



Использование индивидуального привода колес трактора посредством электрической тяги

Антон Владиславович Бижаев,

канд. техн. наук, доцент,

e-mail: a.bizhaev@mail.ru;

Софья Михайловна Ветрова,

ассистент, аспирант,

e-mail: s.vetrova@rgau-msha.ru;

Алина Сергеевна Барчукова,

ассистент, аспирант,

e-mail: barchukova@rgau-msha.ru;

Николай Сергеевич Кривых,

учебный мастер,

e-mail: krivyh05@gmail.com

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

Реферат. В сельском хозяйстве основной технической единицей, выполняющей тяговые и приводные операции, считается трактор. Источником механической энергии для него служит дизельный двигатель с коэффициентом полезного действия около 40 процентов. У электродвигателей коэффициент полезного действия достигает 95 процентов, и это открывает возможности их использования в качестве независимого привода колес трактора. Рассмотрены существующие системы индивидуального привода колес, в которых установлено повышение эффективности работы машины до 20 процентов. Проведен анализ работы трактора с классической системой силового агрегата и с электроприводной системой. Рассмотрены факторы, влияющие на тягообразование трактора, и способы улучшения тягово-сцепных свойств мобильного средства. (*Цель исследования*) Оценка возможности использования индивидуального привода колес трактора при помощи электрической тяги. (*Материалы и методы*) Разработана концепция управления индивидуальным приводом колес. Построен алгоритм управления колесом с электроприводом. Предложена методика определения буксования для перехода электропривода колеса на соответствующий режим работы. Введен новый показатель «фактор буксования» для связи коэффициентов буксования и сцепления. Величина этого параметра служит индикатором для перехода электропривода в другой режим работы. (*Результаты и обсуждение*) Проведены тяговые испытания на тракторе МТЗ-82.1 при различных опорных поверхностях. Фактор буксования составляет: 0,71 для поля под посев, 0,86 для стерни, 1,19 для залежи и 1,74 для асфальтового покрытия. Для понимания реальной ситуации при работе колеса измерялся крутящий момент на колесе при помощи специального фиксирующего устройства. Получены значения углового смещения вала на 0,2 градуса при касательной силе тяги на колесе 3 килоньютона. (*Выводы*) Для трактора МТЗ-82.1 определен фактор буксования. Предложена математическая модель, связывающая сцепные свойства колеса с буксованием. Диапазон действия модели ограничивается предельным буксованием 30 процентов. Многофакторная характеристика позволит составить программу адаптивных условий для повышения эффективности работы колеса. Определена возможность замера крутящего момента колеса.

Ключевые слова: электротрактор, буксование, циркуляция мощности, индивидуальный привод, управление приводом колеса.

■ **Для цитирования:** Бижаев А.В., Ветрова С.М., Барчукова А.С., Кривых Н.С. Использование индивидуального привода колес трактора посредством электрической тяги // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №2. С. 78-85. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-78-85. EDN: XRYNEM.

Scientific article

Using Individual Tractor Wheel Drive Through Electric Traction

Anton V. Bizhaev,

Ph.D.(Eng.), associate professor,

e-mail: a.bizhaev@mail.ru;

Sofya M. Vetrova,

Ph.D.(Eng.) student, assistant,

e-mail: s.vetrova@rgau-msha.ru;

Alina S. Barchukova,

Ph.D.(Eng.) student, assistant,

e-mail: barchukova@rgau-msha.ru;

Nikolay S. Krivyh,

laboratory assistant,

e-mail: krivyh05@gmail.com

Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

Abstract. In agriculture, tractors serve as the principal machinery for performing traction and driving operations. They are mainly powered by diesel engines with an efficiency of about 40 percent. Electric motors boast an efficiency of 95 percent, presenting the opportunity to serve as independent drives for tractor wheels. The study review existing individual wheel drive systems, revealing operational efficiency improvements of up to 20 percent. A comparative analysis was conducted between tractors using traditional power units and those equipped with electric drive systems. The study also examined factors affecting tractor traction and explored methods to enhance the traction capabilities of these vehicles. (*Research purpose*) The study aims to evaluate the feasibility of using electric traction for individual drive systems in tractor wheels. (*Materials and methods*) A concept for controlling individual wheel drives has been developed, as well as an algorithm specifically for managing electric wheels. Additionally, a method has been proposed for detecting slippage, which triggers the switching of the electric wheel drive to the appropriate mode. Furthermore, a new indicator, the «slip factor,» has been introduced to correlate slip with adhesion coefficients. The value of this parameter is used as a criterion for transitioning the electric drive to a different operational mode. (*Results and discussion*) Traction tests were conducted on the MTZ-82.1 tractor across various supporting surfaces. The measured slip factors were as follows: 0.71 for a cropped field, 0.86 for stubble, 1.19 for fallow land, and 1.74 for asphalt pavement. To accurately assess the wheel's performance under real conditions, torque measurements were taken using a specialized locking device. These measurements revealed angular displacements of the shaft by 0.2 degrees when subjected to a tangential traction force of 3 kilonewtons on the wheel. (*Conclusions*) The slip factor for the MTZ-82.1 tractor has been determined. A mathematical model has been proposed that links the wheel's adhesion properties with slipping. The model proves to be applicable up to a slip limit of 30 percent. This multifactorial approach enables the creation of an adaptive program to enhance wheel efficiency. Additionally, the capability to measure wheel torque has been established.

