

УДК 629.3.027.3

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-104578>

Оригинальное исследование



Математическое моделирование автоматического управления силовой установкой трактора

С.И. Худорожков, А.А. Красильников, М.С. Губачев

Санкт-Петербургский политехнический университет, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Ведущие производители сельскохозяйственных тракторов имеют линейке своей продукции машины с автоматическими коробками перемены передач. Разработка конструкции данного типа трансмиссий, системы управления и алгоритма ее работы является актуальной технической задачей.

В статье рассмотрены вопросы математического моделирования работы автоматической трансмиссии колесного трактора и системы автоматического управления трансмиссией.

Цель работы – определение оптимальных законов автоматического управления двигателем и трансмиссией колесного сельскохозяйственного трактора на различных режимах работы с применением цифровой модели трансмиссии трактора.

Метод исследования. Моделирование условий работы выполнено в программе *Matlab* и его приложениях – *Simulink*, *Simscape*. При этом при помощи фундаментальных блоков данных приложений созданы модели физических компонентов коробки перемены передач и двигателя машины, а также системы управления силовой передачей трактора.

Результаты. Рассмотрен порядок применения пакета программ *MATLab* – *Simulink*, *Simscape* для математического моделирования управления работой трансмиссией. С помощью разработанной математической модели проведена симуляция работы силовой установки трактора в основных режимах работы с целью оптимизации характеристик системы управления.

Заключение. Научная новизна исследования заключается в выборе и оптимизации законов управления трансмиссией в соответствии с требованиями, предъявляемыми к сельскохозяйственным тракторам с автоматической ступенчатой коробкой передач.

Практическая ценность исследования заключается в возможности использования предложенных законов управления для разработки системы управления трансмиссией новых тракторов с автоматической ступенчатой коробкой передач.

Ключевые слова: трансмиссия; система управления; коробка перемены передач; трактор; численное моделирование.

Для цитирования:

Худорожков С.И., Красильников А.А., Губачев М.С. Математическое моделирование автоматического управления силовой установкой трактора // Известия МГТУ «МАМИ». 2022. Т. 16, № 1. С. 61–69. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-104578>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-104578>

Original study article

Mathematical simulation of the automatic control of the tractor power unit

Sergey I. Hoodorozhkov, Andrey A. Krasilnikov, Matvey S. Gubachov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Many manufacturers of agricultural tractors have machines with automatic gearboxes in their product line. The development of the design of this type of transmissions, the control system and the algorithm of its operation is an urgent technical task.

The article considers the issues of mathematical simulation of the working process of the automatic transmission of a wheeled tractor and the automatic transmission control system.

AIMS: The purpose of the work was to determine the optimal control laws of automatic control of a wheeled agricultural tractor engine and transmission in various operating modes using a digital model of the tractor transmission.

METHODS: Simulation of working conditions is performed in the *Matlab* program digital software packages and its applications – *Simulink*, *Simscape*. At the same time, with the help of fundamental data blocks of these applications, models of the physical components of the gearbox and the machine engine and the tractor power transmission control system, are created.

RESULTS: The application procedure of the *MATLab–Simulink*, *Simscape* software package for mathematical modeling of transmission operation control is considered. With the help of the developed mathematical model, a simulation of the tractor power unit operation in the main operating modes was carried out in order to optimize the characteristics of the tractor control system.

The scientific novelty of the research lies in the selection and optimization of the transmission control laws in accordance with the requirements to agricultural tractors with an automatic step gearbox.

CONCLUSION: The practical utility (value) of the research lies in the possibility of using the proposed control laws to develop a transmission control system for new tractors with an automatic step gearbox.

Keywords: *transmission; control system; gearbox; agricultural tractor; numerical simulation.*

Cite as:

Hoodorozhkov SI, Krasilnikov AA, Gubachov MS. Mathematical simulation of automatic control of the tractor power unit. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2022;16(1):61–69. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-104578>

Received: 08.03.2022

Accepted: 10.04.2022

Published: 15.04.2022

ВВЕДЕНИЕ

Все основные мировые производители сельскохозяйственных машин имеют в составе модельного ряда своей продукции тракторы с автоматической коробкой передач. Трактор с автоматической или автоматизированной трансмиссией обеспечивает увеличение производительности и эффективности работы, удобство управления, повышение комфорта оператора. Так, в частности, производитель тракторов *John Deere* приводит результаты полевых испытаний [1], показывающие эффективность тракторов, оснащенных автоматической коробкой перемены передач. Аналогичные данные приводятся в материалах НАТИ [2].

Необходимо отметить, что в настоящее время российские производители сельскохозяйственной техники не производят тракторы с автоматическим управлением двигателем и трансмиссией. При этом остро стоит задача разработки конструкции автоматической коробки перемены передач, системы автоматического управления (САУ) данной коробкой перемены передач и алгоритмов ее работы.

