

## Control System Structure of the 4th Drive Power Installations for Electric Vehicles

Osadchyy V.V., Nazarova E.S., Brylistyy V.V.  
Zaporizhzhia National Technical University  
Zaporizhzhia, Ukraine

**Abstract.** The main global trend in the automotive industry is a significant increase in the share of hybrid and electric vehicles in total production, as well as the expansion of the related infrastructure. One of the main objectives of the development of an electric vehicle was to increase mileage without recharging and to improve the handling and maneuverability, as well as the passengers' safety and cargo transportation conditions. The increase in mileage can be achieved both by improving the battery, and by improving the energy efficiency of the electric drive. The passenger safety is largely dependent on the vehicle handling. Therefore, an urgent task is to improve the performance and energy efficiency of the electric vehicles using the electric drive. The aim of this work was to justify the use of the 4-drive installation, which allowed us to redistribute the torque between the drive wheels, as a base for a modern electric vehicle. The redistribution of the moment between the drive wheels by means of an automated electric drive improved the controllability and safety of the vehicle by maintaining the torque of the drive wheels at the maximum possible level under the given driving conditions. Namely, they are the vehicle speed, angle of rotation and coefficient of adhesion of the drive wheels to the road surface. Using this method enabled to improve the energy efficiency compared to the mechanical method of the redistribution of the moment by eliminating the braking losses of the wheels, which required a reduction in the moment.

**Keywords:** automobile industry, automobile production, electric car, automatic control system, torque, electric drive, four-wheel drive, 4 engines.

**DOI:** 10.5281/zenodo.3239150

### Structura sistemului de control a instalației de putere cu 4 acționări pentru vehicule electrice

Osadchy V.V., Nazarova E.S., Brylisty V.V.

Universitatea Tehnică Națională din Zaporije, Zaporije, Ucraina

**Rezumat.** Principala tendință globală în industria automobilelor este creșterea semnificativă a ponderii vehiculelor hibride și electrice în producția totală, precum și extinderea infrastructurii asociate. Unul dintre obiectivele principale ale dezvoltării unui vehicul electric este de a crește kilometrajul fără reincărcare și de a îmbunătăți manevrabilitatea și controlul, precum și siguranța pasagerilor și condițiile de transport al încărcăturii. Creșterea kilometrajului poate fi atinsă atât prin îmbunătățirea bateriei, cât și prin îmbunătățirea eficienței energetice a transmisiei electrice. Siguranța transportului de pasageri și mărfuri depinde în mare măsură de controlabilitatea vehiculului. Prin urmare, o sarcină urgentă este îmbunătățirea performanței și a eficienței energetice a vehiculelor electrice care utilizează unitatea electrică. Scopul lucrării este de a crește controlabilitatea vehiculului prin utilizarea unei unități de antrenare pe 4 roți, care permite redistribuirea cuplului între roțile motoare. Acest obiectiv este realizat prin menținerea cuplului roților motoare la cel mai înalt nivel posibil în condițiile de conducere date, și anume viteza vehiculului, unghiul de rotație și coeficientul de aderență al roților motoare pe suprafața drumului, ceea ce îmbunătățește controlul și siguranța vehiculului. Ca urmare a studiului, s-au formulat cerințele de bază pentru sistemul de control automat al unei centrale electrice de autovehicul și s-au obținut expresii analitice pentru determinarea momentului maxim al roții, luând în considerare calea, baza, înălțimea centrului de masă și raza de cotitură, asigurând accelerația maximă a vehiculului, Redistribuirea momentului dintre roțile motoare, prin intermediul unei acționări electrice automate, ținând cont de expresiile analitice obținute, face posibilă creșterea eficienței energetice a vehiculului.

**Cuvinte-cheie:** industria automobilelor, producția de automobile, mașină electrică, sistem de control automat, cuplu, acționare electrică, tracțiune integrală, 4 motoare.

## Структура системы управления 4-х приводной силовой установкой для электрических транспортных средств

Осадчий В.В., Назарова Е.С., Брылистый В.В.

Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

**Аннотация.** Основной мировой тенденцией в автомобильной промышленности является существенное увеличение доли гибридных и электрических транспортных средств в общем объеме производства, а также расширение связанной с ними инфраструктуры. Одной из основных задач развития электрического транспортного средства является увеличение пробега без подзарядки и улучшения показателей управляемости и маневренности, а также безопасности пассажиров и условий перевозки груза. Увеличение пробега может быть достигнуто как за счет совершенствования аккумуляторной батареи, так и путем повышения энергоэффективности электропривода. Безопасность перевозки пассажиров и грузов в значительной степени зависит от управляемости транспортного средства. Поэтому актуальной задачей является повышение показателей управляемости и энергоэффективности электрического транспортного средства с использованием электропривода. Целью работы является повышение управляемости транспортного средства путем применения 4-х приводной установки, позволяющей перераспределять крутящий момент между приводными колесами. Поставленная цель достигается за счет поддержания крутящих моментов приводных колес на максимально возможном уровне при данных условиях движения, а именно, скорости транспортного средства, угла поворота и коэффициента сцепления приводных колес с дорожным покрытием, что позволяет повысить управляемость и безопасность транспортного средства. В результате исследования сформулированы основные требования к системе автоматического управления силовой установки транспортного средства и получены аналитические выражения для определения максимального момента на колесе, учитывающие колею, базу, высоту центра масс и радиус поворота, обеспечивающие максимальное ускорение транспортного средства, исключая пробуксовку колес. Перераспределение момента между приводными колесами средствами автоматизированного электропривода с учетом полученных аналитических выражений позволяет повысить энергоэффективность транспортного средства по сравнению с механическим способом перераспределения момента за счет исключения потерь на торможение колес, на которых требуется снижение момента.

