

Математическое моделирование динамических процессов сельскохозяйственного мобильного энергетического средства на электроприводе

© 2024. З. А. Годжаев , С. Е. Сенькевич, И. С. Алексеев, Е. Н. Ильченко
ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва,
Российская Федерация

В статье рассмотрены вопросы моделирования процессов работы сельскохозяйственного мобильного энергетического средства (МЭС) с электроприводом (ЭП). Исследования выполнены в период 2022-2023 гг. Проведен обзор современной литературы по рассматриваемой проблеме, включая вопросы по моделированию функциональных свойств мобильных машин и улучшению показателей качества работы МЭС. Представлены математическая модель движения МЭС с электродвигателем, а также описание применяемого метода и последовательность действий для проведения исследований. Выполнены предварительные теоретические исследования движения при разных режимах работы. Предлагаемая модель удобна для реализации и расчёта в любом из прикладных программных продуктов, поддерживающих моделирование динамических систем с электромеханическим приводом. Предложенная модель, решение которой выполнено на основе методов численного интегрирования систем в программной среде Matlab Simulink, позволила смоделировать динамические процессы в электромеханической силовой передаче МЭС при выполнении различных сельскохозяйственных операций. С помощью представленной модели был проведен анализ электромеханических процессов в переходных и установившихся режимах работы, а также динамических процессов в силовой передаче. Получены графики изменения исследуемых параметров силовой передачи МЭС и определены упругие моменты в соединениях пятимассовой расчетной схемы. Применение модели позволяет отследить изменение характеристик, при отклонении условий опыта. Модель показала свою работоспособность при выполнении имитации сельскохозяйственных операций (внесение удобрений, культивация, посев) и ее можно использовать на стадии проектирования для исследования характеристик динамических процессов силовых передач МЭС малого класса тяги с электромеханическим приводом. При разных параметрах модели наблюдали изменения математического ожидания угловой скорости ЭД с 147,89 до 156,87 рад/с и скорости движения МЭС от 4,51 до 4,79 м/с.

Ключевые слова: мобильное энергосредство, сельскохозяйственные операции, имитационная модель, процесс движения, моменты инерции, жесткость

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (тема № FGUN-2022-0009).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Годжаев З. А., Сенькевич С. Е., Алексеев И. С., Ильченко Е. Н. Математическое и имитационное моделирование динамических процессов сельскохозяйственного мобильного энергетического средства на электроприводе. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(1):112–122. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.112-122>

Поступила: 24.04.2023

Принята к публикации: 16.01.2024

Опубликована онлайн: 28.02.2024

Mathematical modeling of dynamic processes of agricultural mobile energy vehicles on an electric drive

© 2024. Zakhid A. Godzhaev , Sergey E. Senkevich, Ilya S. Alekseev, Ekaterina N. Ilchenko

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

The article considers the issues of modeling the processes of agricultural mobile energy vehicles (MEV) with electric drive (ED). A review of modern literature on the problem under study as well as questions on modeling the functional properties of mobile machines and improving the quality indicators of MEV work are presented. A mathematical model of the motion of the MEV with an electric motor is presented, as well as a description of the method used and a sequence of actions for conducting research. Preliminary theoretical studies of motion in different modes of operation have been carried out. The proposed model is convenient for implementation and calculation in any of the applied software products that support the modeling of dynamic systems with an electromechanical drive. The proposed model, the solution of which is based on the methods of numerical integration of systems in the Matlab Simulink software environment, made it possible to simulate the dynamic processes of electromechanical power transmission of MEV during various agricultural operations. With the help of this model, the analysis of electromechanical processes in transient and steady-state operating modes, as well as dynamic processes in the power transmission were carried out. Graphs of changes in the studied parameters of the MEV power transmission are obtained and elastic moments in the joints of the 5-mass design scheme are determined. The use of the model allows you to track the change in statistical characteristics when the conditions of the experiment change. The model has shown its operability when performing simulation of agricultural operations: fertilization, cultivation and sowing, and it can be used at the design stage to study the characteristics of dynamic processes of small-class traction MEV power transmissions with an electromechanical drive. With

different parameters of the model, there is a change in the mathematical expectation of the angular velocity of the ED from 147.89 to 156.87 rad/s, a change in the mathematical expectation of the speed of the MES from 4.51 to 4.79 m/s.

Keywords: mobile energy vehicles, agricultural operations, simulation modeling, process of motion, moments of inertial motion, stiffness

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (theme No. FGUN-2022-0009).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declared no conflict of interest.

For citation: Godzhaev Z. A., Senkevich S. E., Alekseev I. S., Ilchenko E. N. Mathematical modeling of dynamic processes of agricultural mobile energy vehicles on an electric drive. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(1):112–122. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.112-122>

Received: 24.04.2023

Accepted for publication: 16.01.2024

Published online: 28.02.2024

В современных условиях для модернизации мобильного энергетического средства (МЭС) сельскохозяйственного назначения необходима оптимизация конструктивных параметров под современные требования к функциональным и эксплуатационным характеристикам. В связи с этим также нужен переход к новым энергетическим установкам. Одним из перспективных направлений в этом плане является применение электропривода (ЭП). Так как МЭС малого класса тяги повсеместно распространены в нашей стране, нахождение оптимального решения для создания ЭП на базе конструкции таких машин является выполнимой, и весьма актуальной задачей [1]. Для выполнения этой задачи необходимо изучить свойства электрических машин в реальных условиях работы в сельскохозяйственных операциях. В исследуемой силовой передаче в качестве тягового двигателя применяется асинхронный двигатель (АД). Электромеханические и динамические характеристики АД удобно исследовать с помощью математического и имитационного моделирования, которое с применением современной аппаратно-программной базы позволяет достоверно осуществить решение поставленной задачи [2].

Также необходимо изучить ряд современных подходов, относительно разработки имитационных моделей динамических процессов МЭС в различных условиях эксплуатации. Для этого был проведен анализ публикаций, включающий в себя, в том числе, зарубежные источники. Рассмотрены проблемы и возможные пути их решения в области управляемости и устойчивости МЭС на ЭП с применением математического и имитационного моделирования.

