

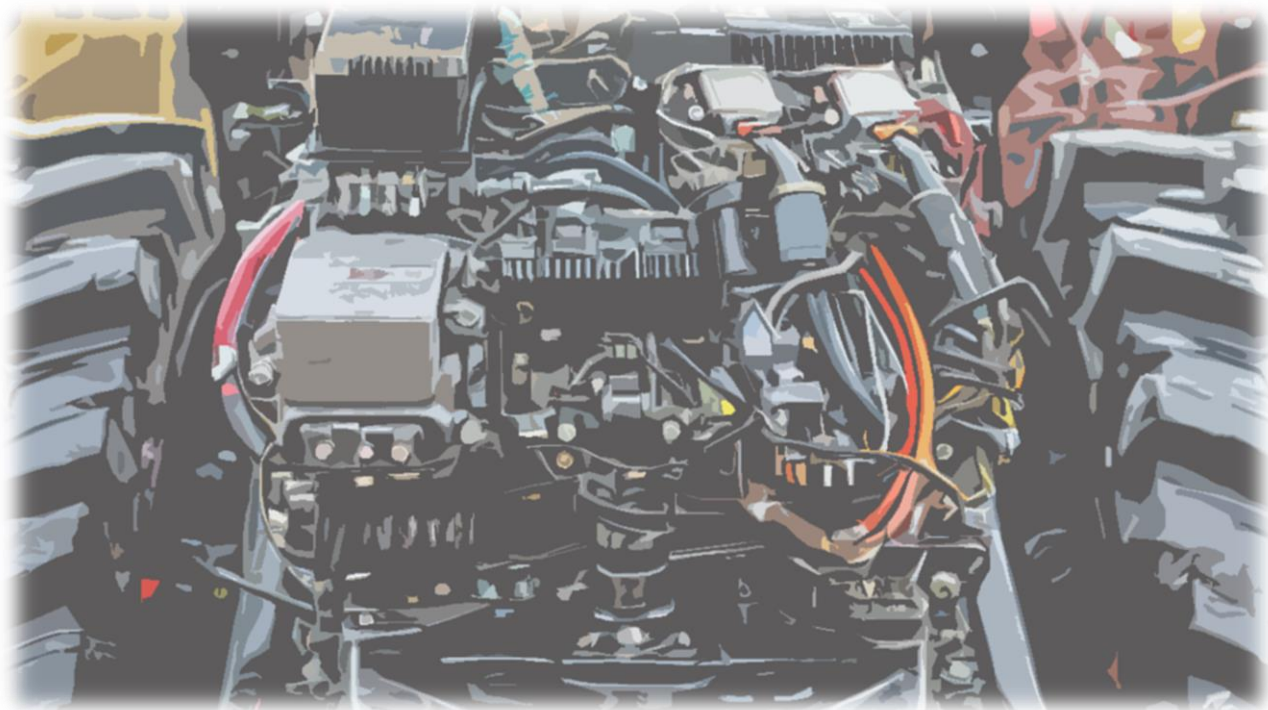


МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»
(ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева)

Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина

Бижаев Антон Владиславович

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТРАКТОРОВ МАЛОГО
ТЯГОВОГО КЛАССА В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ**



УДК 631.31-83

ББК 40.74

Б59

Бижаев А.В. Перспективы использования электротракторов малого тягового класса в сельском хозяйстве. –М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2024. 38 с.

Рецензент: Кабдин Н.Е. к.т.н., доцент кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

ISBN 978-5-9675-2054-9

В данной работе рассматривается проблема токсичности газов двигателей внутреннего сгорания тракторов малого тягового класса, работающих в ограниченных объемных пространствах, таких как животноводческие фермы и теплицы. Предлагается решение этой проблемы с помощью электропривода для тракторов малого тягового класса. При разработке такой машины важным элементом является обоснование ее характеристик. Важной частью проблемы является также выбор общей конструкции энергоблока и вида использования энергии.

Рассматриваются варианты гибридной машины и полностью электрического трактора. В качестве источников электроэнергии рассматриваются элементы временного хранения заряда, наиболее перспективными из них являются конденсаторы, ионисторы и литий-ионные аккумуляторные батареи.

Сравниваются тяговые характеристики тракторов, имеющих различный тип привода силового агрегата. При этом сравнивается дизельный двигатель с электродвигателем постоянного тока и асинхронным. Оцениваются показатели эффективности их работы и стоимость энергозатрат по отношению к тяговому усилию, что с совокупности позволяет определить наиболее актуальный выбор привода силовой установки.

© Бижаев А.В.

©Издательство РГАУ-МСХА, 2024

Оглавление

Введение	4
Состояние вопроса использования электротракторов	6
Оценка элементов компоновки электрических тракторов.....	10
Общие подходы к вопросу энергозатрат электротрактора	13
Влияние типа силового агрегата на характеристики трактора	19
Возможность повышения тягово-сцепных свойств электротракторов.....	25
Заключение	34
Список литературы	37

Введение

В современном сельскохозяйственном производстве предъявляются высокие требования к тракторной технике и выполнению агротехнических операций. Производители тракторов стремятся повысить тяговый КПД, снизить токсичные выбросы отработавших газов (ОГ) двигателя в атмосферу, уменьшить давление на почву, а также улучшить потребительские свойства трактора, такие как цена, эргономичность, шумность, вибрация и т.д.

В тепличных хозяйствах и других крытых помещениях в АПК особое значение имеет проблема выбросов токсичных компонентов в среду помещения. Это негативно влияет на живые организмы, находящиеся внутри, в том числе и на человека, приводя к различным заболеваниям, что в конечном результате влечёт за собой снижение темпов производства. Тракторы в таких помещениях могут выполнять различные задачи, включая возделывание тепличных культур и работать на кормораздаче в фермерских помещениях.

Для решения проблемы токсичности разрабатываются новые подходы. Наиболее распространенными способами являются использование нейтрализаторов, совершенствование процесса сгорания топлива в двигателе, применение альтернативного топлива, такого как масла, спирты, эфиры, водотопливные эмульсии и т.д. [1,2].

Современный технологический уровень позволяет разрабатывать сложные электронные компоненты, совершенствуя автоматизированные системы управления. Это открывает возможность для решения проблемы снижения токсичных выбросов путем внедрения системы электрической тяги в силовой агрегат трактора.

Идея использования электрической тяги на мобильных машинах зародилась еще в 19 веке с изобретением электродвигателей постоянного тока. В России тенденция развития тракторной техники с применением электропривода для реализации тяги на крюке получила распространение в 1930-х годах. Вопросом разработки тракторов на электрической тяге занимался доктор технических наук Листовым П. Н. и инженер Стеценко В. Г. во всесоюзном институте электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ). Первый

электротрактор был создан на базе гусеничного СХТЗ-НАТИ (Рисунок 1), старый двигатель внутреннего сгорания у которого заменили на электродвигатель мощностью 38 кВт, на напряжение 1000 Вольт трехфазного переменного тока. На раму трактора установили барабан с гибким кабелем. Электромотор и кабельный барабан были защищены обтекаемым капотом. Кабель подсоединялся к полевой электростанции или передвижной трансформаторной подстанции,

подключенной к высоковольтной сети, и в процессе работы наматывался и разматывался специальным механизмом с направляющей стрелой.

Подстанция подключалась напрямую к высоковольтным проводам посредством токосъемной



Рисунок 1 – Электротрактор ВИЭСХ на базе СХТЗ-НАТИ

мачты. Длина кабеля вместе со стрелой - до 750 метров. Без перемещения подстанции трактор мог обрабатывать 15-60 гектар земли, а при использовании дополнительной кабельной тележки - свыше 200 га. Трактор обслуживался одним трактористом. Одними из первых работоспособных тракторов на электротяге российского производства стали модели ВИМЭ-2. Однако низкий технологический уровень того времени препятствовал дальнейшему развитию разработок в этом направлении [3]. Главными проблемами были высокая масса и габариты машины, низкий КПД, а также проводная система передачи электрической энергии. В итоге проект пришлось закрыть.

На современном этапе идея создания трактора на электрической тяге вновь стала актуальной и получила более широкое распространение. Это связано с рядом факторов, включая ужесточение экологических норм, развитие технологий производства электробатарей, электродвигателей полупроводниковых технологий и электроники, а также растущий спрос на экологически чистую сельскохозяйственную технику [4].

Состояние вопроса использования электротракторов

На первый взгляд электрические тракторы имеют ряд преимуществ перед традиционными моделями, работающими на дизельном двигателе. Они более экологичны в зоне использования, поскольку не производят вредных выбросов в атмосферу. Электрические тракторы также более тихие и имеют более плавный ход, что делает их более комфортными для оператора. Кроме того, электрические тракторы имеют более высокий КПД, меньшее количество смазываемых узлов и не требуют заправки топливом, что определяет их благоприятные экологические свойства.

Однако электрические тракторы также имеют ряд недостатков. Они более дорогие, чем дизельные модели, и имеют меньший запас хода, в среднем 4-6 часов при полной загрузке. Кроме того, инфраструктура для зарядки и обслуживания электрических тракторов не получила достаточного развития, как для электромобилей, что необходимо для полноценного их внедрения в сельскохозяйственное производство.

Кроме этого, проблемы токсичности электротракторов переносятся на выбросы электростанций, работающих на углеводородном топливе. Так как электрическая энергия, требуемая для зарядки аккумуляторов электротракторов, образуется вследствие работы ДВС электростанции, токсичность в зоне её расположения возрастёт. Также нет однозначных решений проблемы с утилизацией литий-ионных аккумуляторных батарей.

