббу (рис. 9, в, рис. 9, г) видно, что силы трения всех четырех колес близки к граничному значению. Это свидетельствует об эффективном использовании возможностей системы. Предложенные алгоритмы распределения вызывают незначительные мягкие удары и работу в генераторном режиме, что вызвано стремлением системы выполнить требования других критериев.

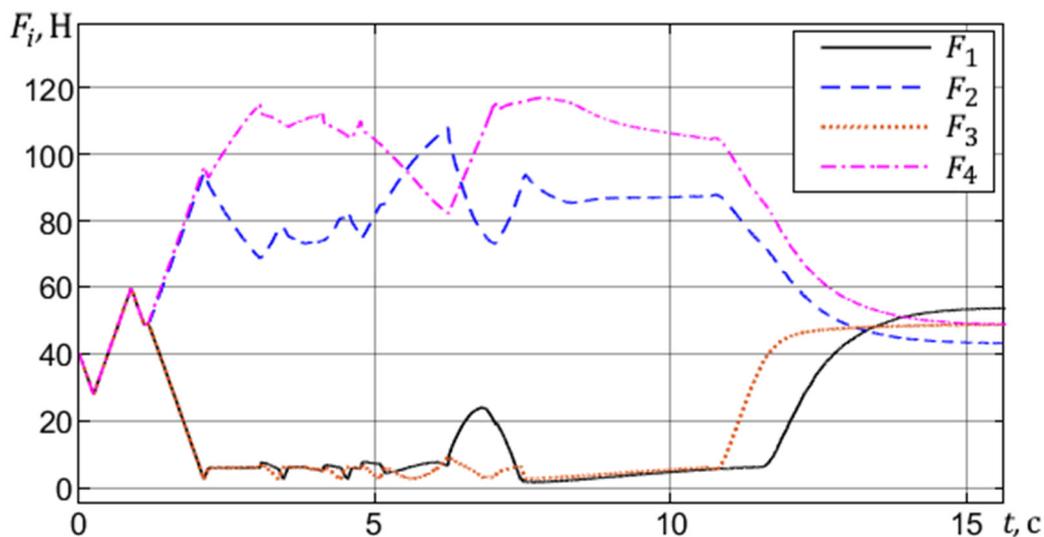


Рис. 10. Распределение тяговых сил приводов (роботов) по Хейббу при движении со скоростью 1 м/с

При движении со скоростью 1 м/с наилучшие результаты также показало распределение по Хеббу. По графику (рис. 10) видно, как учитываются менее приоритетные критерии, чем отсутствие проскальзывания колес: Робот 1 и робот 3 практически не используются в движении, так как уровень заряда их аккумуляторов изначально близок к желаемому; скачки тяговых сил этих роботов в зоне, близкой к нулю, вызваны срабатываем реле для минимизации работы в генераторном режиме; резкие изменения сил F_i отсутствуют для исключения мягких ударов.

Также стоит отметить, что при задании требуемой скорости в диапазоне от 1,4 до 1,5 м/с распределение по Хеббу снизит текущую скорость движения до 1,4 м/с на опасном участке во избежание проскальзывания колес, что значительно повышает безопасность использования системы в случае неверно заданной скорости движения.

Заключение. В результате работы определены критерии эффективности использования роботов в системе ТЯПК: отсутствие проскальзывания колес, отсутствие мягких ударов, поддержание заданной скорости движения, минимизация работы в генераторном режиме, стремление к желаемому конечному уровню заряда аккумуляторов. Предложены два новых алгоритма распределения тяговых сил между роботами и проведено сравнение их эффективности с классическими алгоритмами для частного случая.

По всем критериям алгоритм, основанный на принципе Хебба, показал лучшие результаты: максимальная допустимая скорость выше на 27 %, чем при кинематическом распределении, практически достигнуто желаемое значение уровня заряда аккумуляторов, отсутствует работа в генераторном режиме. Также, этот алгоритм способен снижать скорость движения системы на опасных участках траектории.

Однако, для полноценного сравнения необходим глубокий математический анализ и большое количество экспериментов, так как эффективность распределения зависит от используемых при настройке коэффициентов, траектории движения и параметров системы.

