

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

УДК 623.437.422

КЛЮЧНИКОВ
Алексей Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ КАЧЕСТВ ТРАКТОРА
ПУТЕМ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.05.03 «Колесные и гусеничные машины»

Минск, 2015

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель:

Коробкин Владимир Андреевич, доктор технических наук, заместитель генерального конструктора ОАО «Минский тракторный завод» – главный конструктор по спецтехнике

Официальные оппоненты:

Скойбеда Анатолий Тихонович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Детали машин, подъемно-транспортные машины и механизмы» Белорусского национального технического университета;

Михайлов Валерий Валерианович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Белорусского научно-исследовательского института транспорта «Транстехника»

Оппонирующая организация:

РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства»

Защита состоится «4» декабря 2015 г. в 14 часов на заседании докторского совета по защите диссертаций Д 02.05.04 при Белорусском национальном техническом университете по адресу 220013, г. Минск, пр-т Независимости 65, Белорусский национальный технический университет, корп. 1, ауд. 202, тел. (017) 292-83-85.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан « » октября 2015 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
канд. техн. наук, доцент



Ч.И. Жданович

© Ключников А.В., 2015
© Белорусский национальный
технический университет, 2015

ВВЕДЕНИЕ

Повышение производительности труда в сельском хозяйстве является одной из задач для обеспечения продовольственной независимости Республики Беларусь. Эту задачу решают мощные сельскохозяйственные колесные и гусеничные тракторы, оборудованные двигателями внутреннего сгорания (ДВС) мощностью 220...370 кВт, которые могут работать с комбинированными агрегатами, осуществляющими несколько операций за один проход. Агрегатирование с такими машинами требует от трактора значительных тяговых усилий и регулирования скорости движения при различных режимах работы, что наилучшим образом обеспечивается применением бесступенчатых трансмиссий, которые могут быть получены различными конструктивными решениями. При разработке данных конструкций важное место занимают вопросы обоснования параметров трансмиссии, ее схемы, алгоритмов совместной работы ДВС и коробки передач, обеспечивающих высокую экономичность и производительность машинно-тракторного агрегата (МТА).

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами. Тема и содержание диссертационной работы соответствует приоритетам программы социально-экономического развития Республики Беларусь на 2011-2015 годы, одобренной четвертым Всебелорусским народным собранием и утвержденной Указом Президента Республики Беларусь от 11.04.2011 № 136 «Инновационное развитие национальной экономики, энерго- и ресурсосбережение; наращивание экспортного потенциала страны; энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии производства конкурентоспособной продукции; развитие программно-целевого метода планирования научных исследований и разработок с учетом потребностей отраслей реального сектора экономики; повышение результативности фундаментальных, прикладных исследований и разработок, государственных научно-технических программ и инновационных проектов».

Конструкция колесного трактора тягового класса 5 с двигателем мощностью 220...264 кВт и электромеханической трансмиссией разрабатывалась управлением конструкторско-экспериментальных работ №1 (УКЭР-1) ОАО «Минский тракторный завод» в течение 2006...2010 гг в соответствии с планом НИиОКР, а затем продолжилась в рамках Государственной научно-технической программы (ГНТП) «Машиностроение», задание АТ-02.43 № ГР 20114803 «Разработать, изготовить, испытать опытный образец перспективного колесного трактора общего назначения мощностью 300...360 л.с. с электромеханической трансмиссией, в перспективе до 500 л.с.», в работах по которому автор принимал непосредственное участие в качестве ответственного исполнителя.

Цель и задачи исследования. Целью исследования являлось повышение производительности и экономичности тракторов путем обоснования рациональных параметров и разработки концепции создания бесступенчатой электромеханической трансмиссии для колесного трактора тягового класса 5 с двигателем мощностью 220...264 кВт.

В соответствии с целью диссертационной работы сформулированы и решены следующие задачи исследования:

1. Провести анализ различного типа трансмиссий многоцелевых колесных и гусеничных машин, в том числе и колесных тракторов и сравнить показатели их эффективности и экономичности.

2. Разработать методику согласования параметров моторно-трансмиссионной установки и алгоритмы совместной работы ДВС и трансмиссии при выполнении МТА различных технологических операций.

3. Разработать математическую модель для исследования процесса разгона трактора с электромеханической трансмиссией, позволяющую оценивать его динамические характеристики. С ее помощью провести исследования процесса разгона различных МТА, и по их результатам выбрать рациональные параметры моторно-трансмиссионной установки и системы ее управления.

4. Разработать концепцию создания бесступенчатой электромеханической трансмиссии для колесного трактора тягового класса 5.

5. Разработать методику параметрических стендовых испытаний моторно-трансмиссионной установки трактора.

6. Провести параметрические стендовые испытания моторно-трансмиссионной установки трактора тягового класса 5, и, по их результатам, разработать рациональный алгоритм совместного управления ДВС и трансмиссии.

7. Провести параметрические и сравнительные испытания трактора. По их результатам оценить степень улучшения основных эксплуатационных показателей трактора и адекватность разработанных математических моделей.

Объектом исследования являлся колесный трактор тягового класса 5 мощностью 220 кВт с бесступенчатой электромеханической трансмиссией. Выбор объекта исследования объясняется соответствием его конструкции современным направлениям развития мирового тракторостроения.

Научная новизна. Предложен и обоснован графоаналитический метод согласования параметров моторно-трансмиссионной установки и определения рациональных алгоритмов совместной работы ДВС и трансмиссии.

Разработана математическая модель для исследования процесса разгона трактора с электромеханической трансмиссией, учитывающая характеристики асинхронного электродвигателя переменного тока с векторным управлением, механических узлов трансмиссии и движителей.

Предложена методика оценки параметров электромеханической трансмиссии на основании анализа разгонных качеств трактора.

Предложена концепция создания бесступенчатой электромеханической трансмиссии колесного трактора тягового класса 5 на базе серийной трансмиссии трактора «Беларус»-3022.

Положения, выносимые на защиту.

1. Графоаналитический метод согласования параметров моторно-трансмиссионной установки и определения рациональных алгоритмов совместной работы ДВС и трансмиссии, учитывающий характеристику ДВС и отличающийся учетом структурной схемы трансмиссии, построенной на базе серийных узлов трактора «Беларус»-3022, позволяющий определить мощности и номинальные частоты вращения генератора и электродвигателя;

2. Методика экспериментального определения рационального закона управления ДВС в зависимости от потребляемой мощности, обеспечивающего максимальную топливную экономичность;

3. Математическая модель для исследования процесса разгона трактора с электромеханической трансмиссией, отличающаяся представлением дизель-генераторной установки в виде источника постоянного напряжения, учетом характеристик асинхронного электродвигателя переменного тока с векторным управлением, характеристик механических узлов трансмиссии и движителей, позволяющая провести расчет динамических нагрузок трактора на различных режимах работы и на их основании выбрать параметры трансмиссии и системы ее управления;

4. Методика оценки параметров электромеханической трансмиссии на основании анализа разгонных качеств трактора, отличающаяся учетом характеристики тягового электродвигателя, позволяющая на стадии разработки эскизного проекта произвести оценку выбранного электродвигателя, определить его минимальную мощность и передаточные числа диапазонного редуктора;

5. Концепция создания бесступенчатой трансмиссии колесного трактора «Беларусь»-3023, мощностью 220 кВт на базе серийной трансмиссии трактора «Беларусь»-3022 с высокой степенью унификации серийных узлов и деталей, отличающаяся наличием тягового электропривода, позволяющего улучшить эксплуатационные качества базовой модели трактора.