**Ключевые слова:** автомобильная промышленность, автомобильное производство, электромобиль, система автоматического управления, крутящий момент, электропривод, полный привод, 4 двигателя.

### ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние мирового рынка транспортных средств характеризуется существенным увеличением доли электрических транспортных средств (ЭТС) в общем объеме производства. Одними из основных задач развития ЭТС является увеличение пробега без подзарядки и улучшения показателей безопасности пассажиров и условий перевозки груза. Увеличение пробега может быть достигнуто как за счет совершенствования аккумуляторной батареи так и путем повышения энергоэффективности электропривода. Безопасность пассажиров в значительной степени зависит от управляемости транспортного средства. Поэтому актуальной проблемой является повышение показателей управляемости и энергоэффективности ЭТС средствами электропривода.

Предлагаемое решение данной проблемы – использование 4-х приводной силовой установки в качестве базовой и разработка, под данную силовую установку, системы автоматического управления распределения крутящим моментом.

Сравнительный анализ литературных источников показал недостаточную освещенность вопроса разработок систем управления крутящим моментом именно 4-х приводных силовых установок. Исследуемые источники условно структурированы по категории в соответствии с тематикой.

К 1-й категории можно отнести обзор и выбор тяговых силовых установок для электромобиля. В работе [1] обосновывается использование двунаправленных преобразователей и суперконденсаторов в гибридных тяговых установках, системам управления с нелинейными регуляторами посвящено исследование [2], сравнительный анализ различных типов электродвигателей проведен в работах [3], [4], применение математического моделирования для анализа эффективности электропривода электромобиля рассмотрено в [5]. Основной идеей, объединяющей указанные источники, является их применение в качестве тяговой установки для электромобиля синхронного двигателя на постоянных магнитах (СМГМ), который обладает рядом существенных преимуществ относительно двигателей других конструкций, описанных в

источниках; а именно: высокий КПД, длительный срок службы, низкий уровень шума. Недостатком является его высокая стоимость из-за использования в конструкции редкоземельных металлов. Несмотря на это СМПП перспективен для электромобиля.

Ко второй категории относится обзор и выбор бортовых систем управления и систем управления тяговым приводом современных электромобилей.

Исследования, посвященные системе оптимального управления энергопотреблением на основе комплексного целочисленного линейного программирования для станции замены батарей, отражены в [6]. Необходимость соответствия стратегии управления стилю езды для обеспечения экономии энергии показана в [7], различные типы бортовых систем управления автономным транспортным средством рассмотрены в [8], в том числе с использованием интеллектуальных систем [9] и векторного управления [10], с использованием технологий Интернета вещей для повышения эффективности процесса заряда аккумуляторных батарей [6], с применением математического моделирования для определения энергетических характеристик электромобиля [11]. Исследованы особенности взаимодействия систем управления электромобиля с системами распределения энергии в зданиях [12], рассмотрен метод экономии энергии за счет управления моментом электродвигателя в гибридных автомобилях [10].

Источники, описанные в 3-й категории, на основании сформулированных задач, целей и начальных условий приводят расчеты механических параметров узлов транспортного средства и элементов трансмиссии. Так источник [13] предлагает руководство по определению подходящих концепций трансмиссий для различных электрических двигателей. Значение механического сцепления и его связь с размером ТС и топологией двигателя представлено в [14]. Немаловажным в данной тематике является статья [15], представляющая концепцию высокоэффективной трансмиссии с учетом динамики движения. Работа [16] демонстрирует результаты экспериментального исследования по эффективности коробки передач электромоторов.

Интересной с точки зрения результатов исследования, является 4-я категория литературных источников, посвященная результатам реальных экспериментов, так как они

носят противоречивый характер. Например, в статье [17] в выводах указан «большой социальный эффект» от массовой модернизации автомобиля путем замены ДВС на ЭП (конвертация), который, по итогу, должен активизировать малый и средний бизнес по производству такой модернизации. Однако в автореферате [18] аналитически и опытным путем доказано, что метод частичной или полной конвертации автомобиля в электромобиль нивелирует большую часть преимуществ электропривода относительно ДВС.