Несмотря на эти недостатки, электрические тракторы имеют большой потенциал для использования в сельском хозяйстве. По мере развития технологий и снижения стоимости производства электрических тракторов, они будут становиться все более популярными среди фермеров.

Некоторые производители тракторов реализовали идею создания машин с электроприводным силовым агрегатом и мобильным источником электрической энергии на борту. Впоследствии, тракторы, на которых использовался электропривод в качестве источника механической энергии, получили название электротракторов. Источником энергии в них может быть

как аккумуляторная батарея, так и ДВС с сочлененным генератором, что делает машину гибридной.

К уже существующим электротракторам можно отнести Edison model 1 на базе ХТЗ-2511 (Рисунок 2) и модель, созданную компанией MOBEL на базе



Рисунок 2 – Edison model 1 на базе ХТЗ-2511

Беларус-920 (Рисунок 3) и имеющим изначальную стоимость порядка 20 тысяч долларов. Зарубежные фирмы также не отстают в этой области: John Deere сконструировал электротрактор SESAM (Рисунок 4), а Fendt выпустила модель e100 Vario (Рисунок 6). В 2022 году был запущен в серию американский электротрактор Monarch Tractor (Рисунок 5), средней мощностью 30 кВт, а пиковой – 55 кВт и среднем временем работы около 7,5 часов. Стоимость такого

трактора составляет 50-90 тысяч долларов, в зависимости от комплектации. Среднее время зарядки аккумуляторов производимых электротракторов составляет порядка 2-5 часов, в зависимости от ёмкости батарей, при этом заявленное время работы составляет 2-7,5 часов. Режим работы тракторов при этом не уточняется.

Переход трактора на электрическую тягу позволяет добиться более гибкого управления системой, так как технологический уровень электронных узлов позволяет это реализовать. Это открывает возможность для автономного управления машиной. Некоторые компании, включая John Deere или МТЗ, уже реализуют эту возможность. Однако, это направление находится на раннем этапе



Рисунок 3 – Электротрактор фирмы MOBEL Беларус-920

развития, поэтому массового серийного производства таких тракторов пока не существует.



Рисунок 4 – John Deere модель Sesam

Многие электротракторы находятся на стадии опытных образцов или мелкосерийного производства. Для полной реализации проекта электротрактора необходимо разработать не только требования к системам этой машины, но и концепцию в целом [5].

При рассмотрении возможности приобретения электротрактора для малого хозяйства возникает проблема высокой удельной стоимости трактора по отношению к его весу. Это связано в первую очередь с аккумуляторными батареями, необходимыми для обеспечения электропривода энергией. Второе место по цене занимает сама система электропривода и управляющая электроника.



Рисунок 6 – Электротрактор Fendt модель e100 Vario.

Несмотря на высокую цену, эффективность использования электропривода по энергозатратам сравнительно высока. КПД современных электродвигателей в пике составляет 90-96%, что значительно выше, чем КПД дизельных двигателей, который обычно находится в диапазоне 40-45% в номинальных режимах работы [6,7]. Эффективность электротракторов является более высокой даже с учётом КПД аккумуляторных батарей, составляющий 60-94%, в зависимости от режимов эксплуатации



Рисунок 5 – Monarch Tractor

[8]. Следует отметить, что оценка производится только с точки зрения эффективности энергозатрат. При оценке их стоимости, для тракторов с различным силовым агрегатом необходимо исходить из стоимости топлива и электрической энергии.

Однако, цена дизельного двигателя остается ниже, чем для электроприводных систем. Кроме того, силовой агрегат с ДВС в целом занимает меньше объема по сравнению с аккумуляторной системой, что создает дополнительные сложности размещения электроприводных систем на борту.

Для тепличных или фермерских помещений обычно используются тракторы малых тяговых классов с малой мощностью. Габариты таких тракторов малы, что затрудняет размещение в них дополнительных систем, в том числе и устройств электроприводной системы.

Механическая трансмиссия на малых машинах имеет больший КПД по сравнению с электрической. Поэтому установка электрической трансмиссии на тракторах таких габаритов и мощностей нецелесообразна. Электрическая трансмиссия обычно устанавливается на мобильных машинах большой мощности и габаритов, где использование механической трансмиссии нерационально из-за более низкого КПД и больших инерционных масс [9]. К таким машинам можно отнести тракторы промышленного назначения ДЭТ-250, обеспечивающих тяговое усилие 250кН, и некоторые модели карьерных самосвалов БелАЗ.

Кроме того, с учетом особенностей характеристик некоторых электродвигателей при использовании современных электронных автоматизированных систем управления исчезает необходимость в оснащении



Рисунок 7 – Трактор с электрической трансмиссией ДЭТ-250

большим количеством передач на мобильных машинах, а в некоторых случаях и коробкой передач в принципе. Это обеспечивается благодаря широкому

диапазону высоких значений КПД на характеристиках электродвигателей приводных систем и гибкости электронного управления, обеспечивающего планомерность перехода от одного режима к другому.

Оценка элементов компоновки электрических тракторов

Исследование материалов и методов к конструированию электротракторов требует не только тщательного анализа, но и обдуманного подхода к выбору оптимального решения. Для успешного решения возникающих проблем необходимо найти компромиссное решение, учитывающее технические требования, функциональное назначение и приемлемые условия рыночной конкуренции. Таким образом, задача сводится к обеспечению электротрактора необходимыми эксплуатационными и потребительскими свойствами.

По меньшей мере необходимо начать с определения спектра задач электротрактора, которые он будет выполнять, а затем определить оптимальную схему компоновки его силового агрегата. Наиболее рациональное использование на текущем этапе технологического уровня может обеспечиваться при выполнении трактором работ в помещениях с ограниченной вентиляцией. Выполнение агротехнических операций в полевых условиях, особенно требуемых высоких тяговых усилий, ограничивает применение подобных тракторов на фоне существующих тракторов с механическим приводом. Но, несмотря на это, совершаются попытки их внедрения и в эту область.

Для таких задач обычно используются классические компоновки трактора, при которой двигатель находится спереди от кабины. При использовании электроприводных технологий целесообразно определить также расположение крупных исполнительных узлов. Существует множество вариантов компоновок систем, начиная с традиционного размещения двигателя внутреннего сгорания в подкапотном пространстве до использования электродвигателей в каждом колесе с соответствующими системами. В случае наличия нескольких двигателей с различным типом потребляемой энергии, трактор классифицируется как гибридный.

Гибридный трактор представляет собой переходную форму между традиционным трактором с ДВС и механическим приводом и трактором, приводимым электроприводом, питающегося от устройства хранения электрического заряда на борту (например, аккумуляторами). Рассматривая гибридный трактор в качестве объекта исследования, можно выделить как преимущества, так и недостатки по сравнению с тракторами, оснащенными дизельными двигателями с механическим приводом и электроприводными системами с электрическим накопителем энергии. Для более детального анализа сравнительных характеристик рассматриваются и сравниваются данные из различных источников (Таблица 1) [7-12].

Таблица 1

Сравнение основных параметров тракторов с различными типами силовых агрегатов

Рассматриваемый параметр	Типы тракторов		
	С дизельным ДВС	Гибридный	Электротрактор с АКБ
КПД силового агрегата	1	2	3
Токсичность	1	2	3
Цена трактора	3	2	1
Габариты системы	3	2	1
Сложность конструкции	3	1	2
Рекуперация энергии	1	3	3
Шумность	1	2	3
Вибрации	1	2	3
Скорость заправки/зарядки	3	3	1
Инфраструктура обслуживания	3	2	1
Требования к обслуживанию	3	2	2
Сумма показателей	23	23	23

Оценка производится ранжированием, где: 3 – более благоприятное значение, 1 – негативный уровень показателя, 2 – показатель со средним значением оценки параметра.

Гибридные системы в мобильных машинах обычно нацелены на использование в условиях неустановившегося движения с целью рекуперации мощности для последующего использования. Этот подход чаще всего применяется в городском цикле движения, которое соответствует значительному времени работы легковых и грузовых автомобилей. В отличие от этого, при выполнении агротехнических операций тракторы редко подвергаются частым торможениям и разгонам, а основные динамические воздействия происходят из-за колебаний нагрузки со стороны орудия.

Примером такого гибридного трактора является модель, разработанная на базе трактора ВТЗ-2048А с мощностью 33 кВт в Российском государственном агроинженерном университете – Московской сельскохозяйственной академии имени К.А. Тимирязева в 2008 году по заказу Министерства сельского хозяйства РФ. Принцип работы этого трактора заключается в быстром накоплении и отдаче энергии во время колебаний нагрузки на двигатель. В данном случае в качестве накопителей энергии использовались ионисторы или суперконденсаторы, более дорогие в эксплуатации на единицу энергии по сравнению с перспективными аккумуляторными источниками, такими как li-ion батареи [4,13].

Для работы трактора в теплицах и других помещениях с ограниченной вентиляцией более важным фактором является отсутствие токсичных выбросов от двигателя, чем компенсация колебаний нагрузки. Особенность трактора с гибридным силовым агрегатом заключается в его способности работать не только в режимах компенсации и рекуперации энергии, но и в режимах, где трактор может функционировать либо только при работе ДВС, либо только на электрической тяге от аккумуляторов. Это позволяет снизить токсичность выбросов, используя электротягу внутри помещений и переключаясь на дизельный двигатель за их пределами. Для обеспечения электропривода необходимы элементы для временного хранения заряда, соответствующие требованиям систем трактора.

Анализ технических документаций различных элементов временного хранения заряда, которые могут служить источниками питания для электропривода, показывает, что их характеристики и цены различаются (Таблица 2), поэтому выбор оптимального варианта является важным шагом в процессе разработки электроприводной системы трактора.