Личный вклад соискателя. Автором диссертации самостоятельно разработаны:

- математическая модель для исследования разгона трактора с электромеханической трансмиссией, включающая моторно-генераторную установку, асинхронный электродвигатель с векторным управлением, механическую коробку передач и движитель;

- методика оценки параметров электромеханической трансмиссии на основании анализа разгонных качеств трактора;

- методика выбора и согласования параметров ДВС и комплекта тягового электрооборудования;

- концепция создания электромеханической трансмиссии колесного трактора «Беларусь»-3023, мощностью 220 кВт. Получены патенты на изобретения на конструкцию и схему трансмиссии;

- методика стендовых испытаний моторно-трансмиссионной установки, позволяющая определить ее параметры и рациональный закон совместного управления ДВС и трансмиссией.

Практическая реализация разработанных автором схем, конструкций и теоретических положений осуществлялась в тесном сотрудничестве с УКЭР-1 ОАО «Минский тракторный завод», отделом «Тракторной техники» Объединенного института машиностроения Национальной академии наук Республики Беларусь, кафедрами «Тракторы» и «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Белорусского национального технического университета, ОАО «Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения» (г. Владимир, РФ) и ООО «Русэлпром-Электропривод» (г. Москва, РФ).

Апробация результатов диссертации. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 9-й Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике», посвященной 60-летию авто-тракторного факультета БНТУ, Минск, 2011 г.; Международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие

технологии», Белорусско-Российский университет, Могилев, 2013 г.; Международной научно-технической конференции «Проблемы проектирования и развития тракторов, мобильных машин, городского электротранспорта», посвященной 60-летию кафедры «Тракторы» БНТУ, Минск, 2013 г.; Международной научно-технической конференции «Инновации в машиностроении – 2014», ОИМ НАН Республики Беларусь, Минск, 2014 г.

Опубликованность результатов диссертации. Материалы диссертации опубликованы в 16-ти научных работах, среди которых 6 работ на 5,6 авторских листах в изданиях, включенных в Перечень научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований, 10 работ на 5,4 авторских листах других публикаций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 158 страницах, включая 91 иллюстрацию на 64 страницах, 10 таблиц на 10 страницах, 9 приложений на 49 страницах, 124 библиографических источника на 10 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В первой главе диссертации рассмотрены основные тенденции развития трансмиссий многоцелевых колесных и гусеничных машин, в том числе тракторов, проведен анализ эффективности трансмиссий различных типов, выполнен обзор и критический анализ математических моделей ходовой системы, ее элементов и трактора в целом. Вопросами обоснования параметров трансмиссий колесных и гусеничных машин, и исследованием динамики МТА в разные годы занимались Е.Д. Львов, М.И. Медведев, Д.А. Чудаков, Д.Н. Громов, В.В. Гуськов, П.И. Бойков, В.Н. Болтинский, Е.С. Кисточкин, П.Н. Иванченко, И.П. Ксеневич, В.М. Шарипов, П.А. Амельченко, В.П. Тарасик, В.В. Грицкевич, А.С. Солонский, В.Б. Альгин, K. Grad, T. Zink, P. Dziuba, H. Aitzemuller и др.

Отмечено, что на современном этапе развития тракторостроения основным типом трансмиссии на рынках Европы являются двухпоточные гидромеханические и трансмиссии с переключением передач под нагрузкой [1, 2, 7], однако наибольшей перспективой обладает полнопоточная электромеханическая трансмиссия на электромашине переменного тока, внедрение которой позволит решить многие проблемы по повышению производительности, автоматизации технологических процессов, экономии горюче-смазочных материалов и экологии. На основании анализа конструкций предложены варианты схем и компоновочных решений электромеханических трансмиссий для тракторов различных мощностей [1, 4, 8, 14, 15, 16].

По результатам анализа математических моделей тракторов и их ходовых систем сделан вывод, что математическая модель для исследования динамики трактора с электромеханической трансмиссией должна представлять собой совокупность моделей силового модуля и динамического объекта, учитывающего параметры механических узлов трансмиссии, движителей и МТА [6].

Вторая глава посвящена определению параметров и режимов функционирования электромеханической трансмиссии трактора.

На основании анализа наиболее экономичных режимов работы ДВС, где практически при любой загрузке в рабочей зоне характеристики меньший удельный

расход топлива соответствует более низкому скоростному режиму, предложен графоаналитический метод согласования параметров моторно-трансмиссионной установки, позволяющий на основании внешней характеристики ДВС определить параметры мотор-генератора (МГ), номинальная частота вращения которого выбирается равной скорости вращения ДВС в точке максимального момента [5,9]. Далее, с учетом структурной схемы трансмиссии, построенной на базе серийных узлов трактора «Беларус-3022» и технических требований на разработку трактора тягового класса 5 определены параметры тягового электродвигателя (ТД).

Поскольку заданием АТ-02.43 ГНТП «Машиностроение» предусматривалось создание модельного ряда тракторов мощностью 220...264 кВт, то параметры электропривода выбирались для двух двигателей – Deutz BF 06M1013 и TCD 2013 L06 4V мощностью 220 и 264 кВт соответственно. Совмещение внешних скоростных характеристик указанных ДВС с характеристиками МГ, определенными по предложенной методике, приведены на рисунках 1 и 2.

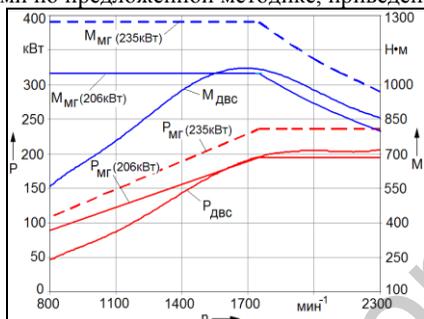


Рисунок 1. – Совмещение внешней характеристики ДВС Deutz BF 1013 и характеристик МГ мощностью 206 и 235 кВт

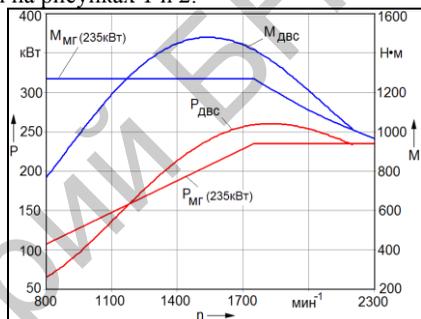


Рисунок 2. – Совмещение внешней характеристики ДВС Deutz TCD 2013 L06 4V и характеристик МГ мощностью 235 кВт

Из рисунков 1 и 2 следует, что, на рабочих участках характеристики, двигатели в полном объеме реализуют мощность соответствующих им электромашин. Также на рисунке 1 показано применение электромшины, переразмеренной на 17,5% по отношению к ДВС мощностью 220 кВт, но, позволяющее сократить номенклатуру элементов электропривода для тракторов «Беларус» мощностью 220...264 кВт и создать унифицированную трансмиссию с электромашинами единого типоразмера.

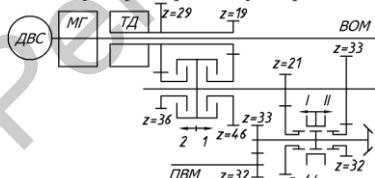


Рисунок 3. – Кинематическая схема диапазонного редуктора

Число диапазонов согласующего редуктора, обеспечивающего перекрытие скоростного ряда трактора от 0 до 40 км/ч при использовании ТД с диапазоном регулирования 2,5 равняется четырем. Кинематическая схема диапазонного редуктора представлена на рисунке 3. Передаточные числа трансмиссии для каждого диапазона равны: $u_i = 140,1; 71,8; 64,8; 33,2$.