Keywords: electric tractor, slipping, power circulation, individual drive, wheel drive control.

■ **For citation:** Bizhaev A.V., Vetrova S.M., Barchukova A.S., Kriviyh N.S. Using individual tractor wheel drive through electric traction. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 78-85 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-78-85. EDN: XRYHEM.

Проблемы энергосбережения и токсичности двигателей внутреннего сгорания становятся все более актуальными. Дизельный двигатель внутреннего сгорания, устанавливаемый на тракторы, комбайны и другие мобильные машины, обладает невысокой эффективностью работы (порядка 40-45%) при наиболее благоприятных режимах [1]. При этом процесс образования механической мощности сопровождается выбросом с отработавшими газами токсичных и загрязняющих окружающую среду веществ [2].

Для решения проблем энергосбережения и токсичности двигателей внутреннего сгорания (ДВС) необходимо развивать новые технологии, в том числе с применением электрических и гибридных силовых агрегатов [3]. Некоторые существующие методы снижения токсичности не создают препятствий при совместном использовании электропривода и ДВС на мобильной машине. К таким методам относятся применение биотоплива, водородных топливных элементов и других альтернативных источников энергии [4, 5].

К основным факторам, влияющим на эффективность и производительность тракторов, относятся тягово-сцепные свойства колес с опорной поверхностью [6]. В целях обеспечения наилучшего режима работы при взаимодействии движителя с почвой можно использовать электрический привод, так как он обладает высоким быстродействием, гибкостью в управлении и широким диапазоном работы.

Наиболее перспективными электродвигателями считаются вентильные бесщеточные двигатели постоянного тока [7]. Они эффективны и неприхотливы по сравнению с щеточными или асинхронными электродвигателями [8]. В электрическом двигателе большее количество потребляемой энергии преобразуется в механическую, чем в ДВС, более плавная и бесшумная работа обеспечивает комфортное и тихое движение.

В гибридных технологиях в двигателе внутреннего сгорания обычно генерируется механическая энергия, которая преобразуется в электрическую и приводит электродвигатель в действие. Эти технологии широко распространены на автомобилях, а на тракторах находятся на стадии опытных разработок [9]. Считается, что работа ДВС ограничивает использование трактора в помещениях с недостаточной вентиляцией. Тем не менее, временный режим работы на запасенной электрической энергии при использовании электропривода вполне может применяться [10].

Наиболее важная особенность электрического двигателя в качестве привода трактора заключается в возможности индивидуального привода каждого колеса. Управление такой системой может быть реализовано с помощью автоматики.

На данный момент уже есть разработки автомобиля с индивидуальным приводом колес. С 2000 по 2001 г. компанией «НАМИ-Сервис» и ОГК СТ АМО ЗИЛ совместно разрабатывалась конструкторская

документация на автомобиль на базе ЗИЛ-49061 с гидрообъемной трансмиссией и индивидуальным приводом колес [11]. Позднее автомобиль сертифицирован под названием «Гидроход-49061». КПД этой машины по опытным данным был выше на 20% в одинаковых условиях [12].

Гидрообъемная трансмиссия (ГОТ) редко используется на автомобилях или тракторах ввиду сравнительно низкого КПД, порядка 70-80%. ГОТ устанавливается преимущественно на машинах с бесступенчатым изменением скорости, например комбайнах.

Недостатком механической трансмиссии считается низкий КПД на больших машинах, таких как карьерные самосвалы и строительная техника, поскольку из-за размеров деталей значительно увеличивается момент инерции [13].

Современные тракторы оснащены преимущественно механическими ступенчатыми трансмиссиями с ручным, гидравлическим или электрическим управлением. Такие трансмиссии обычно включают межколесные и промежуточные симметричные шестеренчатые дифференциалы, которые обеспечивают разделение крутящего момента по порвну и позволяют ведущим колесам вращаться с разными угловыми скоростями. С точки зрения маневрирования трактора дифференциал не вызывает проблем. Однако при прямолинейном движении касательная сила может быть одинаковой только в одинаковых условиях на ведущих колесах. Сцепление колеса с поверхностью и кинематический радиус колеса постоянно меняются, приводя к изменению касательной силы.