Таблица 2

Основные характеристики элементов временного хранения заряда

Параметр	Электролитические конденсаторы	Ионисторы (Суперконденсаторы)	li-ion АКБ (различные типы)
Энергоёмкость, Втч/кг	0,05-0,2	4 -32	120-280
Энергоёмкость, кДж/кг	0,18-0,72	14,4-115,2	432-864
Цена р/кДж	650-5000	130-2300	5-45

Параметр	Электролитические конденсаторы	Ионисторы (Суперконденсаторы)	li-ion АКБ (различные типы)
Цена р/кг	150-3600	15000-32000	4200-17400
Количество полных циклов заряда/разряда до потери 20% ёмкости	1000000-5000000	500000-1000000	600-15000
Диапазон рабочих t°C	-50...125	-40...75	-20...65
Среднее время зарядки, сек	0,1...2	5-30	900-1800

Современные литий-ионные аккумуляторные батареи отличаются большим запасом энергии по сравнению с ионисторами и являются более экономичными с точки зрения энергетического запаса. Ионисторы, в свою очередь, занимают промежуточное положение между аккумуляторами и конденсаторами по физическому принципу действия [14]. По сравнению с литий-ионными аккумуляторами, ионисторы обладают более быстрой скоростью зарядки и способны обеспечивать большие токи, хотя для длительных режимов работы это свойство не является главным. Тем не менее, стоимость единицы энергии ионистора выше. Электролитические конденсаторы обладают большим ресурсом, широким диапазоном рабочих температур и низкой ценой за единицу веса, но их энергоёмкость сравнительно низкая, что является основным недостатком при их выборе в качестве источников питания для электропривода трактора.

Наиболее перспективными элементами, обладающими высокой энергоёмкостью и другими приемлемыми параметрами, являются li-ion аккумуляторы. Современные li-ion аккумуляторы способны выдерживать около 15000 циклов зарядки-разрядки до того, как потеряют 20% ёмкости, а их КПД может превышать 95% [13,15]. Эти аккумуляторы могут быть заряжены от энергии дизельного двигателя через генератор и выдавать эту энергию по необходимости в систему электропривода.

Общие подходы к вопросу энергозатрат электротрактора

Рассматривая ситуацию, в которой будет обеспечиваться работа трактора в помещениях с ограниченной вентиляцией, следует учитывать, что его габариты, как и мощность двигателя не должны быть велики. Для тракторов

малого тягового класса при подобных задачах мощность двигателя может находиться в диапазоне 10-60 кВт. Поэтому при сравнении параметров двигателей различного типа необходимо рассматривать одинаковые категории тракторов, эксплуатируемых в идентичных условиях. Анализируя различные группы дизельных двигателей и вентильных электродвигателей, которые возможны к использованию в качестве привода агрегата, можно сравнить их основные параметры (Таблица 3) [16-18].

Таблица 3

Сравнение основных параметров дизельного и электрического двигателей

Параметр	Вид двигателя для привода силового агрегата	
	Дизельный двигатель	Электродвигатель
Эффективный КПД	40-50%	80-96%
Удельная мощность	0,1-0,6 кВт/кг	2-5 кВт/кг
Рыночная цена за кВт	1,5-8 тыс.руб/кВт	3,5-15 тыс.руб/кВт
Рабочая температура	80-100 С°	-50-50 С°
Предельная температура	120-130 С°	60-95 С°

Из обзорного анализа двигателей, состоящих в одинаковых мощностных диапазонах видно, что их основные параметры и ценовые категории различны. Эффективность работы вентильного электродвигателя выше практически в 2 раза чем у дизельного двигателя, а удельная мощность выше 5-10 раз. Рабочие и предельные температуры таких электродвигателей находятся в пределах адекватных значений, поэтому обеспечить их поддержание не требует больших трудозатрат. Это оправдывает перспективу использования вентильных двигателей в качестве привода силовых агрегатов мобильных машин.

Рыночная стоимость рассматриваемых электродвигателей выше в 1,5-2 раза, и имеет разброс примерно в 11,5 тыс. руб./кВт, что объясняется различиями в материалах изготовления, сроках службы, производителе изделия и комплектующих и т.д. Более высокая цена чем у дизеля за киловатт мощности не является основной проблемой при внедрении вентильных электродвигателей в производства тракторов. Проблемы массового использования

электродвигателей связаны в первую очередь с хранением электрической энергии на борту трактора, а также с низким мировым электроэнергетическим потенциалом, составляющим на 2022 год в РФ приблизительно 1200 млрд. кВт·ч, при этом предельное потребление электроэнергии, ограничиваемое электростанциями составляет около 1500 млрд. кВт·ч [19]. Таким образом, условный запас электропотребления составляет примерно 300 млрд. кВт·ч, который потенциально в данный момент можно использовать для эксплуатации электроприводных тракторов. Исходя из данных за 2017 г., потребление дизельного топлива в России по данным министерства энергетики держится практически на одном уровне и составляет 33 млн. тонн в год. Доля топлива, используемая в сельском хозяйстве, составляет примерно 18-25% от общего объёма, то есть 5,9-8,3 млн. тонн в год. При работе дизельного двигателя можно определить количество энергии, требуемое для преобразования в механическую работу из потребляемого топлива, зная базовые параметры процесса.

$$W = \frac{H_u \cdot G_w \cdot \eta_d \cdot \eta_{\varepsilon}}{K_t},$$

где, H_u – низшая удельная теплота сгорания дизельного топлива ($H_u \approx 42$ МДж/кг); G_w – весовое потребление топлива за год, кг; η_d – КПД дизельного двигателя ($\eta_d \approx 0,4$); η_{ε} – КПД электродвигателя ($\eta_{\varepsilon} \approx 0,9$); K_t – коэффициент времени для приведения в систему СИ ($t = 3600$).

Таким образом, количество электрической энергии, преобразованной в механическую работу дизельным топливом за год в сельскохозяйственном секторе, можно оценить в размере 24,8-34,9 млрд. кВт·ч, что составляет примерно 10% от запаса производства электроэнергии. Учитывая динамику использования сельскохозяйственной техники по месяцам известно, что до 60% работ от общего объёма приходится на весенний период и начало осеннего. При этом максимальная месячная доля топлива от общего годового объёма может достигать 35%. Исходя из этих данных можно определить предельное месячное потребление энергии.

$$W_{max} = \frac{H_u \cdot G_w \cdot \tau \cdot \eta_d \cdot \eta_{\varepsilon}}{K_t},$$

где, τ – доля топлива, израсходованного в самый нагруженный месяц ($\tau = 0,35$).

В этом случае максимальное потребление энергии может составить 8,7-12,2 млрд. кВт·ч за 1 месяц. Следует учитывать, что энергия, производимая электростанциями в месяц, составляет 1/12 часть от общего свободного объёма и составляет 25 млрд. кВт·ч, что в 2-3 раза больше, чем максимальное месячное потребление энергии. Это указывает на возможность перехода тракторов на электропривод силового агрегата, однако без дальнейшего развития энергетических комплексов использование электродвигателей в тракторах при потреблении энергии от внешней сети будет невозможно.

Использование комбинированных энергоустановок на тракторах является менее требовательным вариантом, так как не требует постоянной зарядки от внешней сети. Такой трактор может содержать в силовой установке дизельный и электрический двигатель, работающие в совокупности, поэтому в таком случае возникает только проблема выбора накопителей электрического заряда и компоновки элементов машины [11,20].

Работа гибридного или полностью электроприводного трактора сводится к определённому набору операций, включая работы в крытых помещениях. С целью устранения токсичных выбросов ОГ в помещениях с ограниченной вентиляцией трактор вынужден работать на приводе от электродвигателя. При этом должны обеспечиваться его рабочие функции. Все рабочие характеристики трактора, включая тяговую, зависят прежде всего от характеристик двигателя, его параметров и режима работы.

Анализ вопроса оценки энергозатрат должен рассматриваться на базовой модели. Для трактора низкого тягового класса, способного работать в теплицах или в фермах на кормораздаче можно выбрать мощность двигателя 20 кВт и взять в качестве прототипа трактор ВТЗ-2032, соответствующий этому параметру. Для оценки параметров эффективности трактора, необходимо проанализировать характеристику вентильного электродвигателя в сравнении с характеристикой дизеля эквивалентной мощности, так как он является базовым в комплектации трактора. Характеристики вентильного электродвигателя и

дизельного двигателя различаются, однако их можно приближённо смоделировать исходя из физических законов и аппроксимации по эмпирическим показателям [16,18]. Удобнее всего рассматривать скоростную характеристику двигателя (Рисунок 8) с изменением различных показателей от частоты вращения n , мин^{-1} . За базу для моделирования были взяты характеристики дизельного двигателя Д-120, и бесколлекторного электродвигателя постоянного тока с неодимовыми магнитами типа НРМ20КВ номинальными мощностями 20 кВт соответственно.