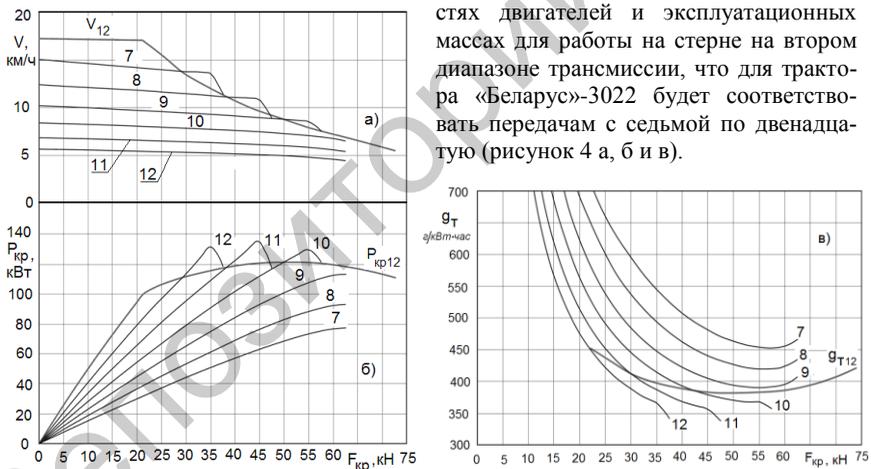
Для оценки тяговых и тягово-приводных возможностей трактора построена теоретическая тяговая характеристика [3, 9], перед построением которой были определены функции зависимости величины буксования для стерни и асфальто-бетонного покрытия от коэффициента использования сцепной массы на крюке $\varphi_{кр}$:

$$\delta_{ст} = 0,007133 \cdot e^{5,65187 \cdot \varphi_{кр}}, \quad (1)$$

$$\delta_{бетон} = 0,00536 \cdot e^{3,536 \cdot \varphi_{кр}}. \quad (2)$$

Данные зависимости получены путем аппроксимации экспоненциальной функцией с помощью пакета Microsoft Excel результатов тяговых испытаний трактора «Беларус»-2822 тягового класса 5 со ступенчатой трансмиссией [13], с учетом того, что для тракторов с бесступенчатыми полнопоточными приводами характерно снижение буксования на 30...35%. При допустимом буксовании $\delta = 0,16$ трактор с электромеханической трансмиссией реализует коэффициент использования сцепной массы на крюке $\varphi_{кр} = 0,55$, что больше на 14,6% чем у трактора со ступенчатой трансмиссией. Таким образом, при эксплуатационной массе 12500 кг трактор с электромеханической трансмиссией реализует тяговое усилие на крюке $F_{кр} = 68,75$ кН, что на 8,75 кН больше, чем у серийного аналога.

Выполнено сравнение теоретических тяговых характеристик тракторов «Беларус»-3023 и «Беларус»-3022 [3, 13], построенных при равных номинальных мощностях двигателей и эксплуатационных массах для работы на стерне на втором диапазоне трансмиссии, что для трактора «Беларус»-3022 будет соответствовать передачам с седьмой по двенадцатую (рисунком 4 а, б и в).



а – по рабочим скоростям движения V_p ; б – по тяговой мощности $P_{кр}$;

в – по удельному расходу топлива g_m

Рисунок 4. – Сравнение тяговых показателей тракторов с электромеханической и механической ступенчатой трансмиссиями

У серийного трактора расход топлива зависит от номера передачи и тягового усилия и сохраняет минимальные значения на узком участке тягового усилия, в то время, как у трактора с электромеханической трансмиссией удельный расход топлива на всем рабочем участке изменяется в пределах от 380,6 до 451,6 г/кВт·ч (ри-

сунок 4 в). Бесступенчатая электромеханическая трансмиссия позволяет плавно регулировать скорость движения и при тяговых усилиях выше 57 кН обеспечивает трактору большую скорость движения и тяговую мощность, что обеспечивает повышение производительности трактора и снижает его удельный расход топлива.

После выбора кинематической схемы трансмиссии и обоснования повышения эксплуатационных качеств трактора, в соответствии с разработанной концепцией, была создана ее конструкция (рисунок 5), имеющая высокую степень унификации 76% узлов и деталей с выпускаемыми на ОАО «МТЗ», что создает благоприятные условия для ее производства. В конструкции применены серийные передний ведущий мост (ПВМ) и его привод, задний мост тракторов «Беларусь»-3022, сохранена конструкция заднего вала отбора мощности (ВОМ), привода насоса трансмиссии и гидравлической системы [16].

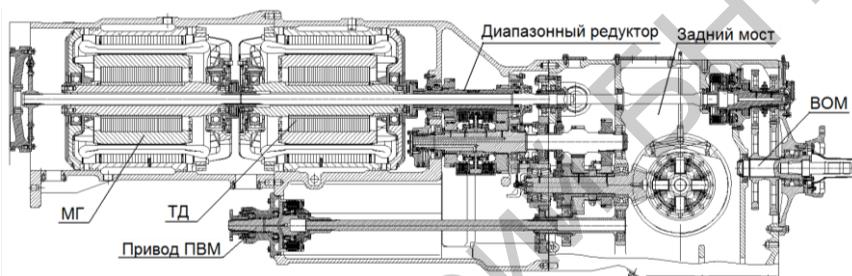


Рисунок 5. – Электромеханическая трансмиссия (продольный разрез)

На основании анализа основных технологических операций, выполняемых трактором тягового класса 5, разработаны алгоритмы совместного управления ДВС, тягового электропривода и диапазонного редуктора.

В третьей главе диссертации рассмотрены вопросы моделирования процессов разгона колесного трактора в составе различных МТА.

Предложена методика, позволяющая на стадии разработки эскизного проекта, провести оценку выбранных параметров трансмиссии на основании анализа разгонных качеств трактора [11], определенных по теоретической диаграмме разгона МТА (рисунок 6), иллюстрирующей характер изменения скорости движения.

В результате интегрирования с учетом ряда допущений дифференциального уравнения движения трактора, были получены выражения для определения времени разгона t_1 и t_2 трактора на первом и втором участках диаграммы до заданной технологической скорости V_2 :

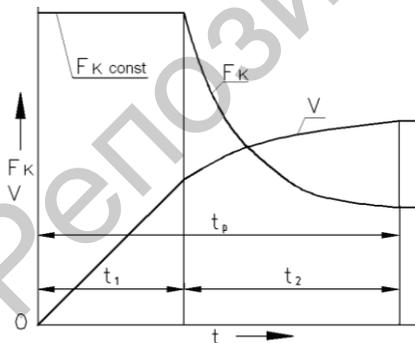


Рисунок 6. – Теоретическая диаграмма разгона МТА с электромеханической трансмиссией

$$t_1 = \frac{m_{мта}}{F_k - F_c} \cdot V_1, \text{ при } F_k > F_c; \quad (3)$$

$$t_2 = \frac{m_{мта}}{F_c^2} ((-F_c \cdot V_2 - P_k \cdot \ln(-F_c \cdot V_2 + P_k)) - (-F_c \cdot V_1 - P_k \cdot \ln(-F_c \cdot V_1 + P_k))), \quad (4)$$

где $m_{мта}$ – масса МТА; F_k – касательная сила тяги; F_c – суммарная сила сопротивления движению; $P_k = P_{тдн} \cdot \eta_{тр}$ – мощность на ведущих колесах; $P_{тдн}$ – номинальная мощность ТД; $\eta_{тр}$ – КПД трансмиссии; V_1 – скорость, развиваемая трактором при номинальной частоте вращения ротора ТД.

Ускорение трактора рассчитывается по выражению:

$$a = \frac{M_{тадн} \cdot u_{тр} \cdot \eta_{тр} - m_{мта} \cdot g \cdot f \cdot r_k}{m_{тадн} \cdot r_k}, \quad (5)$$

где $M_{тадн}$ – номинальный момент электродвигателя; $u_{тр}$ – передаточное число трансмиссии; g – ускорение свободного падения; f – коэффициент сопротивления качению; r_k – динамический радиус колеса;

Комплексную оценку разгонным качествам трактора дает величина максимального продольного ускорения a_{max} , величина которого, согласно практическим рекомендациям, должна лежать в пределах:

$$2,65 \text{ м/с}^2 \geq a_{max} \geq 1,96 \text{ м/с}^2. \quad (6)$$

По результатам расчета определено, что трансмиссия обеспечивает разгон МТА на любых операциях при наличии диапазона с передаточным числом $u_{тр} = 140$, и возможности переключения «на ходу» редуктора режимов «поле» – «дорога». Даны рекомендации по улучшению разгонных качеств трактора путем увеличения номинального крутящего момента ТД $M_{тадн}$ до 1730 Нм.