Разработка САУ – сложная задача, требующая комплексного подхода к решению. В этих условиях особую важность приобретают методы исследования, основанные на создании комплексной цифровой модели технической системы с применением различных областей знаний, таких как теория трактора и двигателя внутреннего сгорания (ДВС), конструирование и расчет трансмиссий, оптимизация и программирование, компьютерное моделирование и др. [3, 4, 5, 6, 7]. Системный подход к созданию цифровой модели машинно-тракторного агрегата (МТА) дает возможность исследовать и оптимизировать рассматриваемую систему с большей точностью, чем при рассмотрении составляющих объекта в отдельности. В данной работе в качестве объекта исследования рассматривается сельскохозяйственный трактор семейства «Кировец» с механической коробкой перемены передач (КПП).

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является разработка цифровой модели автоматической трансмиссии колесного трактора, позволяющей путем численного моделирования определять оптимальные алгоритмы работы системы управления силовой установкой трактора в различных режимах работы.

МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Существующие системы управления автоматической трансмиссии трактора могут быть разделены на два типа. Системы постоянной мощности, которые при заданном

положении органа управления (педали) поддерживают постоянный режим работы двигателя и его мощность. Системы постоянной скорости поддерживают постоянную скорость машины [8], значение которой задается органом управления.

Система управления, реализующая режим постоянной скорости при неизменном положении педали подачи топлива должна поддерживать заданную скорость движения трактора постоянной путем автоматического переключения передач и одновременном изменении скоростного режима двигателя. Необходимо отметить, что здесь для решения задачи необходимо учесть большое количество различных факторов, таких как тяговые характеристики реальных тракторных агрегатов, неустановившиеся режимы движения, буксование ведущих колес и др. [9].

В данной работе рассматривается численное моделирование работы САУ трансмиссией трактора в режиме максимальной мощности.

На режиме максимальной мощности управление двигателем и трансмиссией осуществляется в зависимости от нагрузочного и скоростного режимов работы двигателя. При этом работа двигателя должна поддерживаться в режиме близком к номинальному, а в КПП должна быть включена передача с минимальным передаточным числом, обеспечивающая указанный выше режим работы двигателя. Так как педаль акселератора находится в крайнем положении и подача топлива максимальна, регулирование мощности будет происходить только переключением передач, а скорость движения трактора изменяется только дискретно.

В основу предложенной математической модели положен ряд положений, рассматриваемых далее.

Тяговая характеристика трактора показана на рис. 1. Здесь ломаной линией нанесена область тяговой характеристики $N_{кр} = f(P_{кр})$, где машинно-тракторный агрегат работает в режиме автоматического переключения скоростей в КПП.

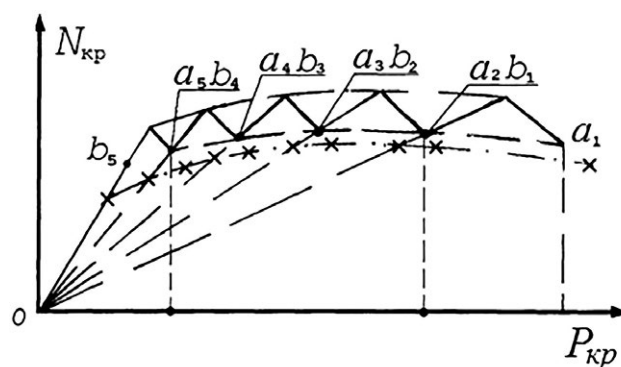


Рис. 1. Теоретическая тяговая характеристика трактора с автоматическим переключением передач.

Fig. 1. Theoretical traction characteristic of a tractor with automatic gear shifting.

Переключение передач осуществляется в точках пересечения графиков $N_{кр} = f(P_{кр})$, соответствующих регуляторному и корректорному участкам регуляторной характеристики дизеля.

Верхняя штриховая линия (потенциальная тяговая характеристика) и средняя штриховые линии на рис. 1 содержат точки, соответственно, наибольших и наименьших значений тяговой мощности, за пределы которых трактор с автоматическим переключением передач выходить не может.

Точка пересечения кривых $N_{кр} = f(P_{кр})$, соответствующих смежным передачам, обладает следующими достоинствами в качестве критерия для переключения передач.

Здесь для принятия решения о изменении режима в КПП – переключение всех передач с пониженной на повышенную и в обратном направлении наоборот – можно использовать только один параметр – крутящий момент двигателя $M_{кр}$, характеризующий режим работы двигателя в двух фиксированных точках M_{max} и M_{min} характеристики, совмещенных на тяговой характеристике в одну точку $a_2b_1, a_3b_2, a_4b_3, a_5b_4$.