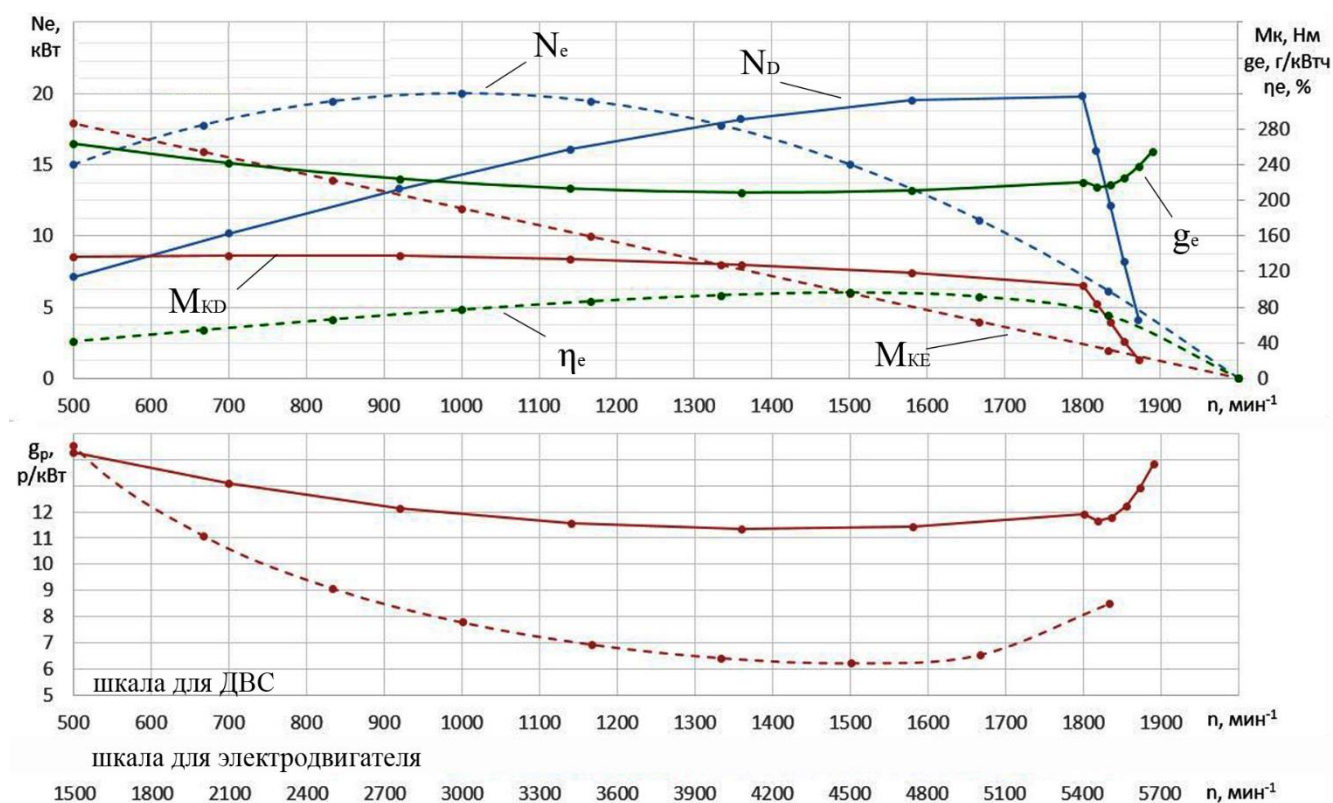


Рисунок 8 – Скоростные характеристики дизельного и электрического бесщёточного двигателей. Где: пунктиром (- - - -) обозначены характеристики электрического двигателя, сплошной линией (—) обозначены характеристики дизельного ДВС; N_e , N_D – выходные мощности дизельного и электрического двигателя соответственно; M_k – крутящий момент двигателей; g_e – удельный эффективный расход топлива ДВС; η_e – КПД электродвигателя; g_p – удельная энергостоймость.

Одним из основных показателей работы двигателей являются энергозатраты для образования единицы мощности. Для ДВС эффективность оценивается удельным эффективным расходом топлива g_e , показывающий количество затрачиваемого топлива, требуемого для производства единицы

мощности за единицу времени [16]. В электроприводе такого показателя не существует, и его эффективность обычно оценивают по КПД (η_3). В отличие от мощности и крутящего момента, которые легко сравнить между собой возникает проблема единого подхода к оценке и сравнения показателей эффективности работы двигателей различного типа.

Для решения проблемы разработана общая концепция подхода к данному вопросу. Концепция представляет собой использование единого коэффициента g_p , характеризующего эффективность работы двигателя путём оценки удельных материальных затрат на энергию или топливо, для производства им единицы мощности. Данный коэффициент может отличаться при изменении цен на топливо или тарифов на электроэнергию при одних и тех же категориях двигателей, поэтому он носит прикладной характер и удобен для сравнения их эффективности работы в конкретных условиях (Рисунок 8). Для дизельного двигателя удельная энергостоймость определяется по формуле:

$$g_p = \frac{P_D \cdot G_D}{\rho \cdot N_D},$$

где: P_D – цена за литр дизельного топлива, р/л; G_D – часовой расход топлива, кг/час; ρ – плотность топлива, кг/л; N_D – текущая мощность двигателя.

Для электродвигателя, питающегося от аккумулятора или другого накопителя электрической энергии удельная энергостоймость определяется другим способом:

$$g_p = T_E \frac{P_E}{N_e} \eta_B,$$

где: T_E – тарифная ставка за электроэнергию, р/кВт·ч; P_E – электрическая мощность, подведённая к электродвигателю, Вт; N_e – механическая мощность на выходе, Вт; η_B – КПД зарядки/разрядки накопителя электрической энергии и преобразователя.

По полученной характеристике видно, что удельные затраты на дизельный двигатель выше, чем на электрический, максимум на 6-7 р/кВтч при средних и низких нагрузках. При повышении нагрузки удельная энергостоймость сближается стремится к 15 р/кВтч для обоих типов

двигателей. Исходная стоимость дизельного топлива при этом принята 45 р/л, а стоимость электроэнергии 6 р/кВтч, в соответствии с реальными условиями.

Аналогичным коэффициентом удобно пользоваться при сравнении тягово-экономических характеристик трактора с использованием различных типов привода силового агрегата. В базовом варианте для трактора существует показатель $g_{кр}$ – удельный эффективный крюковой расход топлива, по которому оценивается количество топлива, затрачиваемого для производства единицы мощности на крюке трактора за единицу времени [21]. Для электропривода этот показатель не актуален и в данном случае удобно воспользоваться обобщающим показателем $g_{ркр}$ – удельная крюковая энергостоймость, которая показывает стоимость производимой мощности на крюке за единицу времени. В общем случае она может определяться по формуле:

$$g_{ркр} = \frac{g_p}{\eta_{кр}} = g_p \frac{N_e}{N_{кр}}$$

где: $\eta_{кр}$ – тяговый КПД трактора; N_e – выходная мощность двигателя; $N_{кр}$ – тяговая мощность трактора на крюке.

Таким образом, предложенный показатель позволяет оценить удельную энергетическую стоимость не только рассматривая работу двигателя, но и трактора с использованием различных типов двигателей, а также дать сравнительную оценку их параметров эффективности.

Влияние типа силового агрегата на характеристики трактора

После выбора компоновки трактора следующим этапом является оценка тяговых и эффективных характеристик трактора с электроприводом силового агрегата и их сравнение с базовой системой. Для расчета этих параметров необходимо исходить из характеристик двигателя. В зависимости от типа двигателя, приводящего силовую установку, параметры тяги и эффективности будут различаться. Рассматриваются три типа двигателей, соответствующих параметрам эксплуатации в мобильных машинах и широко используемых в тракторном и автомобильном производстве:

1. Дизельный двигатель внутреннего сгорания (ДВС);

2. Электрический двигатель постоянного тока (ДПТ);
3. Электрический асинхронный двигатель (АД).

Для анализа тяговых и экономических показателей тракторов с использованием различных типов двигателей необходимо определить начальные параметры. В качестве основы для дальнейшего расчета выбран трактор ВТЗ-2032 (Агромаш-30ТК) с дизельным двигателем Д-120 мощностью 18 кВт и частотой вращения коленчатого вала $n_n = 1800 \text{ мин}^{-1}$. Он является трактором малого тягового класса 0,6 тонн и подходит для использования в помещениях. При расчете параметров учитываются условия эксплуатации трактора, приближенные к реальным (Таблица 4).

Таблица 4

Исходные данные для тягового расчёта параметров трактора

№	наименование параметра	значение параметра
1	$\phi_{кр}$, коэффициент использования сцепного веса трактора	0,4
2	f_k , коэффициент сопротивления качению колес машины	0,08
3	r_k , кинематический радиус колеса трактора	0,8 м
4	$G_{тр}$, полный вес трактора	2100 кг
5	V_{min} , минимальная скорость машины	4 км/ч
6	V_{max} , максимальная скорость машины	24 км/ч
7	$g_{ен}$, удельный эффективный расход топлива при номинальной мощности	300 г/кВтч
8	$i_{тр}$, количество передач трансмиссии	6
9	$\eta_{тр}$, КПД трансмиссии	0,9
10	$\eta_{зар}$, КПД зарядки АКБ	0,9
11	$\eta_{раз}$, КПД разрядки АКБ	0,9
12	$\eta_{пр}$, КПД полупроводниковых силовых преобразователей	0,85
13	C_t , условная цена на 1 литр дизельного топлива (опт)	45 руб./л
14	$C_э$, условная тарифная ставка за 1 кВтч электрической энергии	6 руб./кВтч
15	фон опорной поверхности для определения показателя буксования	стерня

Фактический сельскохозяйственный трактор ВТЗ-2032 оснащен механической трансмиссией, включающей в себя 6 основных передач, не считая пониженные, что позволяет использовать эту компоновку для теоретического анализа с различными типами двигателей. Для проведения расчетов тяги применяется широко принятая методика [21,22]. С учетом взаимосвязи параметров, мощность на выходе можно определить согласно следующей формуле:

$$N_{кр} = \frac{(G_{тр} \varphi_{кр} + G_{тр} f_k) V_T}{\eta_{общ} \cdot (1 - \delta)} = \frac{(P_{кр} + P_f) V_T}{\eta_{общ} \cdot (1 - \delta)},$$

где: $P_{кр}$ – сила тяги на крюке; P_f – сила сопротивления качению колёс; V_m – теоретическая скорость трактора; $\eta_{общ}$ – суммарный КПД системы трансмиссии и двигателей, участвующих в образовании и передаче мощности, зарядки и разрядки АКБ в случае с электрической компоновкой, определяется как $\eta_{общ} = \eta_{тр} \cdot \eta_{зар} \cdot \eta_{раз} \cdot \eta_{пр}$; δ – буксование.