Важно отметить работы [19], [20], использующие схожую идею 4-х приводной силовой установки, но имеющее принципиальное отличие – использование в качестве приводов мотор – колеса, что в данном исследовании недопустимо. Ранее было выяснено из [18] о необходимости создания конструкции транспортного средства, которое обеспечит электромобилю наилучшие качества. Неподдресоренная масса мотор-колесо снижает комфорт и управляемость, повышает износ подвески, передает вибрации на кузов. Соответственно выход из строя мотор-колеса требует немалых средств на ремонт и снижает гибкость эксплуатации транспортного средства.

Работы 5-й категории посвящены современным технологиям зарядки электрических транспортных средств, а также их влиянию на инфраструктуру [21], [6], [22-26].

Финальная часть работ, касающихся электромобиля, посвящена экономическим эффектам в области автомобилестроения и смежным с ней отраслям. Главный вывод в этой теме – существенное влияние электромобиля на деятельность автопроизводителей и автомобильную отрасль [27].

Таким образом, недостаточная освещенность вопроса применения 4-х приводной установки, в качестве базовой на современном ЭТС, как способа повышения показателей управляемости и энергоэффективности ЭТС средствами электропривода, определяет цель исследования.

Целью работы является повышение управляемости транспортного средства путем применения 4-х приводной установки, позволяющей перераспределять крутящий момент между приводными колесами.

## МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С целью максимальной реализации преимуществ электропривода, как основной си-

ловой установки транспортного средства, сформулированы основные требования к системе автоматического управления силовой установки и к транспортному средству:

- высокие показатели управляемости и проходимости транспортного средства;
- обеспечение максимального уровня безопасности водителя и пассажиров, находящихся в транспортном средстве и участников движения;
- минимизация затрат энергии в различных режимах езды;
- соответствие показателя цена/качество сложившейся ситуации на рынке электромобилей;
- экономически обоснованное использование электропривода и микропроцессорных систем управления вместо механических узлов управления моментом;
- максимально возможный учет в конструкции транспортного средства требований по компоновке элементов электропривода.

Опыт множества мировых автопроизводителей показывает, что полноприводные системы лучше справляются с указанными требованиями по сравнению с отдельно задним и отдельно передним приводом.

Однако средства передачи момента от двигателя к колесу остались прежними: дифференциал, муфты, карданный вал и другие.

Наличие таких механических узлов ведет к неизбежным потерям мощности на колесе, а, следовательно, приводит к нерациональному распределению крутящего момента.

Вследствие этого, очевидна необходимость уменьшения количества механических узлов. Самая эффективная передача крутящего момента – напрямую от двигателя к колесу. Современные электромоторы по массогабаритным показателям и выходным мощностям превосходят ДВС.

Наличие таких электромоторов позволяет использовать на транспортном средстве не одну силовую установку, что в свою очередь позволяет решать задачи уменьшения количества механических узлов передачи момента и замены их на электропривод. Подтверждением этому служит тенденция увеличения количества приводов в современных электромобилях.

Последние модели обладают минимум двумя силовыми установками. Один электро-

мотор на задней оси, другой на передней, исключая необходимость карданного вала.

Однако технологи компании «Audi» пошли дальше. Один из последних прототипов Audi E-Tron Quattro 2018 обладает 3 силовыми установками (2 на задней оси и 1 на передней).

Стремление автопроизводителей управлять крутящим моментом каждого колеса отдельно позволит им в результате получить продукт, имеющий наилучшие показатели в управляемости, проходимости, безопасности, комфорте и расходе энергии, а значит, быть передовым на современном рынке электромобилей.

Таким образом, обоснование применения 4-х приводной силовой установки сводится к:

- возможности конструкционной реализации 4-х приводной силовой установки;
- способности данной системы на выполнение всех требований, отражающих максимальную реализацию преимуществ электропривода, как силовой установки современного транспортного средства;
- тенденции современного автомобилестроения, как подтверждение реализуемости и правильности выбранного решения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определение структуры САУ распределения моментом;
- определение зависимости допустимых моментов колес от скорости движения и радиуса поворота автомобиля;
- выбор тяговых двигателей в зависимости от конструктивных особенностей, мощностных показателей и энергетических затрат.

Структура САУ распределения крутящего момента 4-х приводной силовой установки представлена на рис. 2., где  $K_A$  – положение педали акселератора,  $K_B$  – положение педали тормоза,  $\varphi_s$  - угол поворота рулевого колеса, Torque control system (TCS) - микропроцессорная система управления распределением момента, Drive – электропривод, Wheel – колесо.

Подсистема Drive (рис.3) представлена частотным преобразователем (FC) и двигателем (Motor).