Помимо этого, при автоматическом переключении передач в этой точке формируется тяговая характеристика (нижняя штриховая линия), максимально приближенная к потенциальной тяговой характеристике трактора. Правильная работа автоматического управления гарантирует строгое соблюдение запрограммированного закона переключения передач, каким бы узким ни был нагрузочный диапазон работы двигателя, характеризуемый отношением M_{max} / M_{min} .

В общем случае при ручном управлении тракторист не может отследить правильный выбор и своевременное переключение передач, особенно при плотном скоростном ряде, вследствие свойственного человеку биологического барьера восприятия и переработки информации. Ввиду усталости, невнимательности, низкого уровня квалификации и других причин тракторист может допускать работу двигателя как угодно долго в режиме загрузки менее M_{min} . На рис. 1 работа с таким нагрузочным режимом на разных передачах обозначена нижней штрихпунктирной линией. У трактора с автоматическим переключением передач это невозможно.

При одинаковой потенциальной тяговой характеристике граница минимальной тяговой мощности ниже у трактора с ручным управлением. Следовательно, средняя эксплуатационная мощность у этого трактора будет меньше, чем у трактора с автоматическим переключением передач.

Интервал регулирования выбирается с учетом двух условий. С одной стороны, необходимо максимально использовать потенциал двигателя, т. е. максимально уменьшить ширину диапазона регулирования, с другой – не допустить цикличности переключения передач.

На цикличность влияет плотность разбивки передаточных чисел в коробке передач. В основе правила разбивки передаточных чисел трансмиссии, как правило, лежит закон геометрической прогрессии со знаменателем, равным отношению минимального момента двигателя к номинальному:

$$q = \frac{M_{min}}{M_H}, \quad (1)$$

где: M_{min} – минимальный момент двигателя на регулируемом диапазоне, Нм; M_H – номинальный момент двигателя, Нм.

Чем меньше этот параметр, тем больше можно сузить диапазон регулирования, не допуская при этом цикличности переключения передач.

Минимальный возможный диапазон регулирования мощности может быть определен с помощью лучевой диаграммы двух смежных передаточных чисел трансмиссии трактора, построенной на регуляторной характеристике двигателя (рис. 2). Заштрихованная область ограничивает диапазон регулирования. Следовательно, получаем следующее уравнение для минимального диапазона регулирования:

$$\Delta M_{min} = M_{max} \cdot (1 - q), \quad (2)$$

где q – знаменатель геометрической прогрессии разбивки передач.

Переходя к мощности, получаем минимальный диапазон регулирования по мощности:

$$\Delta N_{min} = N_{max} \cdot (1 - q). \quad (3)$$

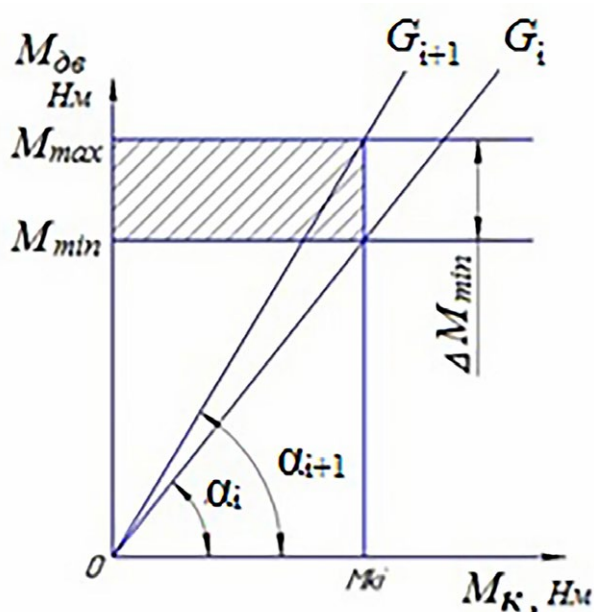


Рис. 2. Лучевая диаграмма двух смежных передач трактора.
Fig. 2. Beam diagram of two adjacent tractor gears.

Важное значение на режиме максимальной мощности приобретает контроль буксования ведущих колес трактора. Буксование более 30% допускать нельзя, так как при этом существенно ухудшаются показатели работы машинно-тракторного агрегата и происходит разрушение почвы. Поэтому при повышенном буксовании САУ необходимо понизить передачу в КПП и уменьшить скоростной режим работы двигателя, а при достижении предельно допустимого буксования по условиям сохранения плодородия почвы сигнализировать о невозможности продолжения работы в данных условиях. Как известно, действительная скорость трактора с учетом буксования может быть определена по формуле:

$$V = V_T \cdot (1 - \delta), \quad (4)$$

здесь V_T – теоретическая скорость трактора, м/с; δ – коэффициент буксования.

Коэффициент δ определяется по формуле:

$$\delta = -0,05 \cdot \frac{P_{кр}}{\varphi \cdot Z_{вк}} \cdot \left[\ln \left(1 - \frac{P_{кр}}{\varphi \cdot Z_{вк}} \right) \right],$$

где $Z_{вк} = 0,85 \cdot mg$ – опорная реакция, действующая на ведущие колеса, Н; $\varphi = 0,8$ – коэффициент сцепления; $P_{кр}$ – предельная сила тяги на колесах, Н.