Согласно методике расчета тяги трактора, его характеристики тесно связаны с параметрами и режимами работы двигателя, которые обычно подбираются путем аппроксимации или других математических методов, описывающих реальную функцию согласно известным методикам [16-18]. Для упрощения оценки экономической эффективности трактора был введен показатель $g_{ц}$ [руб./кВтч] – удельная энергостоймость. Он показывает сумму средств (в рублях), необходимых для выработки мощности равной 1 кВт в течение 1 часа. Этот параметр рассчитывается на основе цен на топливо или электроэнергию и удобен для сравнения затрат при оценке энергетики тракторов с различными типами двигателей. Для трактора с двигателем внутреннего сгорания формула зависимости этого показателя выглядит следующим образом:

$$g_{ц} = \frac{C_T \cdot G_t}{\rho \cdot N_{кр}} = \frac{C_T \cdot g_{кр}}{\rho},$$

где: C_m – цена за литр дизельного топлива, р/л; G_t – часовой расход топлива, кг/час; ρ – плотность топлива, кг/л; $N_{кр}$ – текущая мощность трактора на крюке, $g_{кр}$ – удельный эффективный расход топлива для трактора, кг/кВтч.

Для электрического трактора, питающимся от аккумулятора или другого накопителя электрической энергии, удельная энергостоймость вычисляется по следующей зависимости:

$$g_{ц} = C_{э} \frac{P_e}{N_{кр}},$$

где: $C_{э}$ – тарифная ставка за электроэнергию, р/кВт·ч; P_e – электрическая мощность, подведённая к электродвигателю, Вт.

Анализируя тяговые характеристики трактора ВТЗ-2032 с 6-ступенчатой коробкой передач (Рисунок 9 Б), основанной на внешней скоростной характеристике дизельного двигателя Д-120 (Рисунок 9 А), можно заметить области не полностью использованной тяговой мощности между кривыми для каждой передачи. Минимальное значение удельного ценового расхода энергии $g_{ц}$ при этом составляет приблизительно 24 рублей/кВтч.

Рассмотрев характеристику ДПТ (Рисунок 10 А). Из тяговой характеристики трактора с электродвигателем постоянного тока (ДПТ) видно, что зоны не полностью использованной мощности будут более заполнены по сравнению с использованием ДВС. Что позволяет отказаться от нескольких передач из-за перекрытия зон характеристиками других передач (Рисунок 10 Б). При использовании дизельных двигателей постоянной мощности (ДПМ), где запас крутящего момента составляет около 30-40%, можно достичь схожих результатов. Однако следует отметить, что возможная длительная работа дизеля на корректорной ветви может привести к увеличению выбросов сажи при такой же мощности и вызвать чрезмерный нагрев.

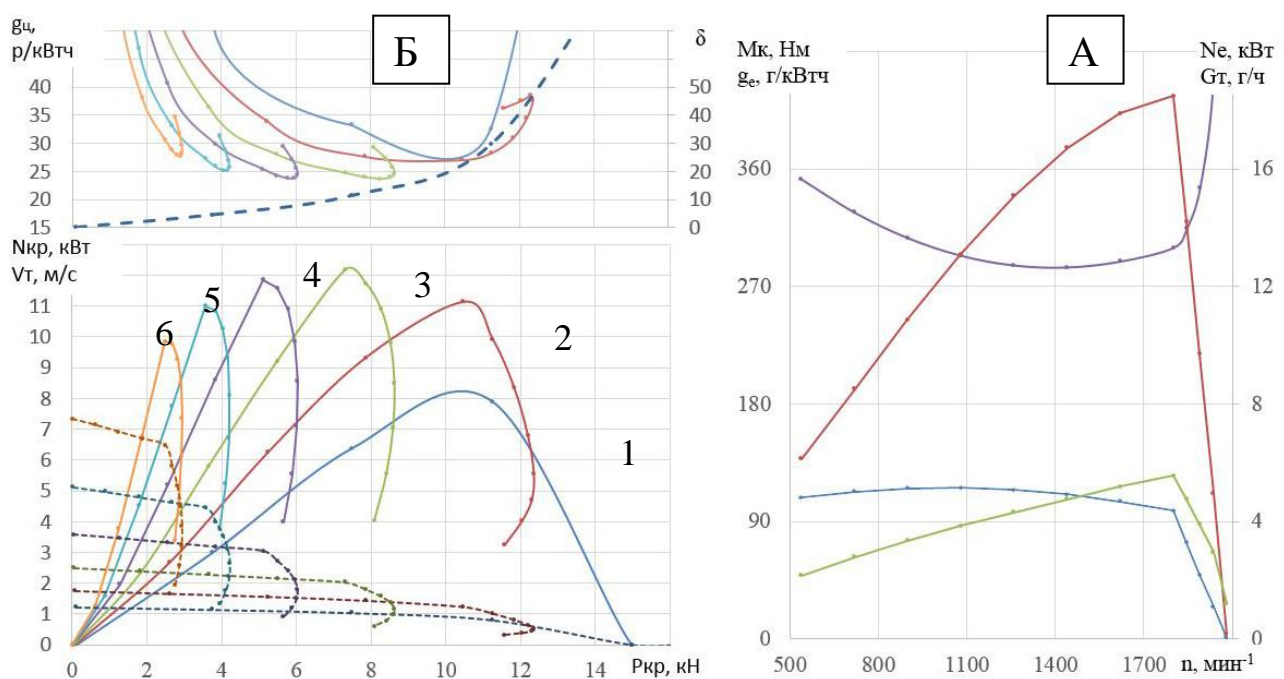


Рисунок 9 – А) Характеристики дизельного ДВС. Где: M_k – крутящий момент; N_e – эффективная мощность ДВС; G_t – часовой расход топлива; g_e – удельный эффективный расход топлива Б) Тяговые характеристики трактора (ВТЗ-2032) при использовании дизельного ДВС. Где: $N_{кр}$ – мощность на крюке, кВт; V_t – теоретическая скорость

трактора, м/с; $g_{ц}$ – удельный ценовой расход энергии, рубль/кВтч; δ – буксование, %. Цифрами 1-6 обозначены порядковые номера передач.

При помощи ДПТ обеспечивается удобный режим нагрузки трактора, увеличивая крутящий момент при росте внешнего сопротивления, при этом сохраняя высокий КПД в широком диапазоне частот вращения. Минимальное значение $g_{ц}$ составляет 15 рублей/кВтч, что улучшает показатель на 30-40% по сравнению с дизельным ДВС.

Механическая характеристика асинхронного двигателя (Рисунок 11 А) при равной мощности имеет более ограниченный диапазон работы по сравнению с ДПТ. Таким образом, тяговая характеристика трактора (Рисунок 11 Б) более схожа с использованием дизельного ДВС. Следует отметить, что асинхронная машина может быть управляема более гибко путем изменения частоты тока и напряжения, что позволяет расширить ее рабочий диапазон. Этот вид управления делает ее более универсальной, несмотря на более высокие затраты на обслуживание.