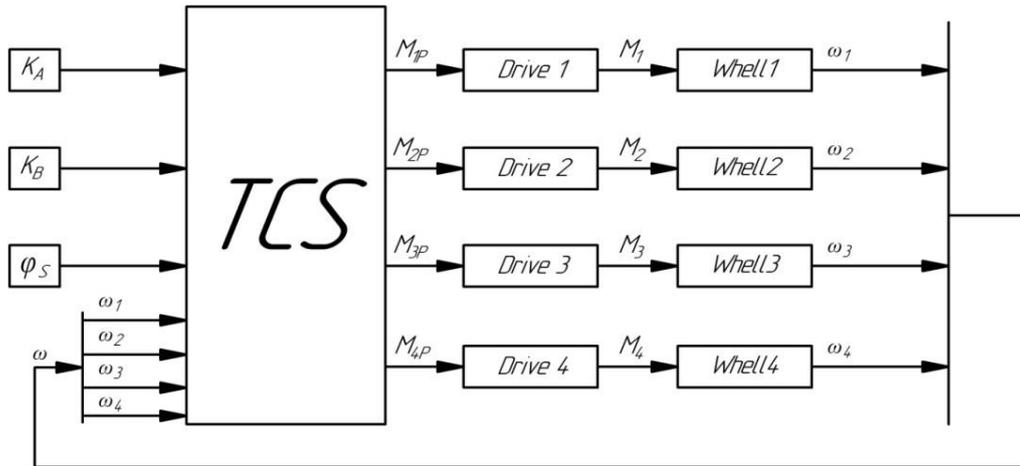


Рис. 1. Структурная схема САУ. <sup>1</sup>

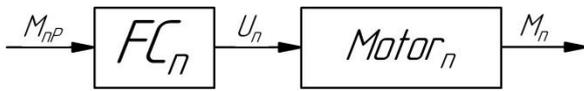


Рис 2. Структурная схема подсистемы Drive. <sup>2</sup>

При математическом описании объекта приняты следующие допущения: центр масс находится в геометрическом центре ТС, каркас ТС абсолютно жесткий, коэффициент трения покоя между колесом и дорожным покрытием известен и одинаков для всех колёс.

На рис. 4 представлены силы, действующие на транспортное средство в повороте, где  $A$  - поперечное расстояние между серединами колес ТС (колея),  $B$  - продольное расстояние между серединами колес ТС (база),  $C$  - расстояние от внутреннего колеса до центра поворота ТС, высота центра масс -  $H$ .

Необходимо вывести формулы сил, тянущих транспортное средство в поворот ( $F_{P1}, F_{P2}, F_{P3}, F_{P4}$ ), определить максимальную силу тяги ( $F_{Tmax}$ ), которую можно подавать на колесо до момента пробуксовки, с учетом перераспределения реакций опор ( $N_1, N_2, N_3, N_4$ ) в повороте.

Исходя из рис. 4, можно определить углы поворотов колеса 1 (1) и колеса 2 (2), угол между вектором центробежной силы и осью задних колес (3), а также вычислить радиус поворота (4) по формулам:

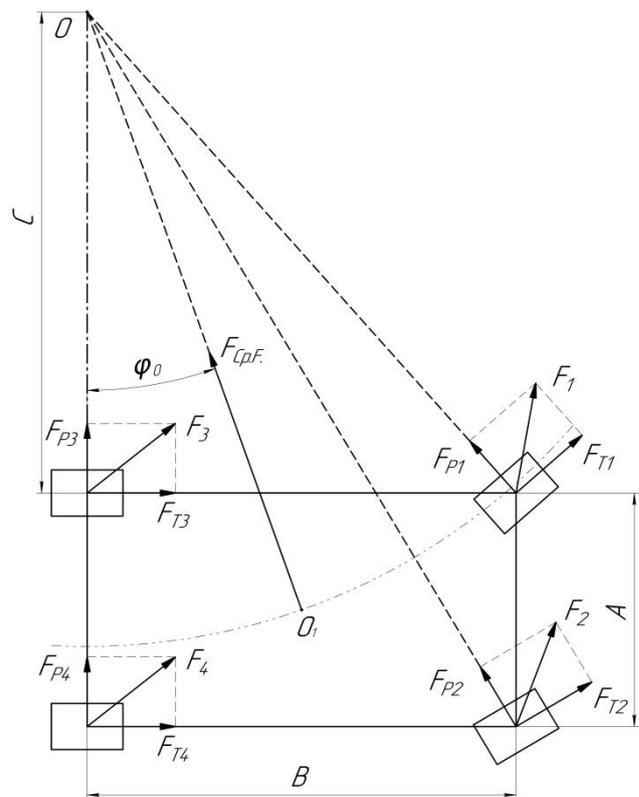


Рис. 3. Силы, действующие в повороте. <sup>3</sup>

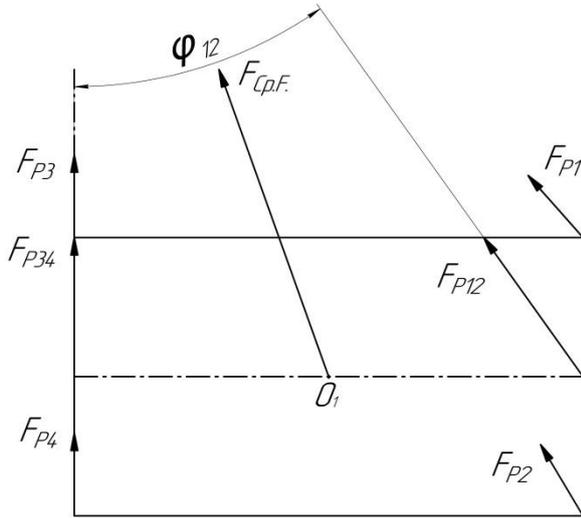
$$\varphi_1 = \arctan \frac{B}{C}, \quad (1)$$

$$\varphi_2 = \arctan \frac{B}{A+C}, \quad (2)$$

$$\varphi_0 = \arctan \frac{B/2}{A/2+C}, \quad (3)$$

$$R = \sqrt{\left(\frac{A}{2} + C\right)^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2}. \quad (4)$$