В работе [3] предложена математическая модель, представляющая поведение при обычном боковом опрокидывании электрического трактора с возможностью изменения геометрии, инерции трактора и граничных условий

окружающей среды. В исследовании [4] были созданы прямолинейные динамические модели и динамические модели рулевого управления для описания динамического поведения процесса опрокидывания трактора. Был получен энергетический индикатор устойчивости трактора, который использовался для определения угла поворота рулевого колеса для поддержания устойчивости. Исследования в работе [5] посвящены динамическим характеристикам и усталостной надежности трактора большой мощности. Авторы представили полный экспериментальный процесс, который включает выбор цифрового модуля сбора данных, расположение датчиков, обработку данных и так далее. В статье [6] разрабатывается эффективная интегрированная стратегия управления отслеживанием траектории тягача с прицепом, который страдает от недоступных состояний системы и неопределенных помех для практической реализации.

С применением математического и имитационного моделирования изучаются проблемы функционирования и эксплуатационные свойства МЭС с ЭП. В статье [7] разработана динамическая модель трактора для исследования влияния скорости движения вперед, учитывающая уклон рельефа и коэффициент трения колеса с грунтом. Также рассматривается боковая устойчивость трактора при наличии нарушения равновесия. В работе [8] представлен прототип трактора мощностью 9 кВт, состоящий из двух трехфазных асинхронных двигателей, двух независимых инверторов и свинцово-кислотного аккумуляторного блока. Исследование [9] посвящено разработке имитационной модели электрического полноприводного трактора класса 120 кВт в процессе вождения. Результаты показали, что емкость батареи несколько мала для работы с плугом, и производительность такого трактора может быть улучшена

за счет оптимизации аккумуляторных батарей. В работе [10] представлена система управления приводом электродвигателя трактора, подходящая для характеристики работы трактора на основе бесщеточного двигателя постоянного тока. В работе [11] авторы поставили цель – представить новую деформируемую модель местности/грунта, способную работать в реальном времени, которая может взаимодействовать с механикой модели много массовой системы и динамикой модели гидравлики. Представленная авторами имитационная модель трактора в реальном времени может быть использована при разработке продукта и в других производственных процессах.

Важным вопросом является регулирование выходных характеристик электродвигателя при работе в различных режимах. Возможное решение представлено в исследовании «Управление питанием с помощью нечеткой логики для электрифицированных мобильных машин» [12]. Рассматривается проблема интеллектуального управления мощностью двигателя для устойчивой работы с использованием обратной связи ЭП. Основное внимание уделяется обеспечению стабильной работы, агрегатируемого с МЭС сельхозмашин. Это достигается за счет динамической регулировки запаса хода энергоустановки в соответствии с требованиями к мощности и скоростью их изменения. Для количественной оценки требований к мощности предлагается супервизорный подход, основанный на теории нечеткой логики. Использование данного решения действительно способно повысить стабильность и надежность автоматической системы регулирования.

Метод имитационного моделирования позволяет решать задачи исследования сложных динамических систем. Моделируется система, которая может одновременно содержать элементы непрерывного и дискретного действия, быть подверженной влиянию многочисленных детерминированных и случайных факторов. Для анализа системы приходится многократно моделировать процесс ее функционирования, варьируя исходными данными модели. Моделирование процессов представляет собой весьма актуальный вопрос. Решение поставленного вопроса с помощью программного пакета

Matlab Simulink [13], который приобрел широкое применение во всех отраслях науки, достаточно просто и удобно.

Цель исследований – разработка математической модели для определения характеристик динамических процессов силовых передач МЭС тягового класса 0,6 на ЭП.

Научная новизна – модель динамических процессов, описывающая крутильно-колебательную систему макетного образца МЭС с ЭП, включающая физические характеристики электрических и механических компонентов силовой передачи МЭС.

Материал и методы. Эффективным способом получения характеристик динамических процессов в ЭП – математическое и компьютерное моделирование^{1,2}. В связи с этим необходимо постоянное совершенствование аппаратно-программного обеспечения вычислительных средств для реализации расчетов по имитационному моделированию. Для выполнения расчетов необходимы достоверные исходные данные – масса и габаритные характеристики МЭС, упругодемпфирующие свойства валопровода силовой передачи и внешние возмущения. В настоящей статье использовали программный пакет Matlab Simulink как средство реализации имитационного моделирования электро-механических систем.

Результаты и их обсуждение. Эффективным способом получения картины динамических процессов в ЭП, исследования режимов работы МЭС является математическое и компьютерное моделирование [14].

Для составления математической модели был разработан упрощенный эскиз МЭС, который представлен на рисунке 1.

Эквивалентная схема динамической модели МЭС приведена на рисунке 2.

Модель МЭС характеризует следующие параметры: J_1 – приведенный момент инерции АД, Н·м·с²; J_2 – момент инерции всех вращающихся деталей КПП и дифференциала, Н·м·с²; J_3 – момент инерции бортового редуктора и дисков ведущих колес трактора, Н·м·с²; J_4 – момент инерции шин ведущих колес, Н·м·с²; φ_1 – угол вращения вала ротора АД, рад; φ_2 – угол вращения деталей КПП и дифференциала, рад;

¹Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для студентов электротехн. и энергет. специальностей вузов. М.: Высшая школа, 2001. 327 с.

²Тарасик В. П. Математическое моделирование технических систем: учебник для вузов. Минск: ДизайнПРО, 2004. 640 с. Режим доступа: <https://djuv.online/file/v8X4ui3aayQmz>