Таким образом, можно сформулировать основные требования к САУ на режиме максимальной мощности: САУ должна поддерживать работу двигателя трактора в определенном минимальном диапазоне, близком к номинальной мощности, не должна допускать цикличности переключения передач при колебаниях нагрузки на двигатель, не должна допускать буксование ведущих колес трактора более 30%.

Для анализа состава, отладки алгоритма работы системы управления может быть проведено численное математическое моделирование работы автоматической трансмиссии трактора. В данной работе с этой целью использовался пакет программ *MatLAB*. Пакет *MATLab – Simulink u Simscape* [10, 11] имеет фундаментальные блоки, при помощи которых можно создать модели физических компонентов, таких как двигатель внутреннего сгорания, фрикционная муфта управления, зубчатый редуктор, упругие валы, демпфирующие устройства и другие компоненты силовой передачи. Из модели, которая близка по виду к кинематической схеме, *Simscape* автоматически выводит дифференциальные уравнения, характеризующие поведение системы

Пакет *MatLAB – Simulink-Simscape* позволяет осуществить моделирование работы трактора и его САУ на основе системного подхода. Только в случае рассмотрения работы тракторного агрегата, как целостной системы представляется возможным осуществить рациональный подбор и провести оптимизацию параметров всей системы.

Simulink-Simscape модель машинно-тракторного агрегата состоит из следующих основных подсистем-блоков: *Driver, Engine, KPP, Transmission controller, Actuators, Body, Driving axle, Tire, Fuel Consumption, Monitors*. Подробное описание данных подсистем-блоков приведено в работах [12, 13].

Общий вид цифровой модели машинно-тракторного агрегата на базе трактора «Кировец» показан на рис. 3.

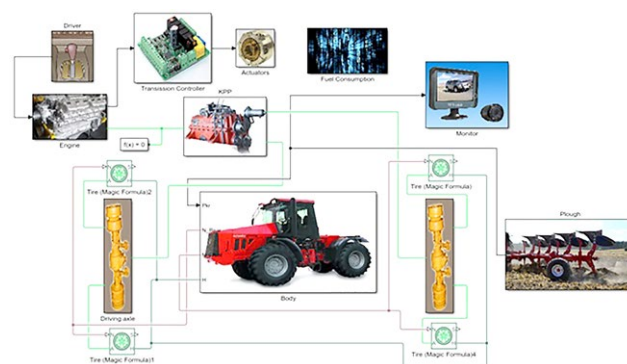


Рис. 3. *Simulink-Simscape* модель машинно-тракторного агрегата.

Fig. 3. *Simulink-Simscape* model of a machine and tractor unit.

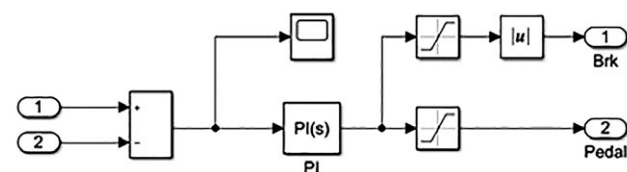


Рис. 4. Подсистема *Driver*.

Fig. 4. *Driver* subsystem.

Для моделирования работы двигателя трактора совместно с автоматической коробкой перемены передач и ее системы управления модель имеет модуль *Driver*. На вход системы управления подается два сигнала: 1 – текущая и 2 – требуемая скорость трактора, задаваемая водителем педалью подачи топлива (рис. 4). Работа системы основана на ПИ регуляторе, который в соответствии с ошибкой управления дает сигналы на подачу топлива в двигатель и определяет уровень тормозного момента.

Подсистема *Engine* включает в себя двумерную таблицу *2-D Lookup Table*, которая вычисляет крутящий момент двигателя в зависимости от подачи топлива – входной порт *Pedal* – и оборотов двигателя – входной порт *Speed*. Блок *Engine map* построен в соответствии с картой двигателя ЯМЗ – 5362 [14, 15]. Блок *Transfer Fcn* фильтрует (сглаживает) данные, заданные таблично. Далее данные конвертируются в физический сигнал *Simscape* и попадают в *Ideal Torque Source*, который генерирует крутящий момент пропорционально входному сигналу. Блок *Sensor* измеряет момент и угловую скорость двигателя.

Далее физический сигнал с выходного порта подсистемы *Engine* (крутящий момент двигателя) подается на вход подсистемы коробки перемены передач *KPP*. С выхода модуля *KPP* крутящий момент передается на передний и задний мосты трактора.