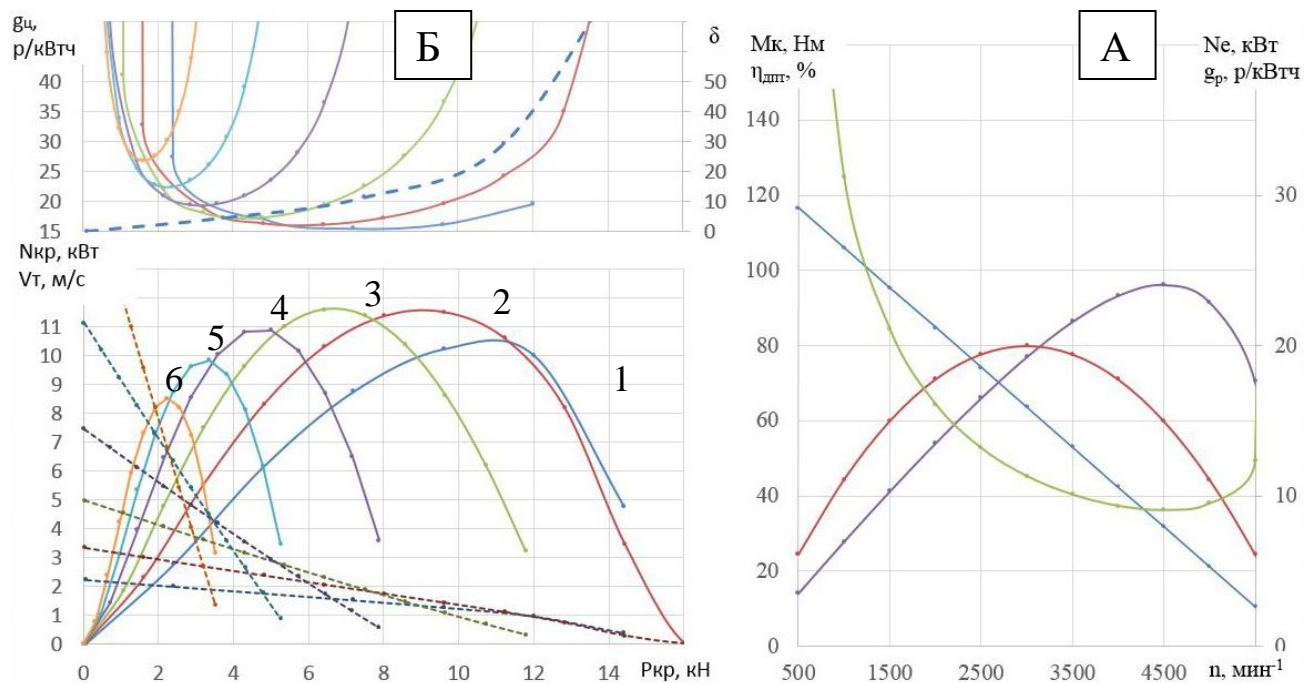


Рисунок 10 – А) Характеристики ДПТ. Где: M_k – крутящий момент; N_e – эффективная мощность ДПТ; $\eta_{дпт}$ – КПД двигателя; g_p – удельный ценовой расход энергии Б) Тяговые характеристики трактора (ВТЗ-2032) при использовании дизельного ДВС. Где: $N_{кр}$ – мощность на крюке, кВт; V_t – теоретическая скорость трактора, м/с; $g_{ц}$ – удельный ценовой расход энергии, рубль/кВтч; δ – буксование, %. Цифрами 1-6 обозначены порядковые номера передач.

Минимальный удельный ценовой расход энергии $g_{ц}$ с применением асинхронного двигателя составляет 16 рублей/кВтч, что сравнимо с ДПТ. Однако характеристики асинхронных двигателей имеют более ограниченный диапазон без внедрения управляющих систем и жёсткую характеристику.

Для гибкого управления асинхронной машиной, потребуется система управления электроприводом в целом, что также является необходимым для ДПТ и составляет основную часть затрат. По сравнению с машинами постоянного тока, асинхронные машины обладают более низким КПД из-за потерь энергии на формирование вращающегося магнитного поля, создающего ЭДС в роторе во время физического процесса, известного как скольжение. Поэтому эффективность таких двигателей ограничена физическим принципом и не может быть выше.

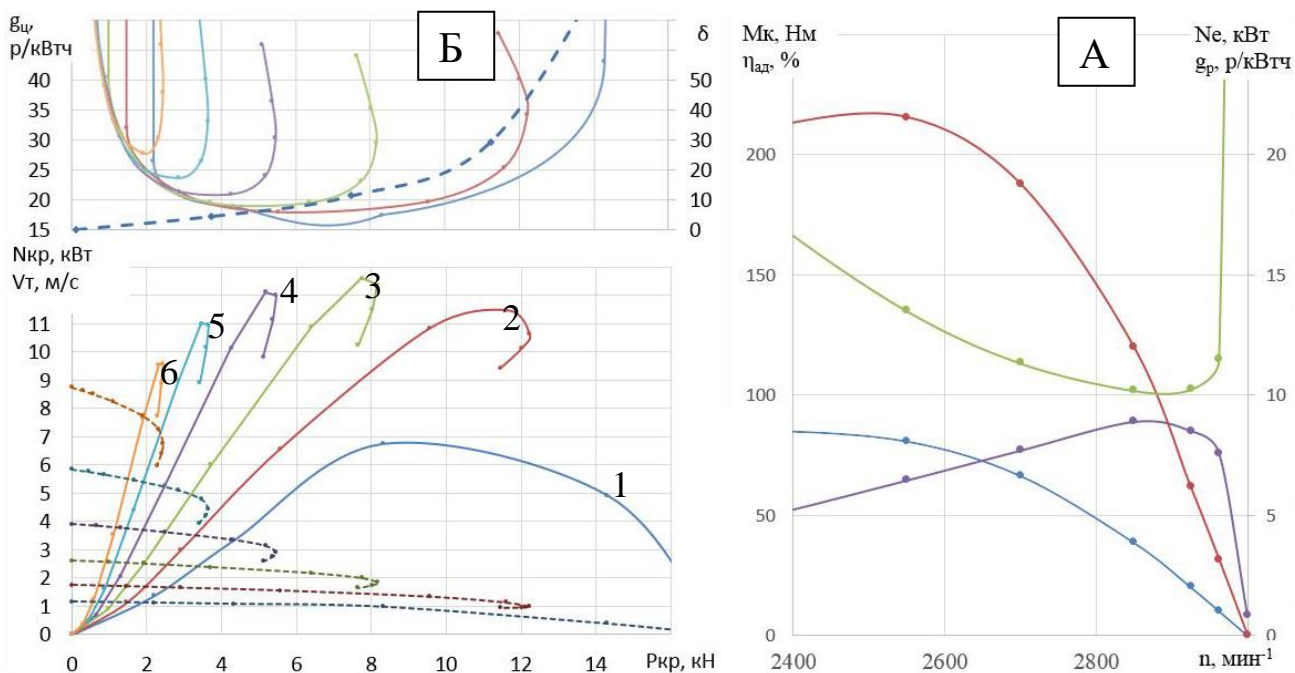


Рисунок 11 – А) Характеристики АД. Где: M_k – крутящий момент; N_e – эффективная мощность АД; $\eta_{ад}$ – КПД двигателя; g_p – удельный ценовой расход энергии Б) Тяговые характеристики трактора (ВТЗ-2032) при использовании дизельного ДВС. Где: $N_{кр}$ – мощность на крюке, кВт; V_t – теоретическая скорость трактора, м/с; $g_{ц}$ – удельный ценовой расход энергии, рубль/кВтч; δ – буксование, %. Цифрами 1-6 обозначены порядковые номера передач.

Для ДПТ отсутствует подобная проблема, что обуславливает их высокий пиковый КПД в 95%, превосходящий КПД асинхронных двигателей, находящихся на уровне 89%, при этом при одинаковой мощности габариты асинхронных двигателей будут в 1,5...3 раза больше. Осложнить выбор

постоянного тока в качестве привода силовой установки трактора может также наличие коллекторно-щеточного узла, который обеспечивает контактный статус данного двигателя. Следует отметить, что современный уровень технологий позволяет избежать использования коллекторно-щеточного узла в ДПТ, который заменяется полупроводниковыми электронными компонентами [17]. Таким образом, на ротор устанавливаются постоянные магниты, которые приводятся в движение вращающимся магнитным полем статора, управляемого полупроводниковыми элементами. Эти электродвигатели известны как вентильные и являются частным случаем синхронных машин, обладая характеристиками, аналогичными ДПТ [18]. Подобные двигатели устанавливаются на некоторые электромобили, включая Tesla, где в качестве постоянных магнитов используется неодимовый сплав, обеспечивающий предельную температуру работы около 250°C. Такие двигатели представляют перспективу и для использования на тракторах.

Возможность повышения тягово-сцепных свойств электротракторов

К основным факторам, влияющим на эффективность и производительность тракторов, относятся тягово-сцепные свойства колес с опорной поверхностью [25]. 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.

Современные тракторы оснащены преимущественно механическими ступенчатыми трансмиссиями с ручным, гидравлическим или электрическим управлением. Такие трансмиссии обычно включают межосевые (межколесные) и промежуточные симметричные шестеренчатые дифференциалы, которые обеспечивают разделение крутящего момента поровну, и позволяют ведущим колесам вращаться с различными угловыми скоростями. С точки зрения маневрирования трактора дифференциал не вызывает проблем. Однако, при прямолинейном движении касательная сила может одинаковая только в одинаковых условиях на ведущих колесах. Сцепление колеса с поверхностью и

кинематический радиус колеса постоянно меняются, приводя к изменению касательной силы тяги.

Симметричный межосевой дифференциал распределяет крутящий момент поровну между колесами, учитывая внутреннее трение [26]. 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 [27]. Для предотвращения этого используется блокировка дифференциала, которая 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 постоянно работают в разных условиях, поэтому максимальная сила тяги не будет реализуема в полной мере. Повышение буксования ведущих колес трактора приводит к снижению тягового КПД. Кроме тягового усилия энергия расходуется на преодоление трения и деформацию колеса с опорной поверхностью. При блокировке дифференциала их угловые скорости станут одинаковыми, но пройденные могут различаться. В результате одно колесо будет буксовать, а другое перемещаться юзом, что вызовет кинематическое несоответствие, износ покрышек колёс, потери мощности трактора и дополнительную нагрузку на трансмиссию [28].

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 [29];
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 [30];
5. Применение индивидуального привода колёс, который обеспечивает оптимальное распределение крутящих моментов, подводимых к двигателям. Таким образом, такой способ предполагает оптимальный режим работы колеса, за счёт чего повышается производительность машины.

Способ улучшения тягово-сцепных свойств за счёт 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 [31].

На данный момент есть опытные 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 гидрообъёмной трансмиссией и индивидуальным приводом колёс [32]. Позднее, автомобиль сертифицирован под названием «Гидроход-49061». КПД этой машины по опытным данным был выше на 20% в одинаковых условиях [33].

Гидрообъёмная трансмиссия 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 [34].

Для электротракторов в качестве привода используется электропривод. 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. Современные технологии позволяют реализовать гибкое управление ведущими колесами с помощью электропривода. Путем оптимизации нагрузки на каждое колесо можно полностью отказаться от дифференциала, снизить буксование и проскальзывание.

Для разработки ведущего колеса с индивидуальным приводом необходимо определить алгоритм управления системой 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.