Симметричный дифференциал распределяет крутящий момент поровну между колесами, учитывая внутреннее трение [14]. Недостаток состоит в том, что разблокированный дифференциал обеспечивает на оба колеса одинаковый крутящий момент, который соответствует наименьшему значению, реализуемому одним из колес. Например, такая ситуация может возникнуть, когда одна сторона колес попадает в борозду, и коэффициенты сцепления на колесах будут разные [15]. Для предотвращения этого используется блокировка дифференциала, что позволяет жестко соединить две подсистемы при прямолинейном движении и полностью реализовать касательную силу тяги колеса с большим коэффициентом сцепления. Однако в реальной ситуации все колеса трактора работают в разных условиях, и при блокировке дифференциала их угловые скорости будут одинаковыми, но пройденные пути различаться. В результате одно колесо будет буксовать, а другое подтягиваться юзом, что вызовет кинематическое несоответствие, потери мощности и дополнительную нагрузку на трансмиссию [16].

Для улучшения тягово-сцепных свойств активно используются следующие решения.

1. Балластирование машины. Этот способ повышает вес машины и, соответственно, касательную силу тяги, создаваемую на движителях. Однако при этом увеличивается давление на почву [17].

2. Перераспределение веса орудия на колеса трактора за счет работы гидравлической системы управления навесным устройством. В этом случае энергия расходуется на работу гидравлической части.

3. Установка спаренных колес. Пятно контакта колеса с поверхностью увеличивается, однако это приводит к большим потерям из-за сопротивления качения колес.

4. Гибкое управление дифференциалом. При своевременной блокировке и разблокировке дифференциала можно частично компенсировать потери в тягообразовании. Но полностью от потерь избавиться невозможно, так как при блокировке дифференциала создается кинематическое несоответствие, начинается циркуляция мощности между колесами и опорной поверхностью [18].

Способ улучшения тягово-сцепных свойств в виде индивидуального привода колес и их гибкого управления не получил широкого применения. Созданы опытные образцы и проведены некоторые исследования в данной области, но конечный вариант подобной системы пока не предложен [19].

Цель исследования. Оценка возможности использования индивидуального привода колес трактора при помощи электрической тяги.

Материалы и методы. Повышение буксования ведущих колес трактора приводит к снижению тягового КПД. Кроме тягового усилия энергия расходуется на преодоление трения и деформацию колеса с опорной поверхностью. Современные технологии позволяют реализовать гибкое управление ведущими колесами с помощью электропривода. Путем оптимизации нагрузки на каждое колесо можно полностью отказаться от использования дифференциала, снизить буксование и проскальзывание.

Для разработки ведущего колеса с индивидуальным приводом необходимо создать алгоритм управления и смоделировать связанные с ним параметры. Потери, вызванные повышенным буксованием и жесткостью трансмиссии, возникают из-за краткосрочного увеличения нагрузки со стороны навесной системы и кинематического несоответствия ведущих колес. Это проявляется в разном расстоянии прохода колес с одинаковой угловой скоростью при жесткой работе трансмиссии. Современные системы электронного управления частично решают данную проблему, отслеживая буксование и другие параметры для динамической стабилизации машины.

Разработан примерный алгоритм управления электроприводом колеса, позволяющий поддерживать заданную частоту вращения колеса при условии постоянства действительной скорости трактора (рис. 1). Действительная и теоретическая скорость различаются поправкой на буксование. Таким образом, при наличии буксования теоретическая скорость будет всегда выше.

На текущий момент предложены несколько способов определения буксования [20]. В алгоритме используется разрабатываемая методика отслеживания краткосрочного ускорения колеса, и с учетом момента инерции системы определяются сцепные свойства поверхности.

Для связи буксования и сцепных свойств колеса вводится условный показатель «фактор буксования» на разных агрофонах. Определив по силе тока, питающего электропривод, крутящий момент на колесе (касательную силу тяги), можно оценить в первом приближении величину буксования.

В реальных условиях при движении машины буксование всегда больше нуля и увеличивается по мере возрастания нагрузки до точки максимального тягового усилия. Это связано с деформацией опорной поверхности и колеса. После достижения порогового значения силы тяги происходит срыв пласта или протектора колеса, и сила трения покоя переходит в силу трения скольжения.

Таким образом, моделирование буксования можно рассматривать как сумму характеристик, полученных путем аппроксимации буксования до и после активного перехода от силы трения покоя. Для первого случая можно использовать уравнение регрессии второго порядка, а для второго – функцию на основе гиперболы. В результате характеристика буксования будет иметь вид:

$$\delta = a_p P_{кр} + b_p P_{кр}^2 + \frac{R}{P_{кр} - P_{кр}} - \frac{R}{P_{кр}}, \quad (1)$$

где a_p и b_p – расчетные коэффициенты, зависящие от условий буксования (почвенный фон, износ протектора и т.д.); R – коэффициент плавности перехода от силы трения покоя к силе трения скольжения; $P_{кр}$ – усилие трактора на крюке; $P_{кр}$ – предельное усилие трактора на крюке при неизменных условиях тягово-сцепных свойств.