SS-модель коробки перемены передач – подсистемы *KPP* рассмотрена в работах [12, 13]. В них представлены кинематическая схема КПП, порядок переключения передач с помощью фрикционных устройств, включенные элементы и шестерни, находящиеся в зацеплении. Редукторные свойства подсистемы смоделированы с помощью стандартных блоков *Simple Gear*. Инерционные свойства ведущих и ведомых масс представлены инерционными вращающимися массами *Inertia*. Гидроподжимные фрикционные узлы описаны блоками *Disk Friction Clutch*. Все вышеуказанные блоки цифровизованы в соответствующих окнах параметров в соответствии с конструктивным исполнением деталей и узлов КПП.

Переключение передач производится по командам блока управления трансмиссией. Задача данного блока – выбрать передачу в зависимости от условий, в которых работает трактор. Блок управления работает на основе заложенной в него карты переключений (порядка переключения передач: 1-2, 2-3, 3-4 и т. д. вверх и соответственно вниз). Момент переключения на высшую или низшую передачу зависит от текущих условий работы трактора и уровня подачи топлива в двигатель. При этом должна быть предусмотрена «раздвижка» переключения передач для предотвращения цикличности переключений.

Блок-схема работы блока управления *Transmission Controller* (в составе математической модели), основанная на карте переключений, показана на диаграмме состояний КПП (рис. 5).

В качестве входных параметров данного логического блока на режиме постоянной мощности задаются: текущие и пороговые значения крутящего момента (*Torque*, *Up_Torque*, *Down_Torque*), время задержки команды на переключение (*shift_time*) и обороты двигателя (*rpm*). Выходной порт – номер передачи (*Gear*).

Начальное состояние системы соответствует нулевой скорости движения трактора с включенным двигателем и включенной нейтральной передачей (*gear = 0*). Далее согласно алгоритму работы САУ переключение вверх

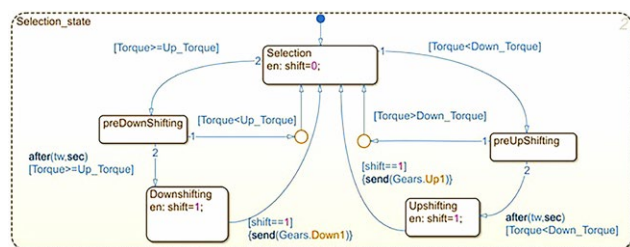


Рис. 5. Диаграмма состояний выбранного режима.
Fig. 5. State diagram of the selected mode.

происходит при понижении мощности ниже нижнего порога, вниз – при повышении мощности выше верхнего порога.

После выбора номера передачи ЭБУ передает эту информацию в блок *Actuators*, которые в соответствии со схемой включения формируют давление во фрикционных узлах (рис. 6). Управляющий сигнал проходит через сглаживающий фильтр и усиливается. На выходе получаем комбинацию включенных фрикционов с давлением в каждом 0,9 МПа.

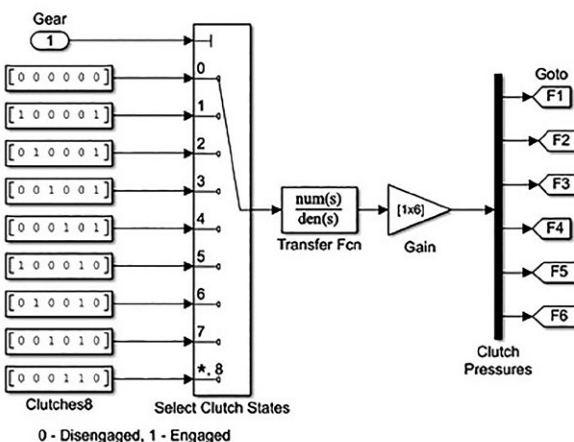


Рис. 6. Блок-схема подсистемы *Actuators*.
Fig. 6. *Actuators* subsystem block diagram.

В результате включения определенной комбинации фрикционов в КПП реализуется соответствующая передача.

Крутящий момент с выхода блока *KPP* передается на передний и задний мосты трактора – блоки *Most*, и через дифференциалы и бортовые передачи попадает на ведущие колеса – блоки *Tire* (см. рис. 3).

Нормальные и продольные реакции на колесах трактора вычисляются блоком *Body*. Структурная схема блока *Body* в разработанной математической *Simscape* модели шасси трактора представлена на рис. 7.

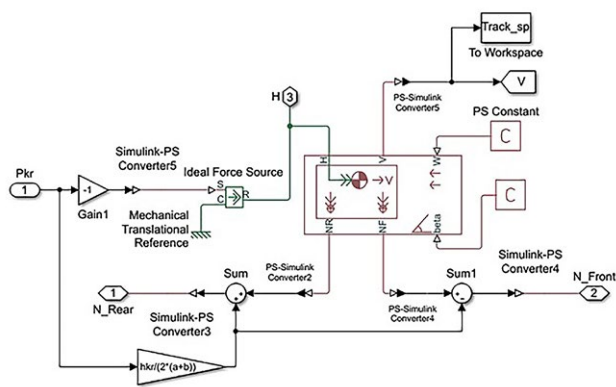


Рис. 7. Структура блока *Body*.
Fig. 7. *Body* block structure.