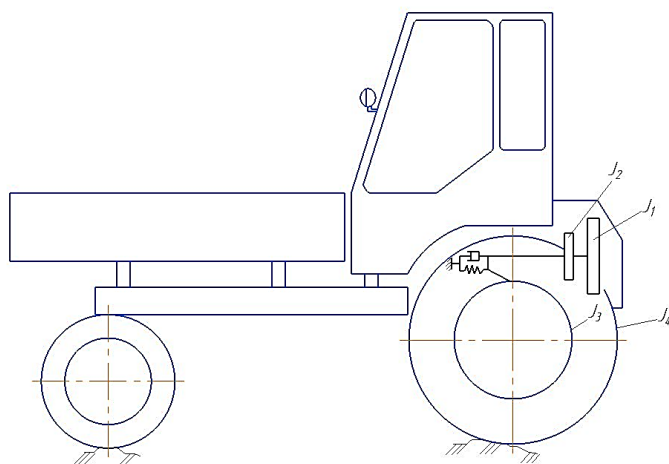


Рис. 1. Упрощенный эскиз МЭС /
Fig. 1. Simplified sketch of the MEV

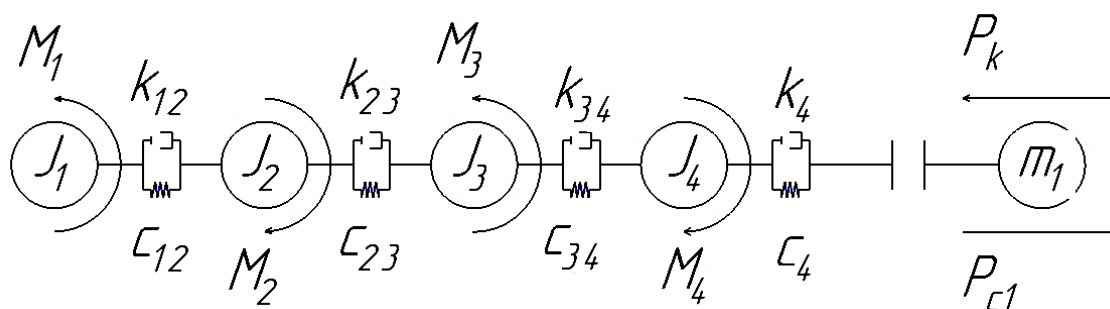


Рис. 2. Эквивалентная схема динамической модели МЭС /
Fig. 2. The equivalent scheme of the dynamic model of MEV

φ_3 – угол вращения дисков ведущих колес трактора, рад; φ_4 – угол вращения шины ведущего колеса, рад; ω_1 – угловая скорость вала электродвигателя, рад/с; ω_2 – угловая скорость деталей КПП и дифференциала, рад/с; ω_3 – угловая скорость дисков ведущих колес трактора, рад/с; ω_4 – угловая скорость шин ведущих колес трактора, рад/с; m_1 – поступательно-движущаяся масса трактора, кг; v_1 – линейная скорость трактора, м/с; c_{12} и k_{12} – жесткость и коэффициент демпфирования валопровода КПП соответственно [Н·м/рад] и [Н·м с/рад]; c_{23} и k_{23} – жесткость и коэффициент демпфирования соответственно главной передачи и дифференциала, [Н·м/рад] и [Н·м с/рад]; c_{34} и k_{34} – крутильная жесткость и коэффициент демпфирования бортового редуктора [Н·м/рад] и [Н·м с/рад]; c_4 и k_4 – крутильная жесткость и коэффициент демпфирования шин ведущих колес трактора, [Н·м/рад] и [Н·м с/рад]; R_{m1} – вертикальная сила реакции ведущих колес МЭС, Н; $P_{op.m}$ – амплитуда силы сопротивления на крюке трактора, Н; P_k – касательная сила колеса трактора, Н; P_{c1} – сила сопротивления от сельскохозяйственного орудия, Н; a_{m1} – смещение вертикальных

реакций R_{m1} относительно оси ведущих колес трактора, м; $\lambda_{s.m1}$ – продольная деформация шин ведущих колес, м; r_1 – динамический радиус качения ведущего колеса, м; M_1 – момент на валу АД, Н·м; M_2 – момент, приложенный к валопроводу силовой передачи, Н·м; M_3 – крутящий момент дисков ведущих колес трактора, Н·м; M_4 – крутящий момент шин ведущих колес трактора, Н·м; M_k – моменты касательных сил взаимодействия ведущих колес трактора с почвой, Н·м; $M_{эм}$ – электромагнитный момент, создаваемый АД, Н·м; M_c – момент сопротивления на валу ротора АД, Н·м.

Приняты следующие обозначения: u – напряжение, В; I – сила тока, А; t – время, сек; ω_r – механическая частота вращения ротора, рад/с; p – число пар полюсов; a, β, γ – обозначают принадлежность к соответствующей фазе. Нижний индекс s означает принадлежность к статору, индекс r к ротору.

Уравнение движения для вала АД:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}(M_{эм} - M_c), \quad (1)$$

где J – момент инерции масс, вращающихся на валу ротора.

В общем случае можно записать так:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M_{эм} - M_c(t, \omega_r, \theta_r)) = \frac{M_{дин}}{J} \quad (2)$$

где $M_{дин}$ – динамический момент на валу АД.

Уравнение электромагнитного момента АД имеет вид [15]:

$$M_{эм} = M_1 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L [(I_{sa} I_{ry} + I_{s\beta} I_{ra} + I_{sy} I_{r\beta}) - (I_{sa} I_{r\beta} + I_{s\beta} I_{ry} + I_{sy} I_{ra})], \quad (3)$$

где L – взаимная индуктивность фазы обмоток ротора и статора АД при совпадении их осей или индуктивность обмотки статора от основного магнитного потока.

Взаимная индуктивность обмоток АД определяется:

$$L = (2/3) L_\mu, \quad (4)$$

где L_μ – полная индуктивность фазы обмотки статора от основного магнитного потока, учитывающая наличие токов в других фазах.

Движение вращающихся деталей общей части трансмиссии и ведущего моста описывается уравнением моментов:

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_2 - M_3, \quad (5)$$

$$M_2 = c_{12}(\varphi_1 - i_2 \cdot \varphi_2) + k_{12} \left(\frac{d\varphi_1}{dt} - i_2 \cdot \frac{d\varphi_2}{dt} \right), \quad (6)$$

$$M_3 = c_{23}(\varphi_2 - i_3 \cdot \varphi_3) + k_{23} \left(\frac{d\varphi_2}{dt} - i_3 \cdot \frac{d\varphi_3}{dt} \right). \quad (7)$$

Движение ведущих колес трактора описывается системой уравнений:

$$J_3 \frac{d\omega_3}{dt} = M_3 - M_4. \quad (8)$$

$$M_4 = c_{34}(\varphi_3 - \varphi_4) + k_{34} \left(\frac{d\varphi_3}{dt} - \frac{d\varphi_4}{dt} \right), \quad (9)$$

$$J_4 \frac{d\omega_4}{dt} = M_4 - M_k. \quad (10)$$

Моменты касательных сил взаимодействия ведущих колес трактора с почвой можно выразить через моменты, обусловленные упругостью и демпфированием в шинах:

$$M_k = \left(c_4 \lambda_{s.m1} + k_4 \frac{d\lambda_{s.m1}}{dt} \right) \cdot r_1 + a_{m1} R_{m1}. \quad (11)$$

Уравнение движения центра МЭС можно описать зависимостью:

$$m_1 \frac{dv_1}{dt} = P_k - P_{c1}. \quad (12)$$

При движении трактора без прицепного сельскохозяйственного орудия $P_{c1} = 0$.