В свою очередь, предельная сила на крюке при переходе от силы трения покоя к силе трения качения (соответствует силе при срыве пласта почвы) упрощенно определяется по зависимости:

$$P_{кр} = \sqrt{\frac{\delta_{пр}}{a_p} + \left(\frac{b_p}{2a_p}\right)^2} - \frac{b_p}{2a_p}, \quad (2)$$

где $\delta_{пр}$ – буксование при предельной силе тяги на крюке трактора.

Характеристика буксования трактора обычно определяется для неизменных условий работы, ко-

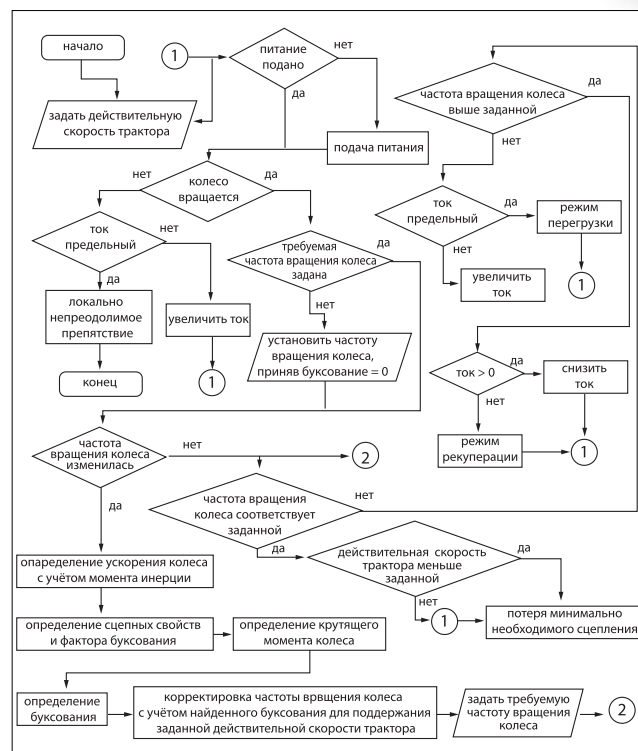


Рис. 1. Блок-схема алгоритма управления электроприводом колеса трактора

Fig. 1. Block diagram of the control algorithm for the electric drive of a tractor wheel

торые описываются коэффициентами a_p и b_p . При варьировании других факторов удобно использовать зависимость, характеризующую тенденцию изменения линии буксования. Для этого задается параметр, связанный с величиной фактора буксования F_6 при определенном режиме работы, который определяет условия изменения коэффициентов:

$$a_p = f(F_6) \text{ и } b_p = f(F_6). \quad (3)$$

Коэффициенты a_p и b_p устанавливаются эмпирическим путем при различных режимах работы трактора, и по ним осуществляется дальнейшее построение характеристики буксования. Эти коэффициенты будут зависеть от многих факторов, в том числе от типа агрофона, рисунка протектора, геометрии колеса, влажности, упругости почвы и т.д. Но для конкретного поля и трактора, а также других условий коэффициенты будут близки к постоянству, а значит ими удобно оперировать в текущих условиях. Причем трактору достаточно начать выполнение работы, и при переходных процессах коэффициенты определяются автоматически посредством электронных систем, содержащих алгоритм управления колесом. По показаниям с нескольких колес определение параметров более достоверное.

Для понимания реального протекания процессов на колесах трактора проведено экспериментальное исследование. Прежде чем реализовать полно-

ценный электропривод колеса с электронным управлением, был проведен анализ процессов на механической системе привода колес, поэтому объектом исследования выбран трактор МТЗ-82.1.

Для определения характера изменения момента на колесе, паразитной мощности и других потерь на колесе предлагается использовать экспериментальную установку (рис. 2).

Установка состоит из дисков с метками, закрепленных на выходных валах заднего моста трактора; датчиков, считывающих метки; динамометра для определения нагрузки на крюке; дополнительного колеса для измерения реальной скорости трактора (рис. 3) по известным методикам [20].