Внешние нагрузки на колеса в данном случае определяются на основе двумерной математической модели, описывающей в общем случае движение трактора с двумя ведущими осями и крюковой нагрузкой. Схема действующих усилий представлена на рис. 8.

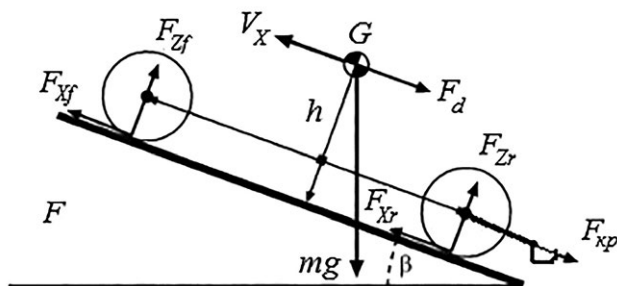


Рис. 8. Расчетная схема трактора с крюковой нагрузкой.
Fig. 8. Calculation scheme of a tractor with a hook load.

Здесь F_X – суммарная продольная сила, Н; F_{Xf} , F_{Xr} , F_{Zf} , F_{Zr} – продольная и вертикальная реакции на колесах, Н; F_d – аэродинамическая сила сопротивления, Н; β – угол наклона профиля дорожного (агро) фона, град.; V_X – продольная скорость трактора, м/с; $F_{кр}$ – усилие на крюке, Н.

С помощью разработанной математической модели проведена численная симуляция работы трактора с системой управления трансмиссией в режиме постоянной мощности.

Результаты симуляции при переменном усилии на крюке представлены на рис. 9. Здесь в функции

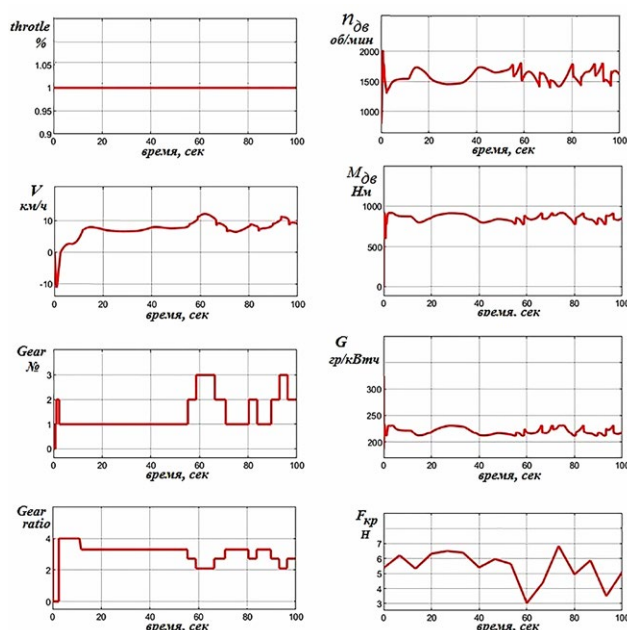


Рис. 9. Параметры рабочих процессов трактора с САУ на режиме максимальной мощности.
Fig. 9. Parameters of working processes of a tractor with an automatic control system at maximum power.

времени показаны следующие зависимости: подача топлива (*Throttle*), скорость трактора (V), номер включенной передачи (*Gear no*), обороты двигателя ($n_{Дв}$), передаточное число в КПП (*Gear ratio*), крутящий момент двигателя ($M_{Дв}$), расход топлива (G гр/кВт ч), крюковая нагрузка ($F_{кр}$).

На рис. 10 в зависимости от времени показано изменение мощности трактора, реализуемой системой управления.

При анализе полученных результатов показано, что система управления трансмиссией на режиме максимальной мощности работает устойчиво, при колебательной нагрузке на крюке мощность удерживается в заданном диапазоне регулирования без цикличности при переключениях передач, работа двигателя поддерживается в зоне, близкой к номинальной мощности.

Использование в качестве единственного контролирующего параметра мощности двигателя позволяет существенно упростить конструкцию системы управления и алгоритма ее работы.