Предложенные алгоритмы также возможно использовать для построения систем управления многоколесных роботов и другого оборудования с кинематически избыточным количеством приводов.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации программы «Приоритет 2030», стратегический проект «Человекоцентричные технологии и решения».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dziomin U., Kabysch A., Golovko V., Stetter, R. A multi-agent reinforcement learning approach for the efficient control of mobile robot // IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS). 2013. Vol. 2. Pp. 867-873. DOI:10.1109/IDAACS.2013.6663051.
2. Stetter R., Ziemniak P., Paczynski A. Development, realization and control of a mobile robot // International Conference on Research and Education in Robotics, EUROBOT 2010. 2011. Vol. 156. Pp. 130–140. DOI:10.1007/978-3-642-27272-1_12.
3. Tallamraju R., Verma P., Sripada V., Agrawal S., Karlapalem K. Energy Conscious Over-actuated Multi-Agent Payload Transport Robot: Simulations and Preliminary Physical Validation // 2019 28th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN). 2019. Pp. 1–7. DOI:10.1109/RO-MAN46459.2019.8956442.
4. Abbaspour A., Alipour K., Jafari H.Z., Moosavian S.A.A. Optimal formation and control of cooperative wheeled mobile robots // Comptes Rendus Mécanique. 2015. Vol. 343. No. 5–6. Pp. 307–321. DOI:10.1016/j.crme.2015.04.003.
5. Danapalasingam K.A. Electric vehicle traction control for optimal energy consumption // International Journal of Electric and Hybrid Vehicles. 2013. Vol. 5. No. 3. Pp. 233–252. DOI:10.1504/IJEHV.2013.057607.
6. Shijin C.S., Udayakumar K. Speed control of wheeled mobile robots using PID with dynamic and kinematic modelling // 2017 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS). 2017. Pp. 1–7. DOI:10.1109/ICIIECS.2017.8275962.
7. Wang Q.N., Zhai L., Wang J., Feng H. X. Study on acceleration slip regulation torque distribution control strategy for four in-wheel-motors electric vehicle steering // 2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). 2013. Pp. 3832–3837. DOI:10.1109/CCDC.2013.6561617.
8. Huzaefa F., Liu Y. C. Centralized control architecture for cooperative object transportation using multiple omnidirectional AGVs // 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2019. Pp. 6526–6532. DOI:10.1109/IROS40897.2019.8968499.
9. Dizqah A.M., Lenzo B., Sorniotti A., Gruber P., Fallah S., De Smet J. A fast and parametric torque distribution strategy for four-wheel-drive energy-efficient electric vehicles // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 63. No. 7. Pp. 4367–4376. DOI: 10.1109/TIE.2016.2540584.

10. Lin C., Xu Z. Wheel torque distribution of four-wheel-drive electric vehicles based on multi-objective optimization // *Energies*. 2015. Vol. 8. No. 5. Pp. 3815–3831. DOI:10.3390/en8053815.
11. Guodong Y., Chengjie Z., Ning Z. The torque distribution and anti-slip regulation control for two-wheel independent drive electric vehicle // 2016 Chinese control and decision conference (CCDC). 2016. Pp. 4444–4449. DOI:10.1109/CCDC.2016.7531785.
12. Park J., Jeong H., Jang I. G., Hwang S. H. Torque distribution algorithm for an independently driven electric vehicle using a fuzzy control method // *Energies*. 2015. Vol. 8. No. 8. Pp. 8537–8561. DOI:10.3390/en8088537.
13. Shabanov D., Kuanyshova A., Kim V., Pirogov N. Control system for a group of industrial mobile robots for moving large-sized objects // International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems". 2021. Vol. 2843. Art. No. 017.
14. Ishigami G., Pineda E., Overholt J., Hudas G., Iagnemma K. Design, Development, and Mobility Test of an Omnidirectional Mobile Robot for Rough Terrain // *Field and Service Robotics*. 2014. Pp. 599–611. DOI:10.1007/978-3-642-40686-7_40.
15. Moore K.L., Flann N.S. A six-wheeled omnidirectional autonomous mobile robot // *IEEE Control Systems Magazine*. 2000. Vol. 20. No. 6. Pp. 53–66. DOI:10.1109/37.887449.
16. Sorour M., Cherubini A., Fraisse P., Passama R. Motion discontinuity-robust controller for steerable mobile robots // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2016. Vol. 2. No. 2. Pp. 452–459. DOI:10.1109/LRA.2016.2638466.
17. Verma P., Tallamraju R., Rawat A., Chand S., Karlapalem K. Loosely coupled payload transport system with robot replacement // *Autonomous Robots and Multirobot Systems*. 2019. DOI:10.48550/arXiv.1904.03049.
18. Berenz V., Tanaka F., Suzuki K. Autonomous battery management for mobile robots based on risk and gain assessment // *Artificial Intelligence Review*. 2012. Vol. 37. No. 3. Pp. 217–237. DOI:10.1007/s10462-011-9227-9.
19. Шабанов Д.В., Волков А.Н., Чеусова А.И., Кочнева О.В. Определение поперечных сил, действующих на колеса транспортной роботизированной системы // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2022. № 12. С. 114–123. DOI:10.34031/2071-7318-2022-7-12-114-123.
20. Hebb D.O. *The Organization of Behavior*. New York, 1949. 335 p.