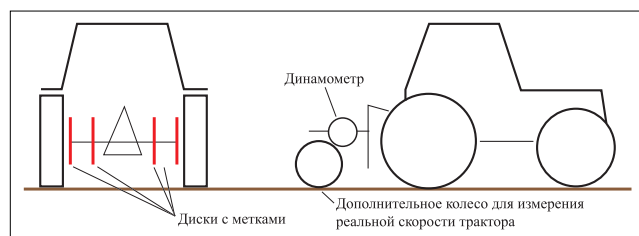


Рис. 2. Схема экспериментальной установки на тракторе

Fig. 2. Diagram of the experimental setup on a tractor



Рис. 3. Вид экспериментальной установки на тракторе МТЗ-82.1. Расположение оптических датчиков с метками на мосту (левый верхний) на валу, детальный вид (правый), дополнительное колесо с датчиком для измерения реальной скорости трактора (левый нижний)

Fig. 3. The experimental setup on the MTZ-82.1 tractor. The location of optical sensors with marks on the bridge (upper left), on the shaft in a detailed view (right), and an additionally extra wheel with a sensor for measuring the actual speed of the tractor (lower left)

На каждый диск диаметром 480 мм нанесены 400 меток, точность поворота диска 0,9 градуса позволяет с необходимой точностью замерить частоту вращения колес. Кроме того, расположение пары дисков на одном валу колеса позволяет измерить крутящий момент по величине скручивания

вала, так как отслеживается взаимный угол поворота одного диска относительно другого. Тяговое усилие измерялось при помощи цифрового тензометрического динамометра с пределом измерения 10 кН, что согласуется с текущими задачами.

Для калибровки измерительного оборудования трактор был установлен на тормозной стенд, в дальнейшем испытания проводились в полевых условиях на различных агрофонах. Трактор загружался прицепными орудиями в зависимости от необходимого тягового усилия.

Результаты и обсуждение. При анализе экспериментальных характеристик буксования трактора МТЗ-82.1 на различных агрофонах были получены коэффициенты a_p и b_p (рис. 4).

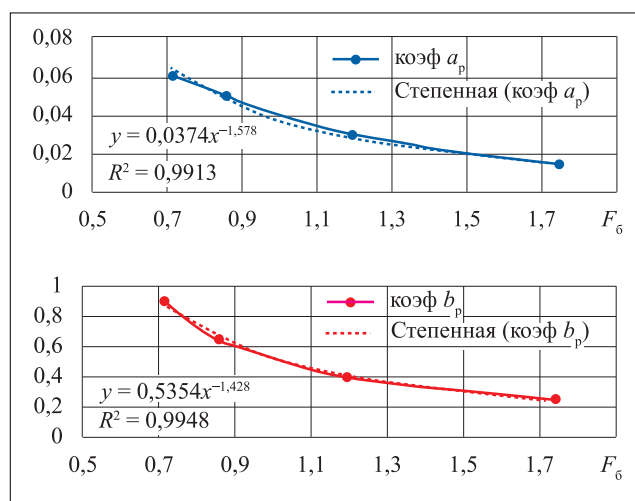


Рис. 4. Аппроксимация зависимости изменения коэффициентов a_p и b_p при работе трактора МТЗ-82.1 на различных агрофонах

Fig. 4. Approximation of the changes in coefficients a_p and b_p when operating the MTZ-82.1 tractor across various agricultural settings

С повышением мягкости агрофона, следовательно, с уменьшением фактора F_6 коэффициенты a_p и b_p увеличиваются. Предельная сила тяги на крюке также может изменяться при различных условиях сцепления колеса с поверхностью и определяться по зависимости от буксования.

Фактор буксования удобно привязать к допустимому буксованию при номинальном тяговом усилии, так как этот параметр для тракторов регламентируется. Фактор буксования можно определить как отношение тягового усилия, при котором буксование соответствует допустимому значению, к номинальному тяговому усилию трактора на крюке (рис. 5):

$$F_6 = P_{кб} / P_{кр}. \quad (4)$$

Если $F_6 = 1$, то на текущей характеристике буксования при достижении тягового усилия, соответ-

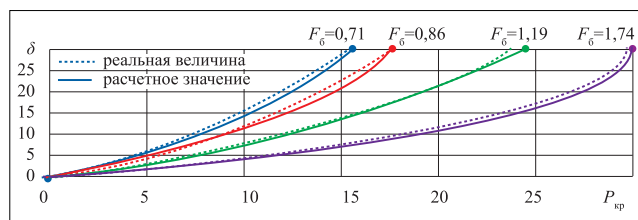


Рис. 5. Реальная и расчетная тяговая характеристика трактора МТЗ-80 по буксованию на различных агрофонах. При $F_6 = 0,71$ фон – поле под посев; при $F_6 = 0,86$ фон – стерня; при $F_6 = 1,19$ фон – залежь; при $F_6 = 1,74$ фон – асфальтовая дорога

Fig. 5. Actual and calculated traction characteristics of the MTZ-80 tractor related to slipping on various agricultural backgrounds. At $F_6 = 0,71$, the background is a seeded field; at $F_6 = 0,86$, the background is stubble; at $F_6 = 1,19$, the background is fallow; at $F_6 = 1,74$, the background is an asphalt road

ствующего номинальному, буксование станет равным допустимому значению. По существующим характеристикам аппроксимацией при постоянном значении коэффициента $R = 10$ получены зависимости коэффициентов:

$$a_p = 0,0374 F_6^{-1,578}, b_p = 0,5354 F_6^{-1,428}. \quad (4)$$

Параметр R в данной ситуации не изменяется при смене агрофона, несмотря на то, что он определяет диапазон крюкового усилия при условном переходе от силы трения покоя колеса к силе трения скольжения. Из полученных зависимостей видно, что каждый тип агрофона соответствует характеризующему его фактору буксования, и точность совпадения характеристик в рабочем диапазоне трактора сравнимо высока (средний коэффициент детерминации 0,98).