Для моделирования движения колесного трактора с тяговым электроприводом сформирована блочная структурная схема (рисунок 7).

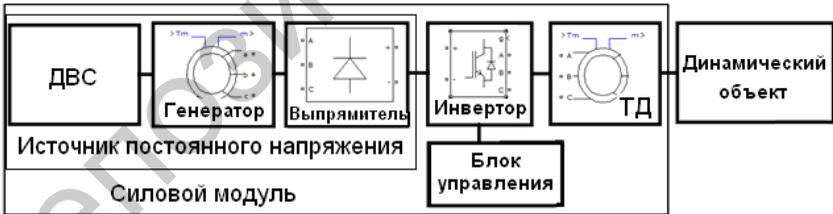
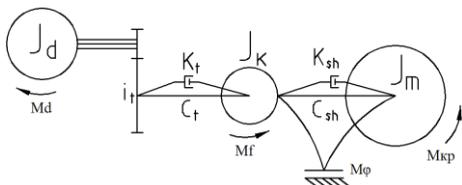


Рисунок 7. – Структурная схема трактора с электромеханической трансмиссией

ДВС, генератор и выпрямитель объединены в один блок – источник постоянного напряжения, обеспечивающий электродвигатель мощностью, необходимой для его работы. Элементами системы моделирования являются: инвертор напряжения с блоком управления, ТД и динамический объект.

При исследовании разгонных качеств трактора будем считать его движение прямолинейным, а сцепление всех ведущих колес с почвой одинаковым. В этом случае расчетную схему динамического объекта, можно упрощенно представить в



J_d, J_k, J_m – моменты инерции электродвигателя, приведенный момент инерции ведущих колес, момент инерции машины; C_t, C_{sh} – коэффициенты жесткости валов трансмиссии и приведенный коэффициент жесткости валов ведущих колес; K_t, K_{sh} – коэффициенты демпфирования валов трансмиссии и приведенный коэффициент жесткости валов ведущих колес; M_f – момент сопротивления качению колеса; M_{kp} – момент, создаваемый силой на крюке; $M\phi$ – сцепление ведущих колес с дорожным покрытием; i_t – передаточное число коробки передач

Рисунок 8. – Расчетная схема динамического объекта

$$\begin{cases} J_d \ddot{\varphi}_d + \frac{C_t}{i_t^2} (\varphi_d - \varphi_k) + \frac{K_t}{i_t^2} (\dot{\varphi}_d - \dot{\varphi}_k) = M_d; \\ \frac{J_k}{i_t} \ddot{\varphi}_k - \frac{C_t}{i_t^2} (\varphi_d - \varphi_k) - \frac{K_t}{i_t^2} (\dot{\varphi}_d - \dot{\varphi}_k) + \frac{C_{sh}}{i_t^2} (\varphi_k - \varphi_m) + \frac{K_{sh}}{i_t^2} (\dot{\varphi}_k - \dot{\varphi}_m) = -\frac{M_f}{i_t}; \\ \frac{J_m}{i_t} \ddot{\varphi}_m - \frac{C_{sh}}{i_t^2} (\varphi_k - \varphi_m) - \frac{K_{sh}}{i_t^2} (\dot{\varphi}_k - \dot{\varphi}_m) = -\frac{F_{kp} \cdot h_{kp}}{i_t}, \end{cases} \quad (7)$$

где J_d, J_k, J_m – моменты инерции ТД, колеса и маховика, эквивалентного поступательно движущейся массе трактора; $J_m = m \cdot r_m^2$ – момент инерции маховика, эквивалентного поступательно движущейся массе трактора; m – масса машины; r_m – радиус эквивалентного маховика; C_t, C_{sh} – жесткости вала трансмиссии и шины; K_t, K_{sh} – коэффициенты демпфирования вала трансмиссии и шины; $\varphi_d, \dot{\varphi}_d, \ddot{\varphi}_d, \varphi_k, \dot{\varphi}_k, \ddot{\varphi}_k, \varphi_m, \dot{\varphi}_m, \ddot{\varphi}_m$ – углы, скорости вращения и угловые ускорения ТД, колеса и маховика, эквивалентного поступательно движущейся массе трактора; $M_f = f \cdot m \cdot g \cdot r_k$ – момент сопротивления качению колеса; M_d – момент на валу ТД; i_t – передаточное число трансмиссии; f – коэффициент сопротивления качению, соответствующий рассматриваемым условиям движения.

Поступательная скорость трактора V_m и сила тяги F_k вычисляются по выражениям

$$V_m = \dot{\varphi}_m \cdot r_k \cdot (1 - \delta_0 \cdot e^{b \cdot \varphi_{kp}}); \quad (8)$$

$$F_k = C_{sh} (\varphi_{kp} - x / r_k) / r_k, \quad (9)$$

виде трехмассовой модели «электродвигатель – колесо – поступательно движущаяся масса трактора» (рисунок 8) [6], где параллельные ветви передних и задних ведущих колес объединены в элемент с приведенными к заднему колесу параметрами J_k, C_{sh} и K_{sh} . Используя известные выражения для эквивалентных крутильных систем, составим систему уравнений движения трехмассовой системы (рисунок 8) с учетом диссипации энергии, и параметрами, приведенными к валу электродвигателя:

где буксование колес при отсутствии тяговой нагрузки на крюке δ_0 и коэффициент b берутся из выражений (1) и (2) в зависимости от типа дорожного покрытия.

В качестве математической модели управляемого векторным способом асинхронного ТД с короткозамкнутым ротором принята известная система уравнений теории обобщенной электромашин, упрощенная методом пространственного вектора:

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_S &= r\bar{i}_R + \tilde{L}_S \frac{d\bar{i}_S}{dt} + j\omega_k \tilde{L}_S \bar{i}_S - \frac{k_R}{T_R} \bar{\psi}_R + jk_R p \dot{\phi}_d \bar{\psi}_R; \\ 0 &= -k_R R_R \bar{i}_S + \frac{1}{T_R} \bar{\psi}_R + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j(\omega_k - p \dot{\phi}_d) \bar{\psi}_R; \\ M_d &= \frac{3}{2} p k_R \cdot \text{Mod}(\bar{\psi}_R \times \bar{i}_S); \\ J_d \frac{d\dot{\phi}_d}{dt} &= M_d - M_C, \end{aligned} \right\} (10)$$

где $r = R_S + \frac{L_m^2}{L_R} R_R$; $\tilde{L}_S = L_S + \frac{L_m^2}{L_R}$; $k_R = \frac{L_m}{L_R}$; $T_R = \frac{L_R}{R_R}$;

\bar{u}_S – вектор напряжения статора; $\bar{\psi}_R$ – результирующий вектор потокосцепления ротора; \bar{i}_S , \bar{i}_R – векторы токов статора и ротора соответственно; j – мнимая единица; p – число пар полюсов; R_S , R_R , L_S , L_R , L_m – активные сопротивления, полные индуктивности обмоток статора и ротора, индуктивность от главного потока; M_d , M_C – электромагнитный момент ТД и приведенный к его валу момент сопротивления; ω_k – частота вращения системы координат; Mod – модуль векторного произведения; T_R – электромагнитная постоянная времени ТД.

Таким образом, динамическая модель для исследования разгона трактора с электромеханической трансмиссией является совокупностью систем уравнений (10) и (7), моделирующих работу асинхронного электродвигателя с векторным управлением и описывающих движение трехмассовой системы, и выражений (8) и (9), связывающих их со скоростными и тяговыми показателями трактора. Расчеты переходных процессов проведены на базе компьютерной модели системы «Асинхронный двигатель – динамический объект», разработанной в среде Mathlab-Simulink [6]. Структура модели показана на рисунке 9.