Для движения трактора вместе с прицепным сельскохозяйственным орудием сила P_{c1} зависит от изменения силы тягового сопротивления и изменения микропрофиля дороги:

$$P_{c1} = P_{op.m} \cdot \cos(2\pi f_c t), \quad (13)$$

где f_c – частота колебаний тяговой нагрузки на крюке трактора.

Продольная деформация шин ведущих колес зависит от величины толкающей силы, которая в свою очередь зависит от крутящего момента (рис. 3) [16].

Следовательно, после преобразования, учитывая буксование колес, получим выражение:

$$\frac{d\lambda_{s.m1}}{dt} = \omega_4 r_1 \left(1 - \frac{\lambda_{s.m1}}{r_1} \right) - \frac{v_1}{(1 - \delta)}. \quad (14)$$

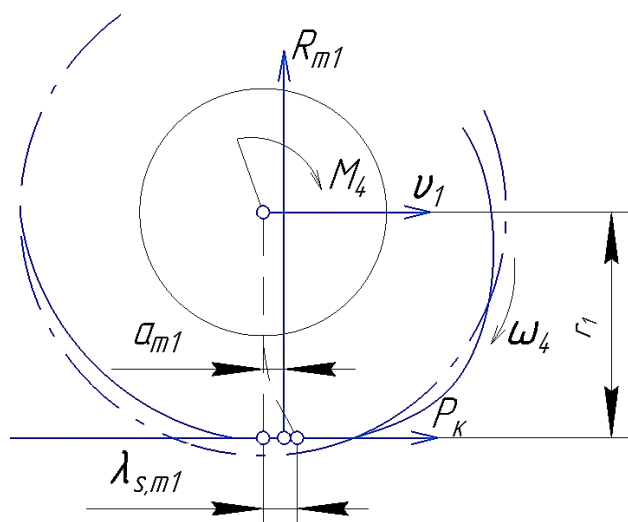


Рис. 3. Схема качения колеса в продольном направлении /
Fig. 3. The scheme of rolling the wheel in the longitudinal direction

Согласно динамической модели (рис. 2), система дифференциальных уравнений движения серийного МЭС имеет вид:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \left(p \frac{\sqrt{3}}{2} L [(I_{sa}I_{r\gamma} + I_{s\beta}I_{ra} + I_{sy}I_{r\beta}) - (I_{sa}I_{r\beta} + I_{s\beta}I_{r\gamma} + I_{sy}I_{ra})] - \right. \\ \left. - c_{12}(\varphi_1 - i_2 \cdot \varphi_2) - k_{12} \left(\frac{d\varphi_1}{dt} - i_2 \cdot \frac{d\varphi_2}{dt} \right) \right), \quad (15)$$

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = c_{12}(\varphi_1 - i_2 \cdot \varphi_2) + k_{12} \left(\frac{d\varphi_1}{dt} - i_2 \cdot \frac{d\varphi_2}{dt} \right) - \\ - \left(c_{23}(\varphi_2 - i_3 \cdot \varphi_3) + k_{23} \left(\frac{d\varphi_2}{dt} - i_3 \cdot \frac{d\varphi_3}{dt} \right) \right), \quad (16)$$

$$J_3 \frac{d\omega_3}{dt} = c_{23}(\varphi_2 - i_3 \cdot \varphi_3) + k_{23} \left(\frac{d\varphi_2}{dt} - i_3 \cdot \frac{d\varphi_3}{dt} \right) - \\ - \left(c_{34}(\varphi_3 - \varphi_4) + k_{34} \left(\frac{d\varphi_3}{dt} - \frac{d\varphi_4}{dt} \right) \right), \quad (17)$$

$$J_4 \frac{d\omega_4}{dt} = c_{34}(\varphi_3 - \varphi_4) + k_{34} \left(\frac{d\varphi_3}{dt} - \frac{d\varphi_4}{dt} \right) - \left(\left(c_4 \lambda_{s.m1} + k_4 \frac{d\lambda_{s.m1}}{dt} \right) \cdot r_1 + a_{m1} R_{m1} \right), \quad (18)$$

$$m_1 \frac{dv_1}{dt} = \frac{\left(c_4 \lambda_{s.m1} + k_4 \frac{d\lambda_{s.m1}}{dt} \right) \cdot r_1 + a_{m1} R_{m1}}{r_1} - P_{c1}, \quad (19)$$

$$\frac{d\lambda_{s.m1}}{dt} = \omega_4 r_1 \left(1 - \frac{\lambda_{s.m1}}{r_1} \right) - \frac{v_1}{(1 - \delta)}. \quad (20)$$

Динамические процессы силовой передачи МЭС описываются вышеприведёнными уравнениями. Решение математической модели методами численного интегрирования и линеаризации системы дифференциальных уравнений подробно описано в работе [15]. В динамической колебательной системе «АД-Механическая часть силовой передачи-Колесо-Грунт» нами приняты следующие обозначения: R_{m1} – вертикальная сила реакции на колесах МЭС, Н;

$$R_{m1} = 0,82 \cdot G_{TP}, \quad (21)$$

где G_{TP} , – вес трактора, Н; a_{m1} – смещение вертикальных реакций R_{m1} относительно оси ведущих колес трактора:

$$a_{m1} = a_{0.m1} + \lambda_{m1}, \quad (22)$$

$$a_{0.m1} = f_1 r_1, \quad (23)$$

где f_1 – коэффициент сопротивления перекачиванию.