В результате измерений и обработки получены также показания с дисковых датчиков (рис. 6). Сплошными линиями на схеме показана работа при начальных условиях без нагрузки, пунктирными – при загрузке правого колеса. На вертикальной шкале отмечены логические уровни датчиков от 0 до 1, на горизонтальной – время в миллисекундах. Красная линия обозначает внешний диск с метками, синяя – внутренний диск с метками на валу.

Нагрузка величиной 3 кН подавалось на правое колесо и фиксировалось динамометром, за вычетом силы сопротивления качению. Левое колесо было без нагрузки.

Результаты приведены в виде логических уровней работы датчика на обнаружение меток для левого и правого колеса. На графике замечен сдвиг между дисками на валу привода правого колеса. Этот сдвиг выражает поворот одного диска относительно другого на одном валу, следовательно, вал при нагрузке на него подвергается скручиванию. В

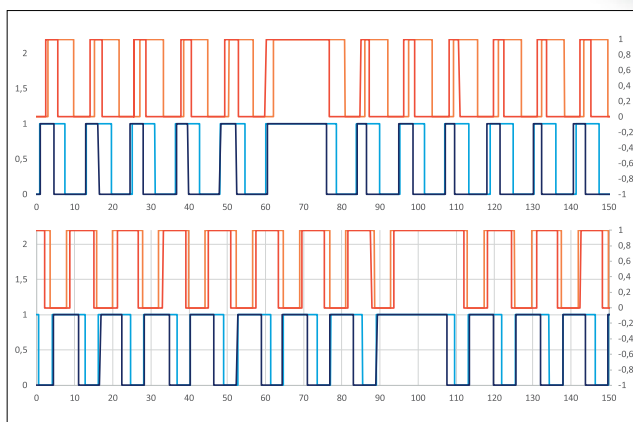


Рис. 6. Взаимное расположение меток дисков при вращении колес трактора: сверху – характеристика поворота дисков правого колеса; внизу – характеристика поворота дисков левого колеса

Fig. 6. The relative position of the disc marks as the tractor wheels rotate: top – the rotation characteristics of the right wheel discs; bottom – the rotation characteristics of the left wheel discs

данной ситуации скручивание составило 0,2 градуса. Нагрузку измеряли динамометром с учетом поправки на сопротивление качению колес трактора. Необходимые результаты можно использовать в дальнейшем для разработки алгоритмов управления индивидуальным приводом колес.

Выводы

Для работы колеса с индивидуальным электрическим приводом предложен алгоритм автоматизированного управления системой, который учитывает условия сцепления колеса с опорной поверхностью.

При полной оценке параметров паразитной мощности станет возможной реализация более точной математической модели, позволяющей создать систему анализа расчетов для ее внедрения в электронную систему управления независимым приводом колес.

Система может быть дополнена под различные задачи, ее математическая реализация имеет практическую ценность при использовании в тракторах электроприводных силовых агрегатов.

Предложенная математическая модель позволяет оценить характеристики буксования трактора при любых других условиях. Для трактора МТЗ-82.1 определен фактор буксования для разных агрофонов при прочих равных условиях: 0,71 – поле под посев, 0,86 – для стерни, 1,19 – для залежи и 1,74 – для асфальтового покрытия.

Диапазон действия модели ограничивается предельной силой тяги на крюке, в данном случае соответствующей буксованию 30%, что актуально для определения параметров работы тракторов.

При управлении колесом с индивидуальным приводом такая модель может быть заложена для опре-

деления тягово-сцепных свойств. Определение параметра по многофакторной характеристике позволит составить программу адаптивных условий для повышения эффективности работы тракторного колеса. Определена возможность замера крутящего момента