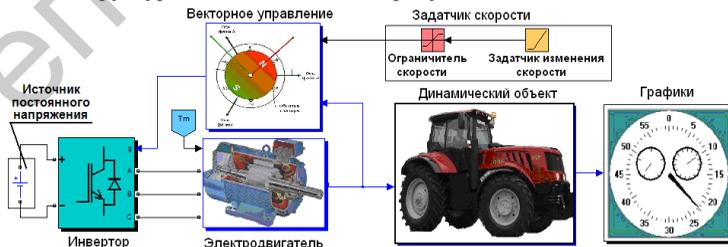


Рисунок 9. – Компьютерная модель системы «Асинхронный двигатель-динамический объект»

При моделировании операции вспашки производится разгон трактора без нагрузки на крюке, а при достижении установленной рабочей скорости, добавляется нагрузка $F_{кр}$, что соответствует заглоблению плуга. На рисунках 10 и 11 представлены временные диаграммы различных показателей при разгоне до максимальной скорости первого диапазоне равной 8,79 км/ч.



Рисунок 10. – Диаграмма временных процессов ($K_{sh} = 20000 \text{ Н·м·с/рад}$)



Рисунок 11. – Диаграмма временных процессов ($K_{sh} = 80000 \text{ Н·м·с/рад}$)

Расчет проведен для шин с различными приведенными коэффициентами вязкого сопротивления K_{sh} . Из графиков следует, что заданная скорость устанавливается за 4 секунды в независимости от характеристики шины. Время переходного процесса после добавления нагрузки зависит от характеристик шины и составляет 2,3 с для шины с $K_{sh} = 80000 \text{ Н·м·с/рад}$ и 8,3 секунды для шины с $K_{sh} = 20000 \text{ Н·м·с/рад}$, то есть время переходного процесса уменьшается с увеличением вязкого сопротивления.

Моделирование динамических процессов при разгоне до скорости 8,79 км/ч на втором диапазоне, показало увеличение времени переходного процесса, амплитуды электромагнитного момента и времени буксования. Сделан вывод о том, что для операций с большими тяговыми усилиями предпочтительно использовать пониженный диапазон редуктора, где ТД работает на более высоких оборотах.

Проведено моделирование работы трактора на транспортных операциях, наиболее тяжелой из которых является разгон до максимальной скорости 40 км/ч трактора с прицепом массой 40 000 кг (рисунки 12 и 13).



Рисунок 12. – Диаграмма временных процессов ($Slope=40 \text{ Гц/с}$)

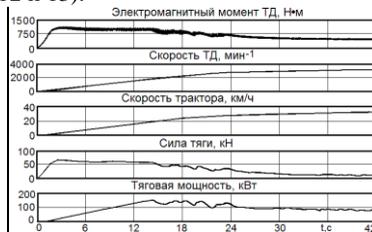


Рисунок 13. – Диаграмма временных процессов ($Slope=20 \text{ Гц/с}$)

На транспортных операциях наибольшее влияние на характер переходного процесса оказывает скорость изменения сигнала $Slope$ в задатчике скорости. При резком старте ($Slope = 40 \text{ Гц/с}$ – рисунок 12) ток в обмотках статора достигает 1200 А, электромагнитный момент возрастает до 1650 Н·м. Наблюдается буксование ведущих колес. При более плавном изменении скорости в задатчике ($Slope=20 \text{ Гц/с}$ – рисунок 13) ток и электромагнитный момент на начальном временном участке снижены

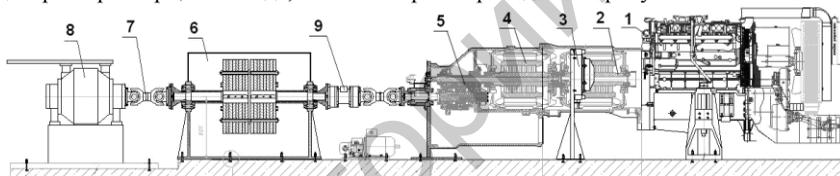
до величин 710 А и 1270 Н·м соответственно, график силы тяги иллюстрирует отсутствие буксования ведущих колес.

По математической модели, проведен расчет переходных процессов для трактора мощностью 264 кВт, показавший, что с моторно-трансмиссионной установкой большей мощности, трактор на полевых операциях реализует скорость 9,4 км/ч, что на 2,1 км/ч больше, на транспортных операциях время разгона до максимальной скорости составляет 23 с, что на 12 с меньше, чем у трактора мощностью 220 кВт, что говорит об увеличении производительности МТА.

Таким образом, модель для исследования разгонных качеств трактора с электромеханической трансмиссией позволяет провести проверку работы электропривода, выбрать рабочий диапазон, характеристики двигателей и системы управления на основании анализа переходных процессов при выполнении трактором различных технологических операций.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям колесного трактора с электромеханической трансмиссией и стендовым испытаниям его моторно-трансмиссионной установки (МТУ).

Целью стендовых испытаний МТУ, включающей ДВС, МГ, ТД, блок силовой электроники и редуктор диапазонов являлось определение ее параметров и согласование работы электромашин и ДВС. Испытания проводились в испытательном центре «Трактор», на стенде, схема которого приведена на рисунке 14.



1 – ДВС Deutz BF 06M 1013; 2 – генератор; 3 – блок силовой электроники; 4 – ТД; 5 – двухступенчатый редуктор диапазонов; 6 – инерционные массы; 7 – вал карданный; 8 – гидротормоз DT900-2-7 (Hogiba); 9 – датчик измерения крутящего момента
Рисунок 14. – Схема стенда для испытания моторно-трансмиссионной установки электромеханической трансмиссии

Управление и контроль агрегатами сосредоточены на пульте, куда заведены сигналы от приборов, позволяющих регистрировать крутящие моменты и скорости вращения на различных звеньях трансмиссии, расход топлива ДВС, токи и напряжения на обмотках электромашин, температуру охлаждающей жидкости МГ, ТД и блока силовой электроники.

МГ, ТД и блок силовых преобразователей имеют КПД, изменяющийся в зависимости от частоты вращения и передаваемой мощности. Однако, обороты и момент ТД обусловлены требованиями к выполняемой технологической операции и внешними нагрузками на МТА и не могут быть произвольно изменены. Задача системы совместного управления ДВС и трансмиссией – обеспечить передачу необходимой мощности к электродвигателю. Для решения данной задачи экспериментально определен закон управления оборотами ДВС от мощности на выходном валу ТД, обеспечивающий минимальный удельный расход топлива, в то время, как регулирование скорости трактора со ступенчатой трансмиссией осуществляется

выбором передачи трансмиссии при работе ДВС на номинальной частоте. Эксперимент проводился по следующей методике:

установить скорость вращения ТД в пределах 1800...2100 мин⁻¹; задать постоянную нагрузку на гидравлическом тормозе; проводить плавное изменение оборотов ДВС с регистрацией удельного расхода топлива; операции повторить для различных нагрузок с шагом в 10 кВт. По результатам эксперимента построены кривые зависимостей, представленные на рисунках 15 и 16.