Передаточные отношения механической части силовой передачи, согласно кинематической схеме (рис. 4), приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения передаточных отношений силовой передачи /
Table 1 – Power transmission ratio values /

Наименование узла / Name of the unit	Передаточные отношения / Gear ratios
Коробка перемены передач (1-я передача) / Gearbox (1st gear), $i_{кпп} = i_{кпп1} \times i_{кпп2}$	2,927
Главная передача и дифференциал / Main gear and Differential, $i_{диф}$	4,05
Бортовой редуктор / On-board reductor, $i_{БР}$	5,83

Передаточные отношения i_2 и i_3 (1-я передача) определяются:

$$i_2 = i_{кпп1} \times i_{кпп2} \times i_{диф} = \frac{Z_9}{Z_{10}} \times \frac{Z_{15}}{Z_{14}} \times \frac{Z_{26}}{Z_{19}} = \frac{26}{23} \times \frac{23}{36} \times \frac{77}{19} = 2,927,$$

$$i_3 = i_{БР} = \frac{Z_{23}}{Z_{22}} = \frac{70}{12} = 5,83.$$

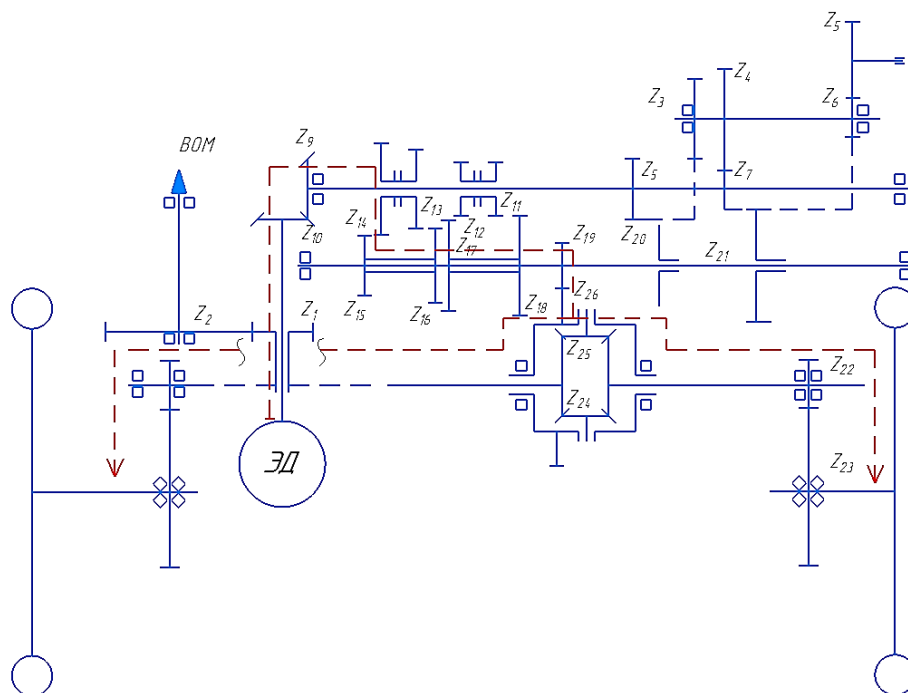


Рис. 4. Кинематическая схема силовой передачи МЭС /
Fig. 4. Kinematic scheme of power transmission of MEV

Описанная система уравнений позволяет проводить ряд теоретических экспериментов.

Для этого была создана имитационная модель в среде Matlab Simulink (рис. 5).

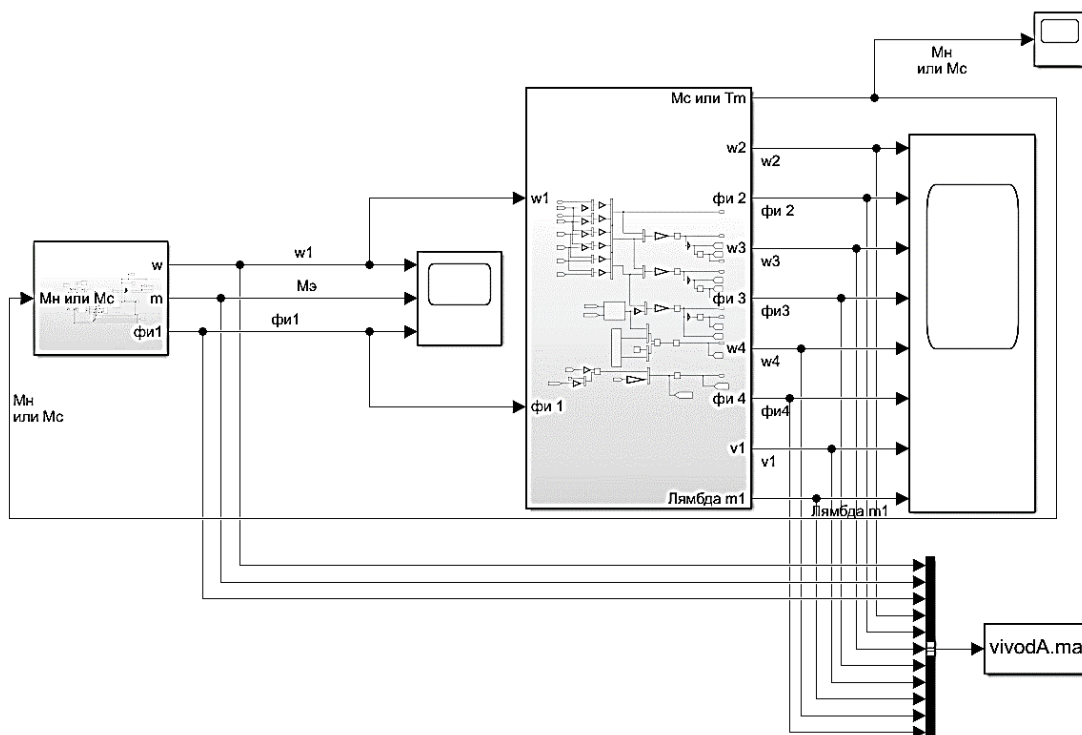


Рис. 5. Имитационная модель силовой передачи МЭС в среде Matlab Simulink /
Fig. 5. Simulation model of power transmission of MEV in Matlab Simulink environment

Исходные данные для решения системы уравнений (15)-(20) представлены в таблице 2 [17, 18].