С целью нахождения сил  $F_{P1}, F_{P2}, F_{P3}, F_{P4}$ , необходимо перераспределить центростремительную силу на переднюю ось ( $F_{P12}$ ) и заднюю ( $F_{P34}$ ), что представлено на рис. 5.



**Рис.4. Распределение центростремительной силы. 4**

Необходимо найти силы  $F_{P12}$  и  $F_{P34}$ , являющимися геометрической суммой  $F_{Cp.F.}$  (5) и определить угол  $\varphi_{12}$  – как угол между вектором  $\overline{F_{P12}}$  и осью задних колес (6)

$$\overline{F_{Cp.F.}} = \overline{F_{P12}} + \overline{F_{P34}}, \quad (5)$$

$$\varphi_0 = \arctan \frac{B}{\frac{A}{2} + C}. \quad (6)$$

Составим систему уравнений, где первое уравнение системы отражает проекцию сил на ось  $X$ , а второе – на ось  $Y$  (7):

$$\begin{cases} -\sin \varphi_0 \cdot F_{Cp.F.} = -\sin \varphi_{12} \cdot F_{P12} + 0 \\ \cos \varphi_0 \cdot F_{Cp.F.} = \cos \varphi_{12} \cdot F_{P12} + F_{P34} \end{cases} \quad (7)$$

Решением системы уравнений (7) является матрица (9), полученная из (8):

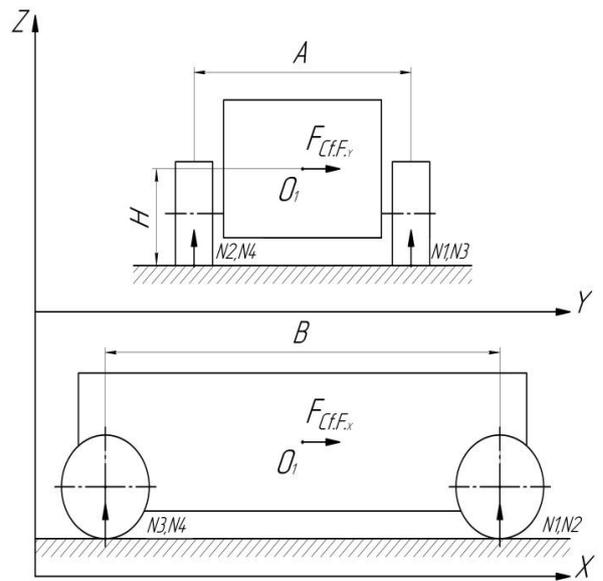
$$X_1 = \begin{pmatrix} -\sin \varphi_{12} & 0 \\ \cos \varphi_{12} & 1 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} -\sin \varphi_0 \cdot F_{Cp.F.} \\ \cos \varphi_0 \cdot F_{Cp.F.} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$X_1 = \begin{pmatrix} F_{P12} \\ F_{P34} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Так как  $F_{P12}$  – геометрическая сумма сил  $F_{P1}$  и  $F_{P2}$  (10), можно найти  $F_{P1}$  и  $F_{P2}$  с помощью системы уравнений (11).

$$\overline{F_{P12}} = \overline{F_{P1}} + \overline{F_{P2}}, \quad (10)$$

$$\begin{cases} -\sin \varphi_{12} \cdot F_{P12} = -\sin \varphi_1 \cdot F_{P1} - \sin \varphi_2 \cdot F_{P2} \\ \cos \varphi_{12} \cdot F_{P12} = \cos \varphi_1 \cdot F_{P1} + \cos \varphi_2 \cdot F_{P2} \end{cases}. \quad (11)$$



**Рис. 5. Воздействие центробежной силы на транспортное средство. 5**

Система уравнений (11) так же имеет матричное решение представленное (12) и (13).

$$X_2 = \begin{pmatrix} -\sin \varphi_1 & -\sin \varphi_2 \\ \cos \varphi_1 & \cos \varphi_2 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} -\sin \varphi_{12} \cdot F_{P12} \\ \cos \varphi_{12} \cdot F_{P12} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$X_2 = \begin{pmatrix} F_{P1} \\ F_{P2} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Для сил  $F_{P3}, F_{P4}$  и  $F_{P34}$  находящихся на одной оси, принимаем, что силы  $F_{P3}, F_{P4}$  равны и вычисляются по формуле (14):

$$\overline{F_{P3}} = \overline{F_{P4}} = \frac{\overline{F_{P34}}}{2}. \quad (14)$$

Известно, что в повороте на колеса, которые едут по внешнему радиусу сила воздействия больше, чем на внутренние. Это связа-

но с опрокидывающим моментом, создаваемым центробежной силой ( $F_{Cf.F.}$ ), что представлено на рис. 6.