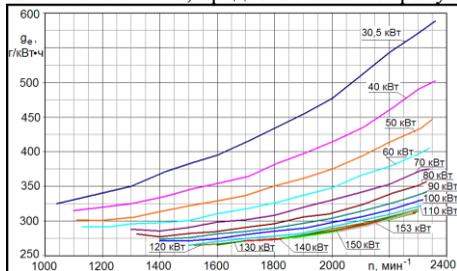


Рисунок 15. – Зависимость удельного расхода топлива на единицу выходной мощности ТД от оборотов ДВС для различных фиксированных мощностей

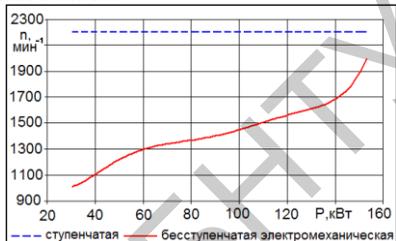


Рисунок 16. – Закон управления оборотами ДВС в зависимости от используемой мощности на ТД с минимальным расходом топлива

Проведя аппроксимацию результатов эксперимента в пакете Microsoft Excel в виде полинома шестой степени, получен закон управления оборотами ДВС в зависимости от мощности $P_{ТД}$, реализуемой электродвигателем:

$$n_{ДВС} = 10^{-8} \cdot (P_{ТД})^6 - 7 \cdot 10^{-6} \cdot (P_{ТД})^5 + 0,0014 \cdot (P_{ТД})^4 - 0,1503 \cdot (P_{ТД})^3 + 8,2713 \cdot (P_{ТД})^2 - 213,84 \cdot P_{ТД} + 3043 \quad (11)$$

Зависимость (11) с высокой степенью достоверности описывает результаты испытаний для $P_{ТД}$ от 30,5 до 153 кВт (коэффициент корреляции составляет 0,986), и была реализована в качестве закона управления ДВС в контроллере верхнего уровня, согласующего работу элементов силовой установки.

На рисунках 17 и 18 приведены графики сравнения удельного расхода топлива для МТУ тракторов с различными видами трансмиссий.

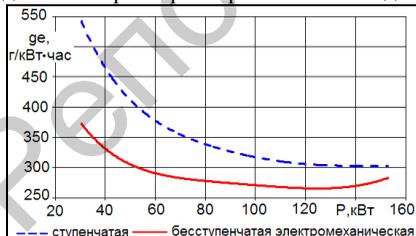


Рисунок 17. – Удельный расход топлива при использовании ступенчатой механической и электромеханической трансмиссии

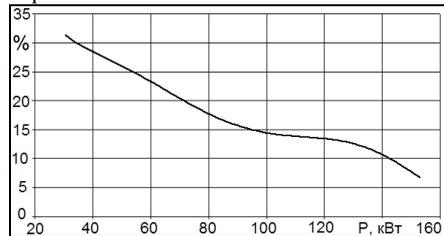


Рисунок 18. – Экономия топлива при использовании электромеханической трансмиссии в сравнении со ступенчатой трансмиссией

Графики иллюстрируют, что полученный закон управления ДВС, обеспечивает топливную экономичность 5...30% в зависимости от используемой мощности. Учитывая, что средняя годовая загрузка трактора тягового класса 5 равна 75,7%, топливная экономия при использовании трактора с электромеханической трансмиссией составит 11,4% в сравнении с серийным аналогом.



Рисунок 19. – Опытный образец колесного трактора «Беларусь»-3023

ОАО «МТЗ» по заданию ГНПП «Машиностроение» АТ-02.43 № ГР 20114803.

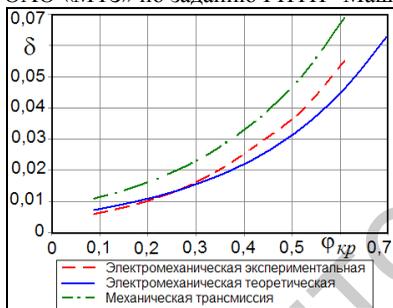


Рисунок 20. – Зависимости буксования от коэффициента использования сцепной массы на крюке

Путем аппроксимации результатов тяговых испытаний в виде экспоненциальной функции с помощью пакета Microsoft Excel получена кривая буксования трактора с электромеханической трансмиссией (рисунок 20) от коэффициента использования сцепной массы на крюке и проведено сравнение с графиком буксования трактора-аналога с механической трансмиссией и теоретической зависимостью (2).

Тяговыми испытаниями установлено, что применение полнопоточной бесступенчатой электромеханической трансмиссии снижает величину буксования ведущих колес на 25...35%, повышая тяговый КПД трактора. Отклонение результатов испытаний от величин, рассчитанных по теоретической зависимости (2), составляет 3,8...9,7%, что соответствует требованиям СТБ ИСО 5725-1-2002 – 5725-6-2002. Таким образом, проведенные исследования позволили выявить достаточную степень адекватности полученных теоретических зависимостей величины буксования от коэффициента использования сцепной массы на крюке реальным процессам.

Для проверки адекватности математической модели, разработанной в главе 3, была проведена экспериментальная проверка разгонных качеств трактора «Беларусь»-3023 массой 15100 кг с прицепом массой 40000кг. Для определения действительной скорости трактор был оборудован путевым колесом. Испытания проводились для задания скорости трактора от джойстика, педали и в автоматическом режиме. Результаты испытаний для разгона на транспортных диапазонах отражены на графиках (рисунки 21 и 22).

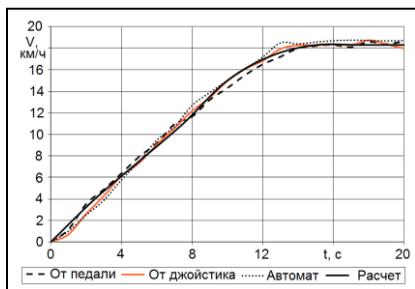


Рисунок 21. – Разгон трактора с прицепом массой 40 000 кг на третьем диапазоне

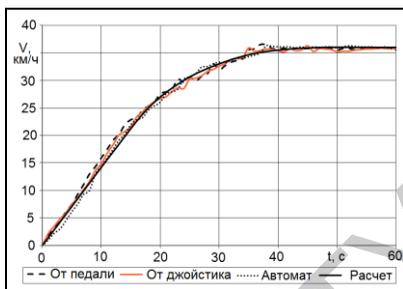


Рисунок 22. – Разгон трактора с прицепом массой 40 000 кг на четвертом диапазоне

Результаты испытаний показали, что выбранные параметры трансмиссии трактора обеспечивают разгон МТА до требуемой скорости на основных операциях и подтвердили адекватность математической модели для исследования разгонных качеств трактора. Отклонение результатов испытаний от значений, полученных при математическом моделировании, составило 1,6...8,8%, что соответствует требованиям СТБ ИСО 5725-1-2002 – 5725-6-2002.

Для определения степени улучшения эксплуатационных качеств трактора при применении электромеханической трансмиссии, были проведены сравнительные испытания тракторов «Беларусь»-3023 и «Беларусь»-3022ДЦ. По результатам испытаний, на определенных видах работ топливная экономия на тракторе с электромеханической трансмиссией достигала 16%, увеличению производительности составило 3,2%, что подтвердило результаты теоретических расчетов. Отмечено повышение комфорта оператора, что снижает его утомляемость и уменьшает операционное время при управлении МТА.