Информация об авторах

Шабанов Дмитрий Вячеславович, ассистент «Высшей Школы Автоматизации и Робототехники». E-mail: shabanov_dv@internet.ru. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29.

Поступила 18.01.2022 г.

© Шабанов Д.В., 2023

Shabanov D.V.

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

E-mail: shabanov_dv@internet.ru

EFFICIENT DISTRIBUTION OF TRACTION FORCES BETWEEN ROBOTS DURING COOPERATIVE CARGO TRANSPORTATION

Abstract. *The task of collective movement of load by wheeled robots has kinematic redundancy of drives. It allows distributing traction forces without changing the trajectory and velocity of the system. In this way, it is possible to define additional traffic quality criteria which the traction control system should strive to achieve. In addition, efficient distribution will allow the robots to move without wheel slip at a higher speed than classical control methods. Robots and cargo combined into one system mechanically and informationally, form a variable configuration transport cell (VCTC). The following transportation quality criteria are considered: no wheel slippage, maintaining a given speed, no soft bumps, minimizing work in the generator mode, maintaining the desired final charge levels of the robot batteries after transportation. The proposed methods for the efficient distribution of traction forces are based on the finding local minimum and on the Hebbian learning principle. Tests are carried out in the Simulink using the dynamic mathematical model of the VCTC. In the case under consideration, new distribution methods made it possible to increase the maximum allowable turn entry speed by 27% compared with classical control approaches. At a lower speed new method of distribution showed good results on additional transportation quality criteria. The presented material can also be used for multi-wheeled robots with steerable drive wheels.*

Keywords: *wheeled robot, mobile robot, lateral wheel force, torque distribution, traction forces, multi-wheel vehicle.*