Вследствие этого, на внешние колеса можно подавать момент больше, а с внутренних снимать, так как сцепление с покрытием внешних колес лучше. С целью внесения данной закономерности в САУ, необходимо представить в виде формул (15-18), отражающих изменения сил реакций опор в повороте.

$$N_1 = \frac{mg}{4} + F_{Cf.F.x} \cdot \frac{H}{B} + F_{Cf.F.y} \cdot \frac{H}{B}, \quad (15)$$

$$N_2 = \frac{mg}{4} + F_{Cf.F.x} \cdot \frac{H}{B} - F_{Cf.F.y} \cdot \frac{H}{B}, \quad (16)$$

$$N_3 = \frac{mg}{4} - F_{Cf.F.x} \cdot \frac{H}{B} + F_{Cf.F.y} \cdot \frac{H}{A}, \quad (17)$$

$$N_4 = \frac{mg}{4} - F_{Cf.F.x} \cdot \frac{H}{B} - F_{Cf.F.y} \cdot \frac{H}{A}. \quad (18)$$

Исходя из полученных данных определим силы ( $F_1, F_2, F_3, F_4$ ) как геометрические суммы сил тяги ( $F_{T_i}$ ) и силы, тянущей в поворот ( $F_{P_i}$ ) по формуле (19)

$$F_i^2 = F_{T_{max_i}}^2 + F_{P_i}^2. \quad (19)$$

Для нахождения максимальной возможной силы тяги, которую можно подать на колесо без пробуксовки необходимо записать результирующую силу через условие пробуксовки, выраженное в формуле (20)

$$F_{T_i} \geq N_i \mu. \quad (20)$$

Значит, максимальная сила тяги на колесе равна (21):

$$F_{T_{max_i}} = \sqrt{(N_i \mu)^2 - F_{P_i}^2}. \quad (21)$$

Максимальный момент на колесе определим по формуле (22)

$$M_{max_i} = \frac{F_{T_{max_i}} \cdot D}{2}, \quad (22)$$

где  $D$  – диаметр колеса.

Предложенная структура САУ распределения крутящего момента и аналитические выражения, определяющие допустимые значения моментов колес являются основой для математического моделирования электромеханических процессов в автоматизированном электроприводе.

Целью работы является повышение управляемости транспортного средства путем применения 4-х приводной установки.

В соответствии с целью в работе предложена структура системы управления 4-х приводной силовой установки, позволяющей перераспределять крутящий момент между приводными колесами. Получены аналитические выражения для определения максимального момента на колесе, учитывающие колею, базу, высоту центра масс и радиус поворота, обеспечивающие максимальное ускорение транспортного средства, исключая пробуксовку колес.

## Выводы

Перераспределение момента между приводными колесами средствами автоматизированного электропривода позволяет повысить управляемость и безопасность транспортного средства.

Использование указанного способа позволяет повысить энергоэффективность транспортного средства по сравнению с механическим способом перераспределения момента за счет исключения потерь на торможение колес, на которых требуется снижение момента.

Дальнейшие исследования планируются в направлении разработки системы автоматического управления 4-х приводной силовой установкой электроавтомобиля.

## APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

<sup>1</sup>**Fig. 1.** Structural scheme of automatic control system.

<sup>2</sup>**Fig. 2.** Block diagram of the subsystem Drive.

<sup>3</sup>**Fig. 3.** Forces acting in turn.

<sup>4</sup>**Fig. 4.** Distribution of centripetal force.

<sup>5</sup>**Fig. 5.** The impact of centrifugal force on the vehicle.

## Литература (References)

- [1] Veer Singh, Krishna & Bansal, Hari & Singh, Dheendra. A comprehensive review on hybrid electric vehicles: architectures and components. *Journal of Modern Transportation*, 2019. Available at: <https://www.researchgate.net/>