Экономический эффект от использования трактора «Беларусь»-3023, с электромеханической трансмиссией, в сравнении с серийным аналогом «Беларусь»-3022ДЦ, рассчитанный на основании результатов испытаний, составляет 52 млн. рублей, что обусловлено снижением времени обслуживания и потребления горюче-смазочных материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Графоаналитический метод выбора рациональных параметров моторно-трансмиссионной установки колесного трактора и определения алгоритмов совместной работы ее элементов [1, 5, 9], отличающийся учетом структурной схемы трансмиссии, построенной на базе серийных узлов, при помощи которого для трактора мощностью 220 кВт (300 л.с.) определены: мощность генератора $P_{МГ} = 206$ кВт, мощность электродвигателя $P_{ТД} = 183$ кВт, номинальные обороты генератора $n_{МГн} = 1750$ мин⁻¹, номинальные обороты электродвигателя $n_{ТДн} = 1440$ мин⁻¹;

2. Математическая модель для исследования процесса разгона трактора с электромеханической трансмиссией, отличающаяся представлением дизель-генераторной установки в виде источника постоянного напряжения, учетом харак-

теристик асинхронного электродвигателя переменного тока с векторным управлением, характеристик механических узлов трансмиссии и движителей, позволившая провести расчет динамических нагрузок трактора на различных режимах работы и на их основании выбрать параметры трансмиссии и системы ее управления, что обеспечило снижение топливного потребления трактора на 11,4% [1, 6];

3. Методика оценки параметров электромеханической трансмиссии на основании анализа разгонных качеств трактора, отличающаяся учетом характеристики тягового электродвигателя [6, 11], позволившая на стадии разработки эскизного проекта произвести оценку выбранного электродвигателя, определить его минимальную мощность и передаточные числа диапазонного редуктора механической части трансмиссии $u_i=140,1; 71,8; 64,8; 33,2$;

4. Концепция создания бесступенчатой трансмиссии колесного трактора «Беларус»-3023 тягового класса 5 [2, 3, 16] на базе серийной трансмиссии 2822-0002000-Б трактора «Беларус»-3022 с высокой степенью унификации серийных узлов и деталей 76%, отличающаяся наличием тягового электропривода, что позволяет увеличить на 3,2% производительность трактора в сравнении с базовой моделью, имеет социальный эффект, выражающийся в облегчении труда оператора, и обеспечивает годовую экономию денежных средств при эксплуатации одного трактора «Беларус»-3023 в размере 52 млн.рублей.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Графоаналитический метод согласования и выбора параметров моторно-трансмиссионной установки [1, 5, 9], математическая модель для исследования процесса разгона трактора с электромеханической трансмиссией [9, 10] нашла применение в практической работе УКЭР-1 ОАО «МТЗ» при проектировании тракторов с бесступенчатыми электромеханическими трансмиссиями полнопоточного типа [4, 7, 8] в рамках НИиОКР, что подтверждается соответствующим актом внедрения результатов диссертационных исследований.

Методика оценки параметров трансмиссии на основании анализа разгонных качеств трактора и методика расчета тяговой характеристики колесного трактора с электромеханической трансмиссией [3, 9, 12, 13] могут быть использованы при создании новых моделей тракторов высокого технического уровня различных тяговых классов.

Методика экспериментального определения закона управления ДВС, обеспечивающего максимальную топливную экономичность нашла применение при разработке законов управления программного обеспечения контроллера верхнего уровня для пяти образцов тракторов «Беларус»-3023 с двигателями Deutz BF06V1013, и может быть использована в инженерной практике для определения закона управления оборотами ДВС в зависимости от реализуемой мощности для двигателей других моделей.

Разработанная в соответствии с предложенной концепцией конструкция бесступенчатой электромеханической трансмиссии была внедрена на опытных образцах трактора «Беларус»-3023 мощностью 220 кВт [2, 3, 16].

По результатам исследований предложены структурные схемы и конструкции электромеханических трансмиссий транспортных средств и их узлов, новизна которых подтверждена патентами на изобретение Республики Беларусь, Украины и Российской Федерации [14, 15, 16].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи, отвечающие требованиям пункта 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоения ученых званий в Республике Беларусь

1. Амельченко, П.А. Выбор типа и параметров современной тракторной трансмиссии / П.А. Амельченко, Д.А. Дубовик, И.Н. Жуковский, А.В. Ключников, А.И. Жуковский // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – №8. – С. 14-19.
2. Ключников, А.В. Тенденции развития трансмиссий колесных тракторов / А.В. Ключников // Техника и оборудование для села. – 2012. – №1 – С. 43-47.
3. Амельченко, П.А. Электрическая тяга и электроотбор мощности с.х. трактора / П.А. Амельченко, И.Н. Жуковский, А.Г. Стасилевич, А.В. Ключников, А.И. Жуковский // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – №9. – С. 3-10.
4. Ключников, А.В. Анализ возможных структурных схем электромеханических трансмиссий колесных тракторов / А.В. Ключников // Наука и техника. – 2012. – №2. – С. 56-58.
5. Ключников, А.В. Согласование параметров двигателя внутреннего сгорания и электромеханической силовой передачи колесного трактора / А.В. Ключников // Наука и техника. – 2012. – №3. – С. 42-46.
6. Амельченко, П.А. Особенности разгона сельскохозяйственного машинно-тракторного агрегата на электрической тяге / П.А. Амельченко, И.Н. Жуковский, Н.Н. Гурский, А.В. Ключников, А.В. Вашула // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – №8. – С. 23-28.

Другие статьи

7. Шарангович, А.И. Особенности конструкций гидропередач двухпоточных трансмиссий тракторов / А.И. Шарангович, А.В. Ключников // Механика – машиностроению: сб. науч. тр. Международной научно-технической конференции “Инновации в машиностроении” и IV Международного симпозиума по трибофатике МСТФ 2010 ОИМ НАН Беларуси, Минск, 26-29 окт. 2010г. / ОИМ НАН Беларуси; редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. – Минск, 2010. – С. 199-203.

Материалы конференций

8. Ключников, А.В. Анализ структурных схем электромеханических трансмиссий для колесных тракторов / А.В. Ключников // Проблемы проектирования мобильных машин: материалы 9-й науч.-практич. конф. “Наука – образованию, производству, экономике”, Минск, 25-26 октября 2011 г.: в 2 ч. – Минск: БНТУ, 2012. – Ч. I и II. – С. 106-109.
9. Гуськов, В.В. Методика построения совместной характеристики двигателя и электромеханической трансмиссии / В.В. Гуськов, А.В. Ключников, В.А. Адаш // Проблемы проектирования мобильных машин: материалы 9-й науч.-практич. конф. “Наука – образованию, производству, экономике”, Минск, 25-26 октября 2011 г.: в 2 ч. – Минск: БНТУ, 2012. – Ч. I и II. – С. 68-71.
10. Гуськов В.В. Методика расчета теоретической тяговой характеристики колесного трактора с электромеханической трансмиссией / В.В. Гуськов, Н.И. Зезетко, И.А. Колтович, А.В. Ключников, А.Г. Стасилевич // Проблемы про-

ектирования и развития тракторов, мобильных машин, городского электротранспорта: Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию кафедры «Тракторы» БНТУ 23-24 ноября 2013 г. / Минск: БНТУ, 2013. – С. 40-46.

11. Жуковский А.И. Разгон колесного трактора с электромеханической трансмиссией / А.И. Жуковский, А.В. Ключников, М.А. Струк // Проблемы проектирования и развития тракторов, мобильных машин, городского электротранспорта: Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию кафедры «Тракторы» БНТУ 23-24 ноября 2013 г. – Минск: БНТУ, 2013. – С. 85-90.

12. Сазонов, И.С. Электрическая тяга и электроотбор мощности сельскохозяйственного трактора // И.С. Сазонов, П.А. Амелъченко, И.Н. Жуковский, А.В. Ключников / Материалы международной научно-технической конференции “Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии” часть 2 / Могилев, 18-19 апреля 2013 г. – Могилев: ГУ ВПО “Белорусско-российский университет”, 2013. – С. 70-71.

13. Амелъченко, П.А. Тяговый электропривод и электроотбор мощности как этап развития теории и конструкции сельскохозяйственного трактора // П.А. Амелъченко, И.Н. Жуковский, А.П. Пугачев, П.Ф. Каминский, А.Г. Стасилевич, Ключников А.В. / Актуальные вопросы машиноведения: сборник научных трудов/ ОИМ НАН Беларуси. – Минск, 2014. – Вып.3 – С. 88-94.

Патенты

14. Электромеханическая трансмиссия транспортного средства: пат. 14691 Респ. Беларусь МПК4 В 60К 17/08, В 60Е 11/02 / А.А. Пуховой, И.Н. Усс, М.Г. Мелешко, А.Г. Стасилевич, И.И. Болвако, А.П. Любчевский, А.И. Шарангович, А.В. Ключников; заявитель РУП Минский тракторный завод. – № а 20091151; заявл. 2009.07.28; опубл. 2011.02.28 // Нац. центр интеллектуал. собственности. – 5 с.