В качестве основы для работы автоматизированной системы управления приводом можно рассмотреть примерный алгоритм, позволяющий поддерживать заданную частоту вращения колеса при условии постоянства действительной скорости трактора (Рисунок 12). 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 [35]. В алгоритме предлагается использование методики отслеживания краткосрочного ускорения колеса, и с учетом момента инерции системы определяются сцепные свойства поверхности.

Для связи буксования и условий, обеспечивающих сцепные свойства колеса вводится условный показатель «фактор буксования», с помощью которого определяется тенденция характеристики буксования на различных агрофонах. Определив крутящий момент на колесе (касательную силу тяги), и ускорения ведущих колёс, 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 самого колеса. После достижения порогового значения силы тяги происходит срыв пласта или протектора колеса, и сила трения покоя переходит в силу трения скольжения.

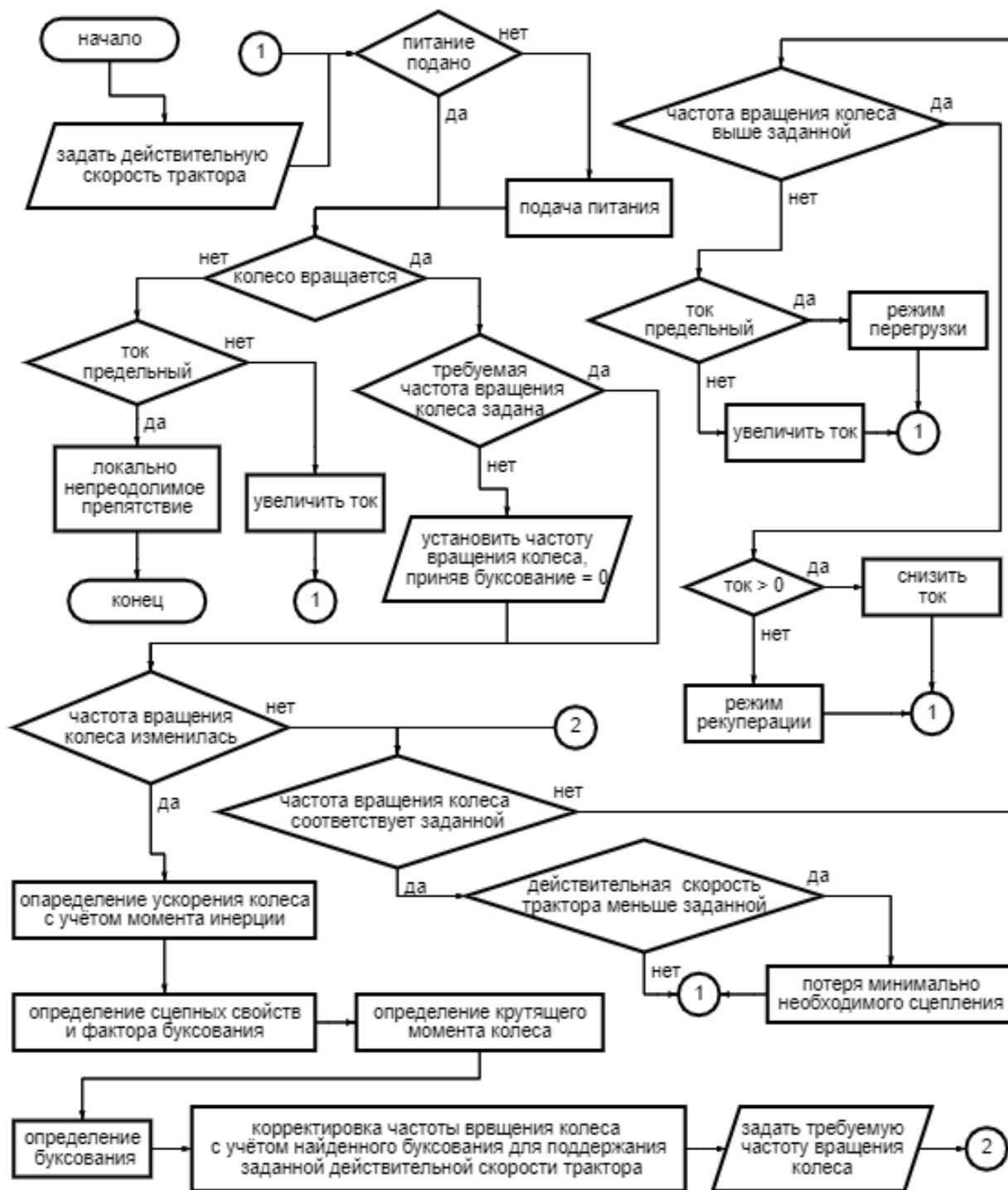


Рисунок 12 – Блок-схема алгоритма управления электроприводом колеса трактора

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:

$$\delta = a_p P_{кр} + b_p P_{кр}^2 + \frac{R}{P_{крп} - P_{кр}} - \frac{R}{P_{крп}},$$

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; $P_{крп}$ – предельное усилие трактора на крюке при неизменных условиях тягово-цепных свойств.

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

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

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

Характеристика буксования трактора обычно определяется для неизменных условий работы, которые 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 $F_б$ при определенном режиме работы, который определяет условия изменения коэффициентов

$$a_p = f(F_б) \text{ и } b_p = f(F_б).$$

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 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.

При анализе экспериментальных характеристик буксования трактора МТЗ-82.1 на различных агрофонах были получены коэффициенты a_p и b_p (Рисунок 13).

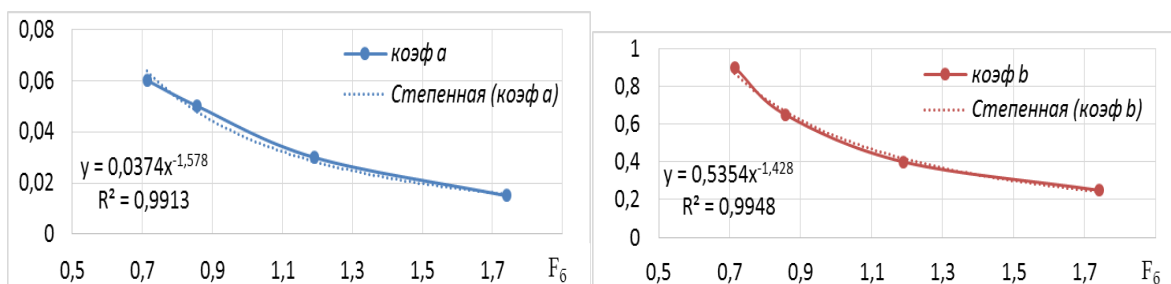


Рисунок 13 – Аппроксимация зависимости изменения коэффициентов a_p и b_p при работе трактора МТЗ-82.1 на различных агрофонах.

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: $F_6 = P_{кб}/P_{кр}$.

Если $F_6 = 1$, то на текущей характеристике буксования при достижении тягового усилия, соответствующего номинальному, буксование станет равным допустимому значению. В качестве примера расчёта можно выбрать характеристики буксования трактора МТЗ-82.1 на различных агрофонах (Рисунок 14). По существующим характеристикам аппроксимацией при постоянном значении коэффициента $R=10$ получены зависимости коэффициентов:

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

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).

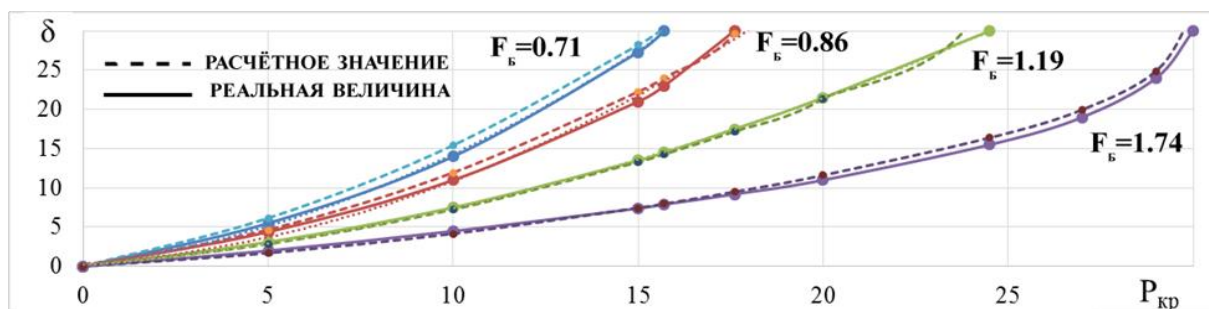


Рисунок 14 – Реальная и расчетная тяговая характеристика трактора МТЗ-80 по буксованию на различных агрофонах. При $F_b = 0,71$ фон – поле под посев; при $F_b = 0,86$ фон – стерня; при $F_b = 1,19$ фон – залежь; при $F_b = 1,74$ фон – асфальтовая дорога.

Данная математическая модель позволяет оценить характеристики буксования трактора при любых других условиях, опираясь на существующие зависимости. Например, для трактора МТЗ-82.1 определён фактор буксования для различных агрофонов при прочих равных условиях и составляет: 0,71 для поля под посев, 0,86 для стерни, 1,19 для залежи и 1,74 для асфальтового покрытия.

Определив буксования при текущем режиме работы трактора, его значение может быть использовано в алгоритме управления системой привода и обеспечения ей оптимальной загрузки движителей.

На текущей момент реализация электротракторов по большей мере осуществляется с применением ведущего моста, оборудованного дифференциалом, приводимым в свою очередь электроприводом, что не в полной мере позволяет реализовать весь потенциал силового агрегата.