- [publication/331623927\\_A\\_comprehensive\\_review\\_on\\_hybrid\\_electric\\_vehicles\\_architectures\\_and\\_components](#) (accessed 25.03.2019)
- [2] El Idrissi Z & El Fadil, Hassan & Giri, Fouad. Nonlinear control of salient-pole PMSM for electric vehicles traction. *19th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, 2018, pp. 231-236.
- [3] Shumov Yu.N. Energosberigayushchiye elektricheskiye mashiny [Energy saving electric machines]. *Elektrichestvo*, 2015, no.4, pp. 45-47. (In Russian).
- [4] Berbirenkov I.A., Lokhnin V.V. *Tyagovyye elektrodvigateli na postoyannykh magnitakh v elektroprivode avtomobilya* [Traction motors with permanent magnets in the electric drive vehicle]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2011. no.4, pp. 148-150. (In Russian).
- [5] Kozlova T.A. Metodika poiska ratsional'nykh konstruktivnykh parametrov tyagovogo privoda elektromobilya [Technique for finding rational design parameters of an electric vehicle drive]. *Internet-zhurnal "Naukovedeniye"*, 2016, Vol. 8, no.5 (In Russian). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/86TVN516.pdf>(accessed 25.03.2019)
- [6] Ahmad, Furkan & Alam, Mohammad & M. Shariff, Samir. A Cost-efficient Energy Management System for Battery Swapping Station. *IEEE Systems Journal*, 2019. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/331506460\\_A\\_Cost-efficient\\_Energy\\_Management\\_System\\_for\\_Battery\\_Swapping\\_Station](https://www.researchgate.net/publication/331506460_A_Cost-efficient_Energy_Management_System_for_Battery_Swapping_Station) (accessed 25.03.2019)
- [7] Nazari, Shima & Stefanopoulou, Anna & Martz, Jason & J. Middleton, Robert. The elusive consequences of slow engine response on drive cycle fuel efficiency, 2018. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/325661803\\_The\\_elusive\\_consequences\\_of\\_slow\\_engine\\_response\\_on\\_drive\\_cycle\\_fuel\\_efficiency](https://www.researchgate.net/publication/325661803_The_elusive_consequences_of_slow_engine_response_on_drive_cycle_fuel_efficiency) (accessed 25.03.2019)
- [8] Shariff, Samir & Ahmad, Zaurez & Ahmad, Furkan & Alam, Mohammad. Conceptual Framework of Connected and Automated Electric Vehicles, 2018. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/328653416\\_Conceptual\\_Framework\\_of\\_Connected\\_and\\_Automated\\_Electric\\_Vehicles](https://www.researchgate.net/publication/328653416_Conceptual_Framework_of_Connected_and_Automated_Electric_Vehicles) (accessed 25.03.2019)
- [9] Nasibulov I.R. Bortovaya intellektualnaya sistema elektromobilya [Onboard intelligent system of electric vehicle]. *Automation and Control in Technical Systems (ACTS)*, 2014, no. 1.1(8), pp. 74-83. (In Russian) doi: 10.12731/2306-1561-2014-1-8.
- [10] Varzanosov P.V. Vyor sistemy upravleniya dvigatelem elektromobilya [Selection of motor vehicle engine control system]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferencii "Tekhnicheskkiye nauki v Rossii i za rubezhom" [Materials VI International Scientific Conference "Technical Sciences in Russia and Abroad"]*, Moscow, 2016, pp. 47-51. Available at: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/228/11297/> (accessed 25.03.2019)
- [11] Kongjeen, Yuttana & Bhummkittipich, Krischonme. Modeling of electric vehicle loads for power flow analysis based on PSAT. *13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2016. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/308496101\\_Modeling\\_of\\_electric\\_vehicle\\_loads\\_for\\_power\\_flow\\_analysis\\_based\\_on\\_PSAT](https://www.researchgate.net/publication/308496101_Modeling_of_electric_vehicle_loads_for_power_flow_analysis_based_on_PSAT) (accessed 25.03.2019)
- [12] Barone, Giovanni & Buonomano, Annamaria & Calise, Francesco & Forzano, Cesare & Palombo, Adolfo. Building to vehicle to building concept toward a novel zero energy paradigm: Modelling and case studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, vol.101. pp. 625-648.
- [13] Felden, M & Butterling, Patrick & Jeck, Peter & Eckstein, Lutz & Hameyer, Kay. Electric vehicle drive trains: From the specification sheet to the drive-train concept. *14th International Conference "Power Electronics and Motion Control (EPE/PEMC)"*, 2010, pp. 9-16.
- [14] Camilleri, Robert & Armstrong, Peter & Ewin, N & Richardson, R & Howey, David & McCulloch, Malcolm. The Value of a Clutch Mechanism in Electric Vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 2013, vol. 6. pp. 696-706.
- [15] Jandura, Pavel & Břoušek, Josef & Bukvic, Martin. The concept of a highly efficient powertrain for an electric vehicle with respect to vehicle driving dynamics. *International Conference on Electrical Drives and Power Electronics*. The High Tatras, 2015, pp. 422-429.
- [16] Břoušek, Josef & Zvolský, Tomáš. Experimental study of electric vehicle gearbox efficiency. *MATEC Web of Conferences*, 2018. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/329097934\\_Experimental\\_study\\_of\\_electric\\_vehicle\\_gearbox\\_efficiency](https://www.researchgate.net/publication/329097934_Experimental_study_of_electric_vehicle_gearbox_efficiency) (accessed 25.03.2019)
- [17] Klepikov V.B., Gonchar A.S., Semikov A.V., Moiseyev A.N., Kastornyy P.M., Timoshchenko A.V., Pshenichnikov D.A., Kovtun V.V., Banev Ye.F., Khoreva A.V. Iz opyta sozdaniya elektroprivoda elektromobilya s superkondensatornym nakopitelem energii [From the experience of creating an electric drive electromotive with a supercondenser energy storage device]. *Visnyk NTU "KHPI"*, 2015, no.12(1121), pp. 195-198.
- [18] Gur'yanov D.I. *Optimizatsiya upravleniya elektromobilyami maloy gruzopod'yemnosti s privodami postoyannogo toka*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk. [Optimization of control of low-capacity electric vehicles with direct-current drives. Author. Diss. Candidate of Technical Sciences.] Moscow, 1992. p. 19.