REFERENCES

1. Dziomin U., Kabysch A., Golovko V., Stetter, R. A multi-agent reinforcement learning approach for the efficient control of mobile robot. IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS). 2013. Vol. 2. Pp. 867–873. DOI:10.1109/IDAACS.2013.6663051.
2. Stetter R., Ziemniak P., Paczynski A. Development, realization and control of a mobile robot. International Conference on Research and Education in Robotics, EUROBOT 2010. 2011. Vol. 156. Pp. 130–140. DOI:10.1007/978-3-642-27272-1_12.
3. Tallamraju R., Verma P., Sripada V., Agrawal S., Karlapalem K. Energy Conscious Over-actuated Multi-Agent Payload Transport Robot: Simulations and Preliminary Physical Validation. 2019 28th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN). 2019. Pp. 1–7. DOI:10.1109/RO-MAN46459.2019.8956442.
4. Abbaspour A., Alipour K., Jafari H.Z., Moosavian S. A. A. Optimal formation and control of cooperative wheeled mobile robots. Comptes Rendus Mécanique. 2015. Vol. 343. No. 5-6. Pp. 307–321. DOI:10.1016/j.crme.2015.04.003.
5. Danapalasingam K.A. Electric vehicle traction control for optimal energy consumption. International Journal of Electric and Hybrid Vehicles. 2013. Vol. 5. No. 3. Pp. 233–252. DOI:10.1504/IJEHV.2013.057607.
6. Shijin C.S., Udayakumar K. Speed control of wheeled mobile robots using PID with dynamic and kinematic modelling. 2017 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS). 2017. Pp. 1–7. DOI:10.1109/ICIIECS.2017.8275962.
7. Wang Q.N., Zhai L., Wang J., Feng H.X. Study on acceleration slip regulation torque distribution control strategy for four in-wheel-motors electric vehicle steering. 2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). 2013. Pp. 3832–3837. DOI:10.1109/CCDC.2013.6561617.
8. Huzaefa F., Liu Y.C. Centralized control architecture for cooperative object transportation using multiple omnidirectional AGVs. 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2019. Pp. 6526–6532. DOI: 10.1109/IROS40897.2019.8968499.
9. Dizqah A.M., Lenzo B., Sorniotti A., Gruber P., Fallah S., De Smet J. A fast and parametric torque distribution strategy for four-wheel-drive energy-efficient electric vehicles. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 63. No. 7. Pp. 4367–4376. DOI:10.1109/TIE.2016.2540584.
10. Lin C., Xu Z. Wheel torque distribution of four-wheel-drive electric vehicles based on multi-objective optimization. Energies. 2015. Vol. 8. No. 5. Pp. 3815–3831. DOI:10.3390/en8053815.
11. Guodong Y., Chengjie Z., Ning Z. The torque distribution and anti-slip regulation control for two-wheel independent drive electric vehicle. 2016 Chinese control and decision conference (CCDC). 2016. Pp. 4444–4449. DOI:10.1109/CCDC.2016.7531785.
12. Park J., Jeong H., Jang I. G., Hwang S. H. Torque distribution algorithm for an independently driven electric vehicle using a fuzzy control method. Energies. 2015. Vol. 8. No. 8. Pp. 8537–8561. DOI:10.3390/en8088537.
13. Shabanov D., Kuanyshova A., Kim V., Pirogov N. Control system for a group of industrial mobile robots for moving large-sized objects. International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems". 2021. Vol. 2843. Art. No. 017.
14. Ishigami G., Pineda E., Overholt J., Hudas G., Iagnemma K. Design, Development, and Mobility Test of an Omnidirectional Mobile Robot for Rough Terrain. Field and Service Robotics. 2014. Pp. 599–611. DOI:10.1007/978-3-642-40686-7_40.
15. Moore K. L., Flann N. S. A six-wheeled omnidirectional autonomous mobile robot. IEEE Control Systems Magazine. 2000. Vol. 20. No. 6. Pp. 53–66. DOI:10.1109/37.887449.
16. Sorour M., Cherubini A., Fraisse P., Passama R. Motion discontinuity-robust controller for steerable mobile robots. IEEE Robotics and Automation Letters. 2016. Vol. 2. No. 2. Pp. 452–459. DOI:10.1109/LRA.2016.2638466.
17. Verma P., Tallamraju R., Rawat A., Chand S., Karlapalem K. Loosely coupled payload transport system with robot replacement. Autonomous Robots and Multirobot Systems. 2019. DOI:10.48550/arXiv.1904.03049.
18. Berenz V., Tanaka F., Suzuki K. Autonomous battery management for mobile robots based on risk and gain assessment. Artificial Intelligence Review. 2012. Vol. 37. No. 3. Pp. 217–237. DOI:10.1007/s10462-011-9227-9.
19. Shabanov D.V., Volkov A.N., Cheusova A.I., Kochneva O.V. Estimating the lateral forces, that impact on the wheels of a transport robotic system [Определение поперечных сил, действующих на колеса транспортной роботизированной системы]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 12. Pp. 114–123. (rus) DOI:10.34031/2071-7318-2022-7-12-114-123.
20. Hebb D.O. The Organization of Behavior. New York, 1949. 335 p.

Information about the authors

Shabanov, Dmitrii V. Teaching assistant. E-mail: shabanov_dv@internet.ru. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Russia, 195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29.

Received 18.01.2023

Для цитирования:

Шабанов Д.В. Эффективное распределение тяговых сил между роботами при групповой транспортировке груза // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 4. С. 106–118. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-106-118

For citation:

Shabanov D.V. Efficient distribution of traction forces between robots during cooperative cargo transportation. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 4. Pp. 106–118. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-4-106-118