на колесе при помощи разработанной системы дисков. В рассматриваемых условиях скручивание вала составило 0,2 градуса при приложении нагрузки 3 кН к одному колесу. Это оправдывает применение такой системы для решения аналогичных задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Кривых Н.С., Беденко А.Е. Преимущества и недостатки электродвигателя в сравнении с ДВС // *Промышленность и сельское хозяйство*. 2023. N10(63). С. 15-17. EDN: RADKQI.
- Касимов Е.А. Технология снижения выбросов ДВС // *Тенденции развития науки и образования*. 2022. N92-9. С. 62-64. DOI: 10.18411/trnio-12-2022-422.
- Ситдииков В.М., Дударева Н.Ю., Ишемгузин А.А., Даутов И.А. Снижение токсичности отработавших газов в камере сгорания двигателя внутреннего сгорания // *Труды НАМИ*. 2022. N4(291). С. 85-95. DOI: 10.51187/0135-3152-2022-4-83-95.
- Бижаев А.В., Девянин С.Н. Снижение токсичности отработавших газов дизеля путем подачи топлива с водой в камеру сгорания // *АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо*. 2019. Т. 18. N12. С. 586-588. EDN: QIUPAC.
- Ощепков П.П., Заев И.А., Смирнов С.В., Бижаев А.В. Исследование биодизельного топлива с добавками пальмового масла и перекиси водорода // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. N3. С. 48-53. DOI: 10.22314/2073-7599-2019-13-3-48-53.
- Кутьков Г.М., Соловейчик А.А., Сидоров М.В. Теория и расчет полноприводного трактора // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2014. Т. 8. N2. С. 8-14. EDN: SDCFRТ.
- Chau K., Chan C., Liu C. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid vehicles. *Transactions on Industrial Electronics*. 2008. 55(6). 2246-2257. DOI: 10.1109/TIE.2008.918403.
- Якушев А.Я., Назирхонов Т.М., Викулов И.П., Марков К.В. Определение основных параметров асинхронного тягового электродвигателя // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2019. Т. 16. Вып. 4. С. 592-601. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-4-592-601.
- Бижаев А.В. Исследование параметров трактора с электроприводным силовым агрегатом // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N4. С. 33-42. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-33-42.
- Бижаев А.В., Девянин С.Н., Чумаков В.Л. Энергетические и экономические параметры работы трактора с электроприводом колёс // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26. N1. С. 53-58. DOI: 10.26897/2687-1149-2024-1-53-58.
- Лепешкин А.В. Опыт использования и перспективы создания многоприводных колесных машин повышенной проходимости // *Известия МГТУ МАМИ*. 2010. N2 (10). С. 54-65. EDN: NCCXTP.
- Лепешкин А.В. Показатели оценки эффективности передачи и преобразования энергии трансмиссией и двигателем колесной машины // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2014. N11. С. 29-35. EDN: UAHLQF.
- Köller S., Uerlich R., Westphal C., Franck M. Design of an electric drive axle for a heavy truck. *ATZheavyduty worldwide*. 2021. 14. 20-25. DOI: 10.1007/s41321-021-0420-8.
- Лустенков М.Е. Исследование кинематических и силовых характеристик автомобильного дифференциала повышенного трения // *Актуальные вопросы машиноведения*. 2022. Т. 11. С. 7-10. EDN: CINQRZ.
- Анчуков В.В., Алюков А.С. Имитационное моделирование системы автоматического управления блокировкой дифференциалов грузовых автомобилей // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. 2018. Т. 18. N3. С. 68-79. DOI: 10.14529/engin180308.
- Прядкин В.И., Гудков В.В., Сокол П.А. Анализ подходов по исследованию явления циркуляции мощности в трансмиссии полноприводного автомобиля // *Лесотехнический журнал*. 2019. Т. 9. N3(35). С. 205-224. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.3/19.
- Иовлев Г.А., Побединский В.В., Ильин М.А. и др. Особенности баллаستирования сельскохозяйственных тракторов различных тяговых классов // *Известия Международной академии аграрного образования*. 2022. N61. С. 42-53. EDN: NEEQYS.
- Горшков Ю.Г., Калугин А.А., Золотых С.В. Средняя вероятностная оценка проходимости сельскохозяйственной техники в условиях деформируемых грунтов // *Научная жизнь*. 2018. N3. С. 67-74. EDN: ХРСКЕН.
- Косицын Б.Б., Котиев Г.О., Мирошниченко А.В. и др. Определение характеристик трансмиссий колёсных и гусеничных машин с индивидуальным электроприводом ведущих колёс // *Труды НАМИ*. 2019. N3(278). С. 22-35. EDN: JUOYZM.
- Иванов А.Б., Таркинский В.Е., Ревенко В.Ю. К вопросу определения буксования сельскохозяйственных тракторов // *Техника и оборудование для села*. 2021. N3(285). С. 14-19. DOI: 10.33267/2072-9642-2021-3-14-18.