Имитационное моделирование работы трактора проведено при различных условиях,

подсистема которых была внесена в модель и представлена на рисунке 6. Для удобства проведения расчетов в подсистему, через функцию switch-case включены все виды экспериментов, а также работа трактора без нагрузки.

Таблица 2 – Собственные значения параметров колебательной системы силовой передачи МЭС /
Table 2 – Eigenvalues of the parameters of the oscillatory power transmission system of MEV

Параметр / Parameter	Значение / Value	Единица измерения / Unit of measurement
c_{12}	512000	Н·м/рад / N·m/rad
c_{23}	112000	Н·м/рад / N·m/rad
c_{34}	1200000	Н·м/рад / N·m/rad
c_4	507000	Н/м / N/m
k_{12}	0,01	Н·м·с/рад / N·m·s/rad
k_{23}	0,05	Н·м·с/рад / N·m·s/rad
k_{34}	0,0002	Н·м·с/рад / N·m·s/rad
k_4	1,0	Н·с/м / N·s/m
J_1	1,7	кг·м ² / kg·m ²
J_2	0,14	кг·м ² / kg·m ²
J_3	16,4	кг·м ² / kg·m ²
J_4	8,87	кг·м ² / kg·m ²
i_2	2,927	-
i_3	5,83	-
$P_{op.m}$	940; 1210; 2190; 4100;	Н / N
r_1	0,579	м / m
m_1	От 1450 до 1985 / From 1450 to 1985	кг / kg
δ	0,1	-
f_1	0,035; 0,1; 0,17; 0,18	-
p	2	-

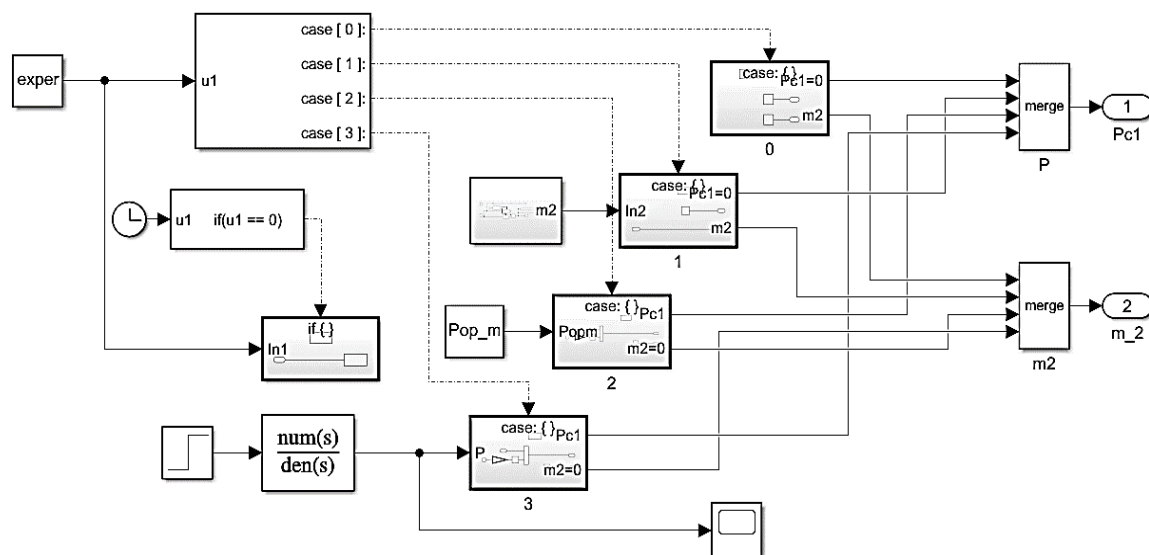


Рис. 6. Подсистема для проведения теоретических расчётов-экспериментов /

Fig. 6. Subsystem for carrying out theoretical calculations-experiments

Для выбора режима работы модели необходимо прописать в переменной *exper* цифру от 0 до 3, где:

0 – работа трактора без нагрузки в режиме холостого хода-проезда;

1 – работа трактора при имитации внесения удобрений;

2 – работа трактора при имитации работы с культиватором (воздействия тяговой нагрузки с частотой $f_c = 3$ Гц),

3 – работа трактора при имитации работы с технологической платформой (воздействия тяговой нагрузки, которая была получена в результате экспериментов).

В модели, помимо теоретических данных, использованы значения, полученные во время экспериментов. Данные тяговой нагрузки обработаны с помощью приложения System Identification в программной среде Matlab Simulink, в результате чего получена передаточная функция. Эта функция была внесена в модель с помощью блока Transfer Fcn, который моделирует линейную систему передаточной функции переменной в области Лапласа.

В результате моделирования были получены теоретические данные основных пара-

метров, которые характеризуют работу моделируемой МЭС. График угловой скорости ведущих колес представлен на рисунке 7. Анализ данных графика наглядно демонстрирует нарастание угловой скорости ведущих колёс до установившегося режима.

График линейной скорости трактора представлен на рисунке 8. Анализ данных графика показывает увеличение линейной скорости до установившейся величины за однократный промежуток времени с предыдущим параметром.