15. Ведущий мост транспортного средства: пат. 16201 Респ. Беларусь МПК3 В 60К 7/02, В 60К 17/14 / И.Н. Усс, М.Г. Мелешко, А.Г. Стасилевич, О.И. Жичко, Ю.А. Васильев, А.В. Ключников; заявитель РУП Минский тракторный завод. – № а 20100873; заявл. 2010.06.07; опубл. 2012.02.28 // Нац. центр интеллектуал. собственности. – 6 с.

16. Электромеханическая трансмиссия транспортного средства: пат. 15699 Респ. Беларусь МПК7 Н 02К 7/18, В 60К 7/00 / И.Н. Усс, М.Г. Мелешко, А.Г. Стасилевич, Ю.Н. Козловский, А.Н. Рачков, А.В. Ключников; заявитель РУП Минский тракторный завод. – № а 20100874; заявл. 2010.06.07; опубл. 2012.02.28 // Нац. центр интеллектуал. собственности. – 5 с.



РЭЗІЮМЭ

Ключнікаў Аляксей Уладзіміравіч

Павышэнне эксплуатацыйных якасцей трактара шляхам выбару рацыянальных параметраў электрамеханічнай трансмісіі

Ключавыя словы: трактар, бясступенчатая трансмісія, цягавы электрапрывад, працэс разгону, закон кіравання, ўзгадненне параметраў.

Мэта работы – павышэнне прадукцыйнасці і эканамічнасці машына-трактарных агрэгатаў за кошт распрацоўкі і выбару аптымальных параметраў бесступенчатой электрамеханічнай трансмісіі з сумесным кіраваннем рухавіком унутранага згарання і трансмісіяй для колавага трактара цягавага класа 5 з рухавіком магутнасцю 220... 264 кВт.

Для дасягнення пастаўленай у дысертацыі мэты выкарыстоўваліся графааналітычныя метады, метады мадэлявання і разліковыя метады.

У дысертацыі прадстаўлены наступныя вынікі, атрыманыя ўпершыню:

1. Графааналітычны метады выбару рацыянальных параметраў маторна-трансмісійнай ўстаноўкі колавага трактара і вызначэння алгарытмаў сумеснай працы яе элементаў, які адрозніваецца ўлікам структурнай схемы трансмісіі, пабудаванай на базе серыйных вузлоў.

2. Матэматычная мадэль для даследавання працэсу разгону трактара з электрамеханічнай трансмісіяй, якая адрозніваецца прадстаўленнем дызель-генератарнай ўстаноўкі ў выглядзе крыніцы пастаяннага напружання, ўлікам характарыстык асінхроннага электрухавіка пераменнага току з вектарным кіраваннем, характарыстык механічных вузлоў трансмісіі і колаў, якая дазволіла правесці разлік дынамічных нагрузак трактара на розных рэжымах працы.

3. Методыка ацэнкі параметраў электрамеханічнай трансмісіі на падставе аналізу разгонных якасцяў трактара з ўлікам характарыстыкі цягавага электрухавіка.

4. Вынікі даследаванняў па эксперыментальным азначэнні закона кіравання рухавіка ўнутранага згарання, які забяспечвае максімальную паліўную эканамічнасць трактара з электрамеханічнай трансмісіяй.

5. Канцэпцыя стварэння бесступенчатой электрамеханічнай трансмісіі колавага трактара цягавага класа 5 на базе серыйнай трансмісіі трактара «Беларусь»-3022.

Рэалізацыя прапанаваных метадаў дазволіла выбраць рацыянальныя параметры электрамеханічнай трансмісіі колавага трактара, прымяненне якой палепшыла эксплуатацыйныя якасці трактары ў параўнанні з серыйным аналагам.

РЕЗЮМЕ

Ключников Алексей Владимирович

Повышение эксплуатационных качеств трактора путем выбора рациональных параметров электромеханической трансмиссии

Ключевые слова: трактор, бесступенчатая трансмиссия, тяговый электропривод, процесс разгона, закон управления, согласование параметров.

Цель работы – повышение производительности и экономичности машинно-тракторных агрегатов за счет разработки и выбора оптимальных параметров бесступенчатой электромеханической трансмиссии с совместным управлением двигателем внутреннего сгорания и трансмиссией для колесного трактора тягового класса 5 с двигателем мощностью 220...264 кВт.

Для достижения поставленной в диссертации цели использовались графоаналитические методы, методы моделирования и расчетные методы.

В диссертации представлены следующие результаты, полученные впервые:

1. Графоаналитический метод выбора рациональных параметров моторно-трансмиссионной установки колесного трактора и определения алгоритмов совместной работы ее элементов, отличающийся учетом структурной схемы трансмиссии, построенной на базе серийных узлов.

2. Математическая модель для исследования процесса разгона трактора с электромеханической трансмиссией, отличающаяся представлением дизель-генераторной установки в виде источника постоянного напряжения, учетом характеристик асинхронного электродвигателя переменного тока с векторным управлением, характеристик механических узлов трансмиссии и движителей, позволившая провести расчет динамических нагрузок трактора на различных режимах работы.

3. Методика оценки параметров электромеханической трансмиссии на основании анализа разгонных качеств трактора с учетом характеристики тягового электродвигателя.

4. Результаты исследований по экспериментальному определению закона управления двигателя внутреннего сгорания, обеспечивающего максимальную топливную экономичность трактору с электромеханической трансмиссией.

5. Концепция создания бесступенчатой электромеханической трансмиссии колесного трактора тягового класса 5 на базе серийной трансмиссии трактора «Беларусь-3022».

Реализация предложенных методов позволила выбрать рациональные параметры электромеханической трансмиссии колесного трактора, применение которой улучшило эксплуатационные качества трактора в сравнении с серийным аналогом.

SUMMARY

Kliuchnikov Alexey

Increasing the performance of the tractor by selecting rational parameters of the electromechanical transmission

Keywords: tractor, continuously variable transmission, electric drive, speeding-up process, law of control, parameters matching.

Thesis objective – increasing the productivity and the efficiency of the tractors by developing and selecting the optimum settings of continuously variable transmission with joint control of the internal combustion engine and the transmission for wheeled tractors of 5th traction class with the engine of capacity range from 220 to 264 kW.

In order to achieve the objective of the thesis there were used graphic-analytical methods, the methods of modeling and calculation methods.

The thesis presents the following results for the first time:

1. The graphic-analytical method of selecting rational parameters of the engine-transmission unit of wheel tractor and determination of the algorithms of its elements work taking into account the different structural scheme of transmission built on the basis of serial pats.

2. The mathematical model for studying the process of acceleration of the tractor with electromechanical transmission which presents diesel generator set as a constant voltage source taking into account the characteristics of the asynchronous electro motor with vector control, the characteristics of the mechanical parts and units of transmission and engines that allowed to make calculation of dynamic loads on the tractor by operation of various modes.

3. The method of estimating the parameters of electromechanical transmission on the basis of the analysis of acceleration qualities of the tractor taking into account the characteristics of the traction electromotor.

4. The results of studies on the experimental determination of the law internal combustion engine control that provides the tractor with electromechanical transmission with maximum fuel efficiency.

5. Concept of the continuously variable transmission of the wheeled tractors of 5th traction class constructed on the basis of serial transmission of the tractor model «Belarus» -3022.

The implementation of the proposed methods allowed to select the rational parameters of electromechanical transmission for wheel tractor that improved the operating parameters of the tractor in comparison to its serial analog.

Научное издание

КЛЮЧНИКОВ
Алексей Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ КАЧЕСТВ
ТРАКТОРА ПУТЕМ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ
ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.05.03 «Колесные и гусеничные машины»

Подписано в печать 26.10.2015. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 1,28. Уч.-изд. л. 1,00. Тираж 75. Заказ 830.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя и распространителя
печатных изданий №1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220010 г. Минск.