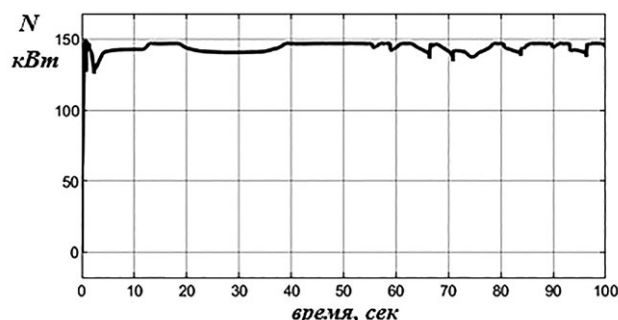


Рис. 10. Реализация режима постоянной мощности.
Fig. 10. Implementation of constant power mode.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена методика численного моделирования работы автоматической трансмиссии сельскохозяйственного трактора и системы управления на базе программного обеспечения пакета *MATLab Simulink*, *Simscape*.
2. С помощью типовых блоков библиотеки *MATLab – Simulink*, *Simscape* создана математическая модель автоматической коробки перемены передач с системой управления для использования в составе колесного трактора.
3. Симуляция режимов максимальной мощности показала, что при колебательной нагрузке на крюке работа автоматической трансмиссии с системой управления позволяет удерживать мощность силовой установки машины в заданном диапазоне регулирования, без цикличности переключения передач.
4. Результаты проведенного исследования доказали эффективность применения цифровой модели трактора. Цифровая математическая модель трактора

как единой системы позволяет производить настройку, оптимизацию рабочих алгоритмов системы управления двигателем и трансмиссией сельскохозяйственного трактора.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. С.И. Худорожков – написание текста рукописи, редактирование текста рукописи, разработка математической модели, утверждение финальной версии; А.А. Красильников – поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; М.С. Губачев – выполнение расчетов, создание изображений. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chancellor W.J., Thai N.C. Automatic control of tractor transmission ratio and engine speed // *Transaction of the ASAE*. 1984. Vol. 27, N 3. P. 642–646.
2. Ксеневи́ч И.П., Тарасик В.П. Системы автоматического управления ступенчатыми трансмиссиями тракторов. Москва: Машиностроение, 1979.
3. Губачев М.С. Оптимизация автоматического управления двигателем и трансмиссией сельскохозяйственного колесного трактора.: выпускная квалификационная работа магистра. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2020.
4. Newman K., Kargul J., Barba D. Development and Testing of an Automatic Transmission Shift Schedule Algorithm for Vehicle Simulation // *SAE International Journal of Engines*. 2015. Vol. 8, N 3. P. 1417–1427. doi: 10.4271/2015-01-1142
5. Lei Y., Liu K., Zhang Y., et al. Adaptive Gearshift Strategy Based on Generalized Load Recognition for Automatic Transmission Vehicles // *Mathematical Problems in Engineering*. 2015. Vol. 2015, P. 1–12. doi: 10.1155/2015/614989
6. Ngo D.V. Gear shift strategies for automotive transmissions. Gear shift strategies for automotive transmissions [Phd Thesis]. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2012. Available from: <https://research.tue.nl/en/publications/gear-shift-strategies-for-automotive-transmissions> Accessed: Jun 13, 2022.
7. Liangjie G., Tiezhub Z., Yongzhic M. Shift Schedule of Automatic Transmission of Construction Vehicle Based on Matlab/Simulink. *Proceedings of AMEII 2016*; 2016 April 9–10; Hangzhou,

REFERENCES

1. Chancellor WJ, Thai NC. Automatic control of tractor transmission ratio and engine speed. *Transaction of the ASAE*. 1984;27(3):642–646.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. S.I. Hoodorozhkov – writing the text of the manuscript, editing the text of the manuscript, developing a mathematical model, approval the final version; A.A. Krasilnikov – search for publications on the topic of the article, writing the text of the manuscript; M.S. Gubachev – performing calculations, creating images. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Zhejiang, China. Available at: <https://www.atlantis-press.com/article/25854676.pdf> Accessed: Jun 13, 2022.

8. Петров В.А. Автоматические системы транспортных машин. Москва: Машиностроение, 1974.
9. Ксеневи́ч И.П., Тарасик В.П. Теория и проектирование автоматических систем: учебник для студентов высш. учебн. заведений. Москва: Машиностроение, 1996.
10. The MathWorks, Inc. Simscape User's Guide [Internet]. Available from: <https://manualzz.com/doc/4120719/simscape-user-s-guide> Accessed: Jun 13, 2022.
11. The MathWorks, Inc. Using SIMULINK [Internet]. Available from: <https://manualzz.com/doc/863459/using-simulink> Accessed: Jun 13, 2022.
12. Hoodorozhkov S., Demidov N., Krasilnikov A. Dynamics of Working Processes in Automatic Transmission of Tractors // *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*. 2020. Vol. 14, N 2. doi: 10.15866/ireme.v14i2.18264
13. Демидов Н.Н., Красильников А.А., Худорожков С.И. Исследование процесса переключения в коробке перемены передач трактора // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2020. Т. 17, № 1. С. 58–71. doi: 10.26518/2071-7296-2020-17-1-58-71
14. Двигатели ЯМЗ-536, ЯМЗ-5361, ЯМЗ-5362, ЯМЗ-5363, ЯМЗ-5364: Руководство по эксплуатации 536.3902150 РЭ. [Электронный документ] Режим доступа: <http://izh-maz.ru/data/documents/536.3902150-RE.pdf> Дата обращения: 13.06.2022.