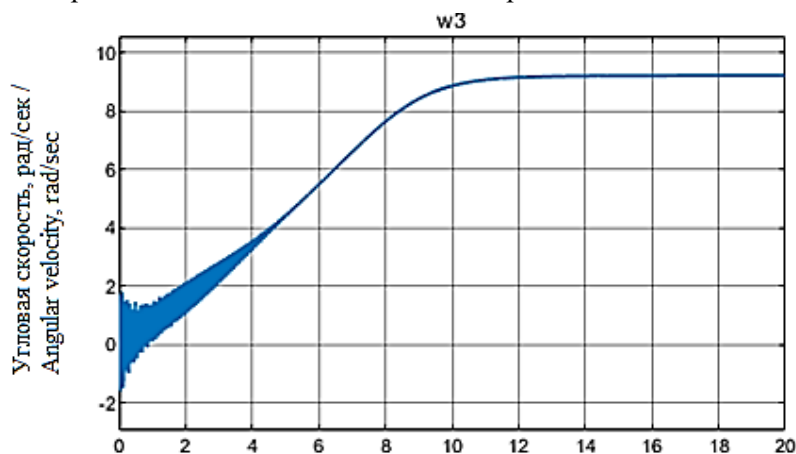


Рис. 7. Угловая скорость ведущих колес /
Fig. 7. Angular velocity of the driving wheels

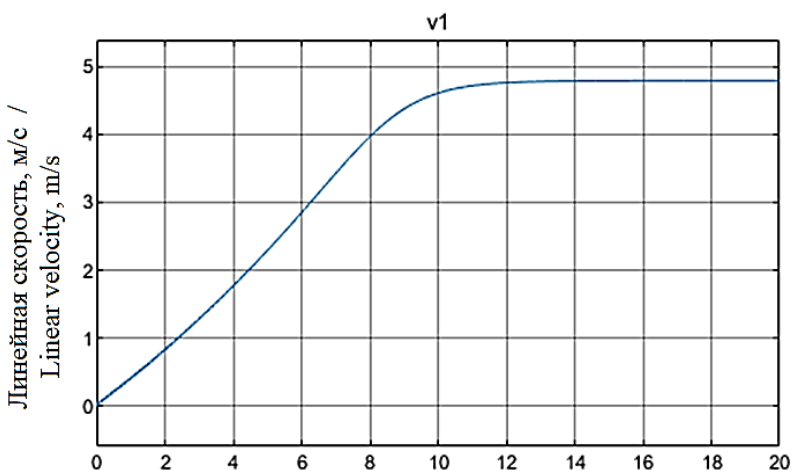


Рис. 8. Линейная скорость трактора /
Fig. 8. Linear velocity of the driving wheels

График фазных токов электродвигателя трактора, представленный на рисунке 9, демонстрирует изменение фазных токов электродвигателя. Изменение силы тока трех фаз пропорционально нарастанию угловой скорости колеса и линейной скорости трактора до установившейся величины за аналогичный промежуток времени, что свидетельствует о согласованности параметров модели.

Расчетные данные представляют собой большой объем чисел, изменяющихся во времени параметров (некоторые из которых представлены в табл. 3). При дальнейшей работе с помощью

этих данных можно рассчитать математическое ожидание, дисперсию и среднеквадратическое отклонение по каждому из параметров.

Применение методов моделирования динамических процессов позволило провести расчеты характеристик колебаний электромеханической силовой передачи МЭС, определить упругие моменты и перемещения в соединениях колебательной системы. Система дифференциальных уравнений, описывающих динамическую нагруженность силовой передачи, включает электрические и механические процессы, а также содержит нелинейные пара-

метры – упругодемпфирующие характеристики шин, характеристики электродинамических

компонентов и коэффициент сцепления колеса с почвой при наличии буксования.

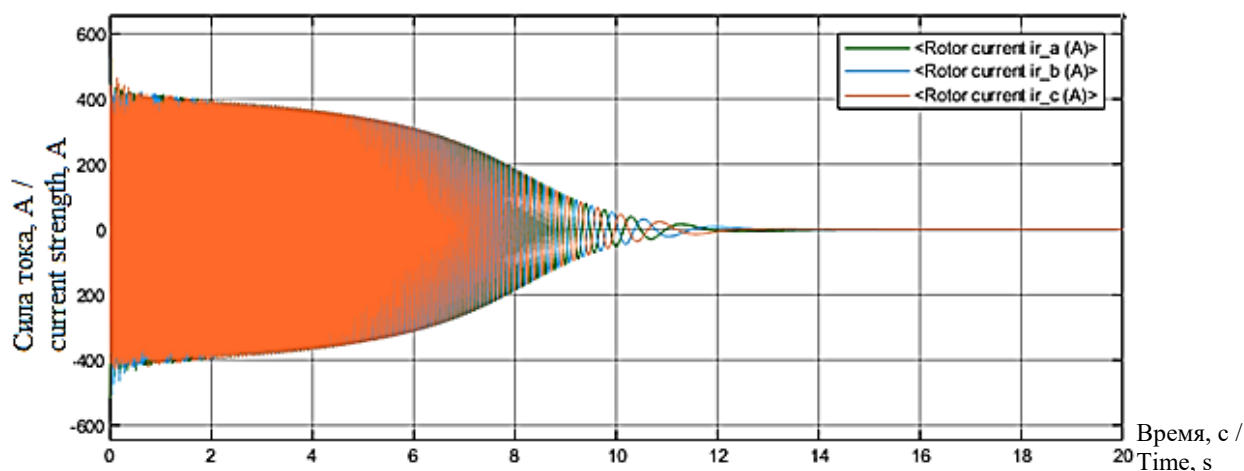


Рис. 9. Изменение силы тока трех фаз электродвигателя /

Fig. 9. Changing the current strength of the three phases of the electric motor

Таблица 3 – Результаты обработки рассчитанных значений модели /

Table 3 – Results of processing the calculated values of the model

Параметр / Parameter	№ опыта / No. of the Experiment	
	0	1
ω_1 , рад/с / rad/s	156,87	147,89
ω_2 , рад/с / rad/s	53,60	50,53
ω_3 , рад/с / rad/s	9,19	8,67
ω_4 , рад/с / rad/s	9,19	8,67
v_1 , м/с / m/s	4,79	4,51

Выводы. 1. Разработанная имитационная модель позволяет определить основные характеристики, а также провести количественный и качественный анализ электрической и механической частей силовой передачи МЭС – процессы изменения токов статора и ротора, элект-

ромагнитных сил и упругих моментов в соединениях, частоты вращения валов в переходных и установившемся режимах.

2. Модель показала свою работоспособность при выполнении имитации сельскохозяйственных операций: внесение удобрений, культивация и посев.

3. При разных параметрах модели наблюдается изменение математического ожидания угловой скорости ЭД с 147,89 до 156,87 рад/с, изменение математического ожидания угловой скорости первичного вала КПП от 50,53 до 53,60 рад/с, изменение математического ожидания скорости движения МЭС от 4,51 до 4,79 м/с.