REFERENCES

- Krivykh N.S., Bedenko A.E. Advantages and disadvantages of an electric motor in comparison with an internal combustion engine. *Industry and Agriculture*. 2023. N10(63). 15-17 (In Russian). EDN: RADKQI.
- Kasimov E.A. Technology for reducing internal combustion engine emissions. *Trends in the development of science*

- and education. 2022. N92-9. 62-64 (In Russian). DOI: 10.18411/trnio-12-2022-422.
3. Sitdikov V.M., Dudareva N.Yu., Ishemguzhin A.A., Dautov I.A. Emission control and reduction in the combustion chamber of an internal combustion engine. *Trudy NAMI*. 2022. N4(291). 85-95 (In Russian). DOI: 10.51187/0135-3152-2022-4-83-95.
 4. Bizhaev A.V., Devyanin S.N. Diesel exhaust gas toxicity reduction by supplying fuel with water to the combustion chamber. *AutoGasFilling Complex + Alternative Fuel*. 2019. Vol. 18. N12. 586-588 (In Russian). EDN: QIUPAC.
 5. Oshchepkov P.P., Zaev I.A., Smirnov S.V., Bizhaev A.V. Study of biodiesel fuel with palm oil and hydrogen peroxide additives. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2019. Vol. 13. N3. 48-53 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2019-13-3-48-53.
 6. Kutkov G.M., Soloveitchik A.A., Sidorov M.V. Theory and calculation of an all-wheel drive tractor. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2014. Vol. 8. N2. 8-14 (In Russian). EDN: SDCFR7.
 7. Chau K., Chan C., Liu C. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008. 55(6). 2246-2257 (In English). DOI: 10.1109/TIE.2008.918403.
 8. Yakushev A.Ya., Nazirkhonov T.M., Vikulov I.P., Markov K.V. Determination of the main parameters of an asynchronous traction electric motor. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2019. Vol. 16. N4. 592-601 (In Russian). EDN: LBZMYU.
 9. Bizhaev A.V. Research of tractor power unit with electric drive parameters. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N4. 33-42 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-33-42.
 10. Bizhaev A.V., Devyanin S.N., Chumakov V.L. Energy and economic operating parameters of tractor equipped with electrically driven wheels. *Agricultural Engineering*. 2024. Vol. 26. N1. 53-58 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2024-1-53-58.
 11. Lepeshkin A.V. Experience in the use and prospects for the creation of multi-wheel wheeled vehicles with increased cross-country capability. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2010. N2 (10). 54-65 (In Russian). EDN: NCCXTP.
 12. Lepeshkin A.V. Indices for efficiency estimation of energy transfer and conversion by transmission and mover of wheeled vehicle. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2014. N11. 29-35 (In Russian). EDN: UAHLPQ.
 13. Köller S., Uerlich R., Westphal C., Franck M. Design of an electric drive axle for a heavy truck. *ATZheavy duty world wide*. 2021. 14. 20-25 (In English). DOI: 10.1007/s41321-021-0420-8.
 14. Lustenkov M.E. Study of the kinematic and power characteristics of an automobile limited-slip differential. *Current issues of machine science*. 2022. Vol. 11. 7-10 (In Russian). EDN: CINQRZ.
 15. Anchukov V.V., Alyukov A.S. Simulation modeling of the automatic control system for differential locks of trucks. *Bulletin of the South Ural State University*. 2018. Vol. 18. N3. 68-79 (In Russian). DOI: 10.14529/engin180308.
 16. Pryadkin V.I., Gudkov V.V., Sokol P.A. Analysis of approaches to research the phenomenon of power circulation in a transmission of all-wheel-drive vehicle. *Forestry Engineering Journal*. 2019. Vol. 9. N3(35). 205-224 (In Russian). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.3/19.
 17. Iovlev G.A., Pobedinsky V.V., Ilyin M.A. et al. Features of ballasting agricultural tractors of different traction classes. *Proceedings of the International Academy of Agrarian Education*. 2022. N61. 42-53 (In Russian). EDN: NEEQYS.
 18. Gorshkov Yu.G., Kalugin A.A., Zolotykh S.V. Average probabilistic assessment of the patency of agricultural machinery in conditions of deformable soils. *Scientific Life*. 2018. N3. 67-74 (In Russian). EDN: XPCKEH.
 19. Kositsyn B.B., Kotiev G.O., Miroshnichenko A.V. et al. Characterization of transmissions of wheeled and tracked vehicles with individual drive wheels. *Trudy NAMI*. 2019. N3(278). 22-35. EDN: JUOYZM.
 20. Ivanov A.B., Tarkivsky V.E., Revenko V.Yu. To the issue of determining agricultural tractor slipping. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021. N3(285). 14-19 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2021-3-14-18.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Бижаев А.В. – разработка методики исследования, анализ экспериментов данных, научное руководство;
Ветрова С.М. – формирование характеристик по результатам эксперимента, редактирование графической части;
Барчукова А.С. – изучение состояния вопроса, анализ литературы;
Кривых Н.С. – проведение экспериментов для снятия характеристик с трактора, обработка полученных данных.
Авторы одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Bizhaev A.V. – development of research methodology, analysis of experimental data, scientific supervision;
Vetrova S.M. – formation of characteristics based on the experimental results, graphical content editing;
Barchukova A.S. – investigating the current state of the topic, literature review;
Krivyykh N.S. – conducting experiments to obtain tractor characteristics, collected data processing.
The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

01.04.2024

21.05.2024