2. Ksenevich IP, Tarasik VP. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya stupenchatymi transmissiyami traktorov*. Moscow: Mashinostroenie, 1979. (In Russ).

3. Gubachev MS. *Optimizatsiya avtomaticheskogo upravleniya dvigatelem i transmissiei sel'skokhozyai-stvennogo kolesnogo traktora* [vypusknaya kvalifikatsionnaya rabota magistra]. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskii politekhnicheskii universitet Petra Velikogo, 2020.
4. Newman K, Kargul J, Barba D. Development and Testing of an Automatic Transmission Shift Schedule Algorithm for Vehicle Simulation. *SAE International Journal of Engines*. 2015;8(3): 1417–1427. doi: 10.4271/2015-01-1142
5. Lei Y, Liu K, Zhang Y, et al. Adaptive Gearshift Strategy Based on Generalized Load Recognition for Automatic Transmission Vehicles. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015;2015:1–12. doi: 10.1155/2015/614989
6. Ngo DV. *Gear shift strategies for automotive transmissions. Gear shift strategies for automotive transmissions* [Phd Thesis]. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2012. Available from: <https://research.tue.nl/en/publications/gear-shift-strategies-for-automotive-transmissions> Accessed: Jun 13, 2022.
7. Liangjiea G, Tiezhub Z, Yongzhic M. Shift Schedule of Automatic Transmission of Construction Vehicle Based on Matlab/Simulink. *Proceedings of AMEII 2016*; 2016 Apr 9–10; Hangzhou, Zhejiang, China. Available at: <https://www.atlantis-press.com/article/25854676.pdf> Accessed: Jun 13, 2022.
8. Petrov VA. *Avtomaticheskije sistemy transportnykh mashin*. Moscow: Mashinostroenie, 1974. (In Russ).
9. Ksenevich IP, Tarasik VP. *Teoriya i proektirovanie avtomaticheskikh sistem: uchebnik dlya studentov vyssh. uchebn. zavedenii*. Moscow: Mashinostroenie, 1996. (In Russ).
10. The MathWorks, Inc. Simscape User's Guide [Internet]. Available from: <https://manualzz.com/doc/4120719/simscape-user-s-guide> Accessed: Jun 13, 2022.
11. The MathWorks, Inc. Using SIMULINK [Internet]. Available from: <https://manualzz.com/doc/863459/using-simulink> Accessed: Jun 13, 2022.
12. Hoodorozhkov S, Demidov N, Krasilnikov A. Dynamics of Working Processes in Automatic Transmission of Tractors. *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*. 2020;14(2). doi: 10.15866/ireme.v14i2.18264
13. Demidov NN, Krasilnikov AA, Hoodorozhkov SI. Tractor Gearbox: Research of Shifting Gears' Processes. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020;17(1):58–71. doi: 10.26518/2071-7296-2020-17-1-58-71
14. Dvigateli YaMZ-536, YaMZ-5361, YaMZ-5362, YaMZ-5363, YaMZ-5364: Rukovodstvo po ekspluatatsii 536.3902150 RE [Internet]. Available at: <https://izh-maz.ru/data/documents/536.3902150-RE.pdf> Accessed: Jun 13, 2022.

ОБ АВТОРАХ

*Красильников Андрей Александрович,

канд. техн. наук, доцент
Высшая школа транспорта;
адрес: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8680-3175>;
eLibrary SPIN: 4268-7732;
e-mail: a_kr36@mail.ru

Худорожков Сергей Иванович,

д-р техн. наук, профессор
Высшая школа транспорта;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5646-2998>;
eLibrary SPIN: 4405-9649;
e-mail: xcu-55@mail.ru

Губачев Матвей Сергеевич,

инженер
Высшая школа транспорта;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7206-1385>;
eLibrary SPIN: 5915-4536;
e-mail: matvey1596@mail.ru

*Автор для переписки

AUTHORS' INFO

*Andrey A. Krasilnikov,

Cand. Sci. (Engin.), Associate Professor
Higher school of transport;
address: 29 Polytechnicheskaya, St.Petersburg 195251, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8680-3175>;
eLibrary SPIN: 4268-7732;
e-mail: a_kr36@mail.ru

Sergey I. Hoodorozhkov,

Dr. Sci. (Engin.), Professor
Higher school of transport;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5646-2998>;
eLibrary SPIN: 4405-9649;
e-mail: xcu-55@mail.ru

Matvey S. Gubachov,

Engineer
Higher school of transport;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7206-1385>;
eLibrary SPIN: 5915-4536;
e-mail: matvey1596@mail.ru

*Corresponding author