4. Модель позволит на стадии проектирования проводить исследования характеристик динамических процессов силовых передач МЭС подобного класса с электромеханическим приводом.

References

- Годжаев З. А., Сенькевич С. Е., Кузьмин В. А. Перспективные проекты по созданию роботизированных мобильных энергетических средств сельскохозяйственного назначения. Материалы XII мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2019): мат-лы XII мультиконференции. В четырех томах. Дивноморское, Геленджик: Изд-во Южного федерального университета, 2019. Т. 2. С. 127–129. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41848052> EDN: YXYDVI
- Godzhaev Z. A., Senkevich S. E., Kuzmin V. A. Promising projects for the creation of robotic mobile power tools for agricultural purposes. Materials of the XII multi-conference on management problems (MKPU-2019): materials of the XII multiconference in four volumes. Divnomorskoe, Gelendzhik: Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo universiteta, 2019. Vol. 2. pp. 127–129. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41848052>
- Senkevich S., Duryagina V., Kravchenko V., Gamolina I., Pavkin D. Improvement of the Numerical Simulation of the Machine-Tractor Unit Functioning with an Elastic-Damping Mechanism in the Tractor Transmission of a Small Class of Traction (14 kN). International Conference on Intelligent Computing & Optimization. 2020;1072:204–213. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-33585-4_20
- Franceschetti B., Lenain R., Rondelli V. Comparison between a rollover tractor dynamic model and actual lateral tests. Biosystems Engineering. 2014;127:79–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.08.010>
- Qin J., Zhu Zh., Ji H., Zhu Zhong., Li Zh., Du Yu., Song Zh., Mao E. Simulation of active steering control for the prevention of tractor dynamic rollover on random road surfaces. Biosystems Engineering. 2019;185:135–149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.02.006>

5. Li B., Yuan H. Research on dynamic characteristics and reliability of a new heavy duty tractor. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. 2019;13(1):JAMDSM0010. DOI: <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2019jamdsm0010>
6. Hou X., Yue M., Zhao J., Zhang X. An ESO-based integrated trajectory tracking control for tractor-trailer vehicles with various constraints and physical limitations. International Journal of Systems Science. 2018;49(15):3202–3215. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207721.2018.1535100>
7. Ahmadi I. Dynamics of tractor lateral overturn on slopes under the influence of position disturbances (model development). Journal of Terramechanics. 2011;48(5):339–346. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JTERRA.2011.07.001>
8. Melo R. R., Antunes F. L. M., Daher S., Vogt H. H., Albiero D., Tofoli F. L. Novel conception of an electric propulsion system for a 9-kW electric tractor suitable to family farming. IET Electric Power Applications. 2019;13(12):1993–2004. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0353>
9. Baek S.-Y., Kim Y.-S., Kim W.-S., Baek S.-M., Kim Y.-J. Development and Verification of a Simulation Model for 120 kW Class Electric AWD (All-Wheel-Drive) Tractor during Driving Operation. Energies. 2020;13(10):2422. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13102422>
10. Chen Y., Xie B., Mao E. Electric Tractor Motor Drive Control Based on FPGA. IFAC-PapersOnLine. 2016;49(16):271–276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.050>
11. Jaiswal S., Korkealaakso P., Aman R., Sopanen J., Mikkola A. Deformable Terrain Model for the Real-Time Multibody Simulation of a Tractor With a Hydraulically Driven Front-Loader. IEEE Access. 2019;7:172694–172708. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2956164>
12. Osinenko P., Geißler M., Herlitzius T. Fuzzy-logic assisted power management for electrified mobile machinery. Neuro-computing. 2015;170:439–447. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.04.095>
13. Godzhaev Z., Senkevich S., Kuzmin V., Melikov I. Use of the Neural Network Controller of Sprung Mass to Reduce Vibrations From Road Irregularities. Research Advancements in Smart Technology, Optimization, and Renewable Energy. IGI Global, 2021. pp. 423–463. DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-3970-5.ch005>
14. Godzhaev Z., Senkevich S., Kuzmin V., Ilchenko E., Chaplygin M., Alekseev I., Prilukov A. Simulation of the dynamic processes of a low-capacity combine harvester movement. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering 2019 (TPACEE 2019). 2020;164:06009. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016406009>
15. Пустоветов М. Ю., Солтус К. П., Синявский И. В. Компьютерное моделирование асинхронных двигателей и трансформаторов. Примеры взаимодействия с силовыми электронными преобразователями: монография. Германия, Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2013. 209 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20797893> EDN: RNDDDP
- Пустоветов М. Ю., Солтус К. П., Синявский И. В. Computer modelling of induction motors and transformers. Examples of interaction with power electronic converters: monograph. Germaniya, Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2013. 209 p. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20797893>
16. Динамика системы дорога-шина-автомобиль-водитель. Под ред. А. А. Хачатурова. М.: Машиностроение, 1976. 535 с. Dynamics of the road-tire-car-driver system. Pod red. A. A. Khachaturova. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 535 p.
17. Cremer L., Heckl M. Structure-borne sound: structural vibrations and sound radiation at audio frequencies. Springer Science & Business Media, 2013. 573 p.
18. Adams V., Askenazi A. Building better products with finite element analysis. Cengage Learning, 1999. 587 p.

Сведения об авторах

✉ **Годжаев Захид Адыгезалович**, доктор техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, дом 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1665-3730>, e-mail: fic51@mail.ru

Сенькевич Сергей Евгеньевич, кандидат техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, дом 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6354-7220>

Алексеев Илья Сергеевич, инженер, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, дом 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5169-895X>

Ильченко Екатерина Николаевна, инженер, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, дом 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru

Information about the authors

✉ **Zakhid A. Godzhaev**, DSc in Engineering, corresponding member of RAS, professor, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutskiy proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1665-3730>, e-mail: fic51@mail.ru

Sergey E. Senkevich, PhD in Engineering, associate professor, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutskiy proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6354-7220>

Ilya S. Alekseev, engineer, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutskiy proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5169-895X>

Ekaterina N. Ilchenko, engineer, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutskiy proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author