



# МЕХАНИКА МОБИЛЬНЫХ МАШИН

УДК 629.3

**С.Н. ПОДДУБКО**, канд. техн. наук, доц.  
генеральный директор<sup>1</sup>  
E-mail: bats@ncpmm.bas-net.by

**А.Н. КОЛЕСНИКОВИЧ**  
начальник отдела моделирования и виртуальных испытаний Республиканского компьютерного центра  
машиностроительного профиля<sup>1</sup>  
E-mail: kalesnikovich\_an@oim.by

**Алексей Л. КРАВЧЁНОК**  
научный сотрудник отдела моделирования и виртуальных испытаний Республиканского компьютерного центра  
машиностроительного профиля<sup>1</sup>  
E-mail: kravchenoks@mail.ru

**П.Э. ШАБАНОВ**  
главный конструктор по автомобильной технике – начальник управления главного конструктора<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «МАЗ» — управляющая компания холдинга «БЕЛАВТОМАЗ», г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 21.02.2024.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОГРУЗОВИКА МАЗ-4381ЕЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА MATLAB SIMULINK

*Рассматривается динамическая модель батарейной силовой установки электрогрузовика МАЗ-4381ЕЕ с двухступенчатой коробкой передач (КП). Исследуются динамические процессы, возникающие при переключении КП. Оно осуществляется путем управления частотой вращения тягового электромотора синхронно с процессом включения зубчатой синхронизированной муфты КП. При моделировании процессов переключения передач оцениваются динамические нагрузки, время включения муфт и синхронизации частот вращения звеньев КП, работа и мощность буксования фрикционных элементов синхронизатора. По результатам моделирования показана необходимость применения обратных связей для управления тяговым электромотором и параметрами состояния синхронизированных муфт КП и предложен алгоритм управления силовым электроприводом электрогрузовика, обеспечивающим минимальные динамические нагрузки в электроприводе и низкую нагруженность синхронизаторов КП.*

**Ключевые слова:** электрогрузовик, батарейная силовая установка, тяговый электромотор, двухступенчатая коробка передач, переключение передач, синхронизатор, зубчатая муфта

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-2-67-5-14>

**Введение.** В настоящее время широкое распространение получили батарейные коммерческие электромобили, в силовом электроприводе которых применяются многоступенчатые автоматизированные КП [1], что позволяет повысить энергоэффективность и тягово-динамические

показатели электромобилей [2–4]. Примеры исследований процессов переключения передач автомобильной техники приведены в работах [5–9].

В данной статье рассматриваются разработка и исследования компьютерной модели батарейной силовой установки (БСУ) электрогрузовика MAZ-4381EE с интегрированной системой управления (ИСУ), созданной в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси, для формирования рациональных алгоритмов управления, обеспечивающих минимальные динамические нагрузки в тяговом электроприводе и низкую нагруженность синхронизаторов КП. Применение компьютерного моделирования для изучения силовых установок автомобилей представлено в работах [10, 11].

Исследование динамических процессов в БСУ MAZ-4381EE при переключении КП основано на разработке компьютерной модели силовой установки с учетом обратных связей, предусматривающих возможность управления характеристикой тягового электродвигателя (ЭМ) в зависимости от параметров состояния зубчатых муфт и синхронизаторов и