Использование индивидуального привода для тракторов, оборудованных электроприводом, является наиболее эффективным методом, повышающим тягово-сцепные свойства за счёт трансмиссии и является рациональной перспективой в ближайшем времени.

Заключение

С точки зрения хранения энергии для двигателя на борту мобильной машины дизельный двигатель является наиболее выгодным по отношению к энергоёмкости и её удельной стоимости. Поэтому рационально будет только временное использование электропривода, при работе тракторов малой мощности в закрытых помещениях с целью снижения токсичности ОГ, снижения шумности и вибраций. Анализ материала показал, что гибридный силовой агрегат в составе с дизельным двигателем и электродвигателем питаемого от источника электроэнергии небольшой ёмкости с системой рекуперации и подзарядки от ДВС является перспективным для данных условий работы и может быть взят за основу для дальнейших исследований.

Проведён анализ энергооснащённости на территории РФ, с целью использования электротракторов с питанием от внешней сети. В ходе исследования материалов установлено что на 2022 г. В России запас энергоресурсов, полученных суммарно со всех электростанций, составляет примерно 300 млрд. кВт·ч., что по расчётам превышает энергозатраты на возможное обеспечение электротракторов и другой сельскохозяйственной техники, а аграрном секторе почти в 10 раз. Показано что при более нагруженных работами месяцах энергозатраты не превысят 12,2 млрд. кВт·ч., что не является критичным.

В процессе анализа характеристик трактора выявлено, что удельные ценовые расходы на передачах для различных типов двигателей колеблются в следующих диапазонах: Дизельный двигатель: 23-29 руб./кВтч, ДПТ: 15-27 руб./кВтч, Асинхронная машина: 16-24 руб./кВтч.

Моделирование тягового расчёта подтвердило преимущество электрических двигателей за счёт эффективного использования мощности между линиями передач, что позволяет сократить их количество.

Выбор силового агрегата для трактора сводится к выбору между ДПТ и асинхронным двигателем, оба из которых демонстрируют меньшие ценовые энергетические затраты на 1,5-1,8 раза по сравнению с другими рассматриваемыми параметрами. ДПТ обладает лучшими нагрузочными

характеристиками и более высоким КПД порядка 95% напротив 89% у АД. Асинхронному двигателю необходимо частотное управление для обеспечения гибкости характеристик, что негативно скажется при его использовании.

Система из дизельного двигателя с генератором наиболее актуальна для хранения энергии на борту мобильной машины. Литий-ионные аккумуляторы подходят для тракторов малой мощности в закрытых помещениях из-за их удельной энергоёмкости (432-864 кДж/кг) и низкой цены за единицу энергии (5-45 руб/кДж). У ионисторов энергоёмкость ниже в 7,5-30 раз и у конденсаторов в 1200-2400 раз, а цена за единицу энергии выше в 25-50 раз и в 100-130 раз с ионисторами и конденсаторами соответственно, что ограничивает их использование в качестве постоянного питания. Гибридный силовой агрегат с рекуперацией и подзарядкой от ДВС является перспективным решением для работы в данных условиях.

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.

При управлении колесом с индивидуальным приводом такая модель может быть заложена для определения тягово-сцепных свойств. Определение параметра по многофакторной характеристике позволит составить программу

адаптивных условий для повышения эффективности работы тракторного колеса.

Список литературы

1. Марков В.А., Девянин С.Н., Быковская Л.И., Маркова И.Г. и др. Биогаз - перспективное топливо для дизелей // Грузовик. -М.: Издательство "Инновационное машиностроение", 2018. № 5. С. 29-39.
2. Бижаев А. В. Снижение токсичности отработавших газов дизеля путем подачи топлива с водой в камеру сгорания // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. – 2019. – Т. 18, № 12. – С. 586-588. – EDN QIUPAC.
3. Загинайлов В.И. история развития, состояние и перспективы применения электромобильной техники в полеводстве / В.И. Загинайлов, С.А. Андреев. — электрон. текстовые дан. // вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина", 2017. – вып. 6(82). – с.15-22.
4. Bizhaev A. V., Devyanin N. S., Chumakov V. L. [et al.] Evaluation of energy-economic parameters of tractor with electrically driven power unit // E3S Web of Conferences : II International Conference on Environmental Technologies and Engineering for Sustainable Development Vol. 443, 2023. – P. 03004. – DOI 10.1051/e3sconf/202344303004. – EDN BMLATV.
5. Бижаев А. В. Исследование параметров трактора с электроприводным силовым агрегатом // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2020. – Т. 14, № 4. – С. 33-42. – DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-33-42. – EDN PHRDPD.
6. Красовский А. Б. Основы электропривода : учебное пособие / А. Б. Красовский. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. -405 с.: ил
7. Bizhaev A.V., Chumakov V.L., Andreev O. P. [et al.] Application of the Electric Drive of the Power Unit of the Small Traction Tractor // The Challenge of Sustainability in Agricultural Systems. – Heidelberg : Springer International Publishing, 2021. – P. 971-979. – DOI 10.1007/978-3-030-72110-7_107. – EDN LITECV.
8. Хрусталёв Д.А. Аккумуляторы. М.: Изумруд, 2003. –224с.

9. Исаков П.П., Иванченко П.Н., Егоров А.Д. Электромеханические трансмиссии гусеничных тракторов. -Л.: Машиностроение, 1981. - 302 с.
10. Zeraouia M., Benbouzid M.E.H., and Diallo D. (2006).Electric motor drive selection issues for HEV propulsionsystems: A comparative study. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 55(6).
11. Burress T.A., Campbell S.L., Coomer C. L., Ayers C. W. Evaluation of the 2010 toyota prius hybrid synergy drive system // Oak ridge national laboratory. – U.S. Department of Energy Vehicle Technologies. – March 2011. –79 p.
12. Строганов В.И. Моделирование систем электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой в процессах проектирования и производства: монография – М.: МАДИ, 2014. – 264 с.
13. Скундин А.М. Литий-ионные аккумуляторы: современное состояние, проблемы и перспективы // Электрохимическая энергетика, 2011, т. 1, с. 5-15.
14. Деспотули А., Андреева А., Суперконденсаторы для электроники (часть 1) / Современная электроника. - М. : СТА - Пресс, 2004 - (Шифр: П1780/2006/5). - 2006 г. N 5. - С. 10 – 14.
15. Tarascon J.-M. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries /J.-M. Tarascon, M. Armand // Nature. - 2011. - V. 414. - P. 359-367.
16. Шароглазов, Б. А., Фарафонов, М. Ф., Клементьев, В. В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов: Учебник по курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания». – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2004. – 344 с.
17. Chau K., Chan C., and Liu C. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid vehicles. IEEE Transactions On Industrial Electronics, -2008, -55(6), 2246–2257.
18. Овчинников, И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе / И. Е Овчинников : Курс лекций. - СПб. : КОРОНА-Век, 2016. - 336 с.
19. Трухачёв В.И., Дидманидзе О.Н., Девянин С.Н. Какие сельскохозяйственные тракторы нужны завтра России? // Чтения академика В. Н. Болтинского: сборник статей / Семинар (Москва, 22–24 января 2020 года); под ред. М. Н. Трухачева и др. – М. : ООО «Мегаполис», 2020. – С 11-19.

20. Иванов С. А. Комбинированные энергоустановки с ИКЭ – основа эффективного использования топливно-энергетических ресурсов XXI века / А.М. Иванов, С.А. Иванов // Электротехника. – 2003. - №12. – С. 2-6.
21. Кутьков Г.М. Трактора и автомобили. Теория и технологические свойства: Учеб. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. – 506с.
22. Савочкин В.А. Тяговый расчёт трактора. Методические указания для выполнения курсовой работы по дисциплине «Теория трактора» для студентов специальности 150100 «Автомобиле- и тракторостроение». –М.: МГТУ «МАМИ», 2001. – 48с.
23. Бижаев А.В., Чумаков В.Л., Путан А.А. Расчётная модель основных параметров рабочего цикла дизеля с использованием различных типов топлив // Доклады ТСХА: Сборник статей. Выпуск 292 Часть I. –М.: Издательство РГАУ-МСХА, 2020. С. 244-247.
24. Острецов В.Н. Электропривод и электрооборудование: учебник и практикум для СПО. – М.: Издательство Юрайт, 2019. –239 с.
25. 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: SDCFRT.
26. Лустенков М.Е. Исследование кинематических и силовых характеристик автомобильного дифференциала повышенного трения // Актуальные вопросы машиноведения. 2022. Т. 11. С. 7-10. EDN: CINQRZ
27. Анчуков В.В., Алюков А.С. Имитационное моделирование системы автоматического управления блокировками дифференциалов грузовых автомобилей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2018. Т. 18. N3. С. 68-79. DOI: 10.14529/engin180308
28. 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.
29. Иовлев Г.А., Побединский В.В., Ильин М.А. и др. Особенности балластирования сельскохозяйственных тракторов различных тяговых классов

- // Известия Международной академии аграрного образования. 2022. N61. С. 42-53. EDN: NEEQYS.
30. 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.
31. 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.
32. Лепешкин А.В. Опыт использования и перспективы создания многоприводных колесных машин повышенной проходимости // Известия МГТУ МАМИ. 2010. N2 (10). С. 54-65. EDN: NCCХТР
33. Лепешкин А.В. Показатели оценки эффективности передачи и преобразования энергии трансмиссией и двигателем колесной машины // Тракторы и сельхозмашины. 2014. N11. С. 29-35. EDN: UAHLQF
34. 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. DOI: 10.1007/s41321-021-0420-8
35. 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. EDN: KYOJKE