- [19] Carlos Montero, David Marcos, Carlos Bordons, Miguel A. Ridao, E.F. Camacho, Elena Gonzalez and Alejandro Oliva [Modeling and Torque Control for a 4-Wheel-Drive Electric Vehicle]. *Department of Systems Engineering and Automatic Control University of Seville, Spain*, pp2650-26555 doi: 10.1109/ICIT.2015.7125488.
- [20] De Pinto S., Camocardi P., Sorniotti A., Mantriota G., Perlo P., Viotto F. [A Four-Wheel-Drive Fully Electric Vehicle Layout with Two-Speed Transmissions] *Department of Mechanical Engineering Sciences. University of Surrey. Guildford, United Kingdom. Dipartimento di Meccanica, Matematica e Management. Politecnico di Bari. Bari, Italy. Interactive Fully Electrical Vehicles (IFEVS). Torino e-District. Torino, Italy. EV & HEV Transmissions – Automotive Applications. Oerlikon Graziano SpA. Torino, Italy. Conference Paper, December 2014* doi: 10.1109/VPPC.2014.7006997.
- [21] Ahmad, Aqueel & Khan, Zeeshan Ahmad & Alam, Mohammad & Khateeb Razack, Siddique Ali. A Review of the Electric Vehicle Charging Techniques, Standards, Progression and Evolution of EV Technologies in Germany. *Smart Science*, 2018, vol.6, pp. 36-53.
- [22] Mies Bsc, J & Helmus, Jurjen & van den Hoed, Robert. Estimating the charging profile of individual charge sessions of Electric Vehicles in the Netherlands. *Symposium 30 “Electronic Vehicle”*, Stuttgart, 2016, pp. 1-12.
- [23] M. A. Haidar, Ahmed & Muttaqi, Kashem. Behavioral Characterization of Electric Vehicle Charging Loads in a Distribution Power Grid Through Modeling of Battery Chargers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/282526025\\_Behavioral\\_Characterization\\_of\\_Electric\\_Vehicle\\_Charging\\_Loads\\_in\\_a\\_Distribution\\_Power\\_Grid\\_Through\\_Modeling\\_of\\_Battery\\_Chargers](https://www.researchgate.net/publication/282526025_Behavioral_Characterization_of_Electric_Vehicle_Charging_Loads_in_a_Distribution_Power_Grid_Through_Modeling_of_Battery_Chargers) (accessed 25.03.2019)
- [24] Kongjeen, Yuttana & Junlakan, Wannawit & Bhumkittipich, Krischonme & Nadarajah, Mithulanathan. Estimation of the Quick Charging Station for Electric Vehicles based on Location and Population Density Data. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 2018, no.11, pp. 233-241.
- [25] Shukla, Akanksha & Verma, Kusum & Kumar, Rajesh. Multi-Stage Voltage Dependent Load Modelling of Fast Charging Electric Vehicle. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/322819859\\_Multi-Stage\\_Voltage\\_Dependent\\_Load\\_Modelling\\_of\\_Fast\\_Charging\\_Electric\\_Vehicle](https://www.researchgate.net/publication/322819859_Multi-Stage_Voltage_Dependent_Load_Modelling_of_Fast_Charging_Electric_Vehicle) (accessed 25.03.2019)
- [26] Popović, Vlado & Jereb, Borut & Kilibarda, Milorad & Andrejić, Milan & Keshavarzsaleh, Abolfazl & Dragan, Dejan. Electric Vehicles as Electricity Storages in Electric Power Systems. *Logistics & Sustainable Transport*, 2018, no.9, pp. 57-72.
- [27] Chekhin D.V. Vliyaniye elektromobiley na tsepochnu sozdaniya tsestnosti v avtomobilestroyenii [The impact of electric cars on the value chain in the automotive industry]. *Nauchnyy forum: ekonomika i menedzhment*, 2017, no.7, pp. 80-88.

**Сведения об авторах.**



**Осадчий Владимир Владимирович**,  
к.т.н., доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Запорожского национального технического университета.  
ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063  
E-mail: [w.osadchiy@gmail.com](mailto:w.osadchiy@gmail.com)



**Брылистый Виктор Викторович**,  
аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Запорожского национального технического университета.  
ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063  
e-mail: [77vitya77@gmail.com](mailto:77vitya77@gmail.com)



**Назарова Елена Сергеевна**,  
к.т.н., доцент кафедры «Электропривод та автоматизация промышленных установок» Запорожского национального технического университета.  
ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063  
E-mail: [nazarova16@gmail.com](mailto:nazarova16@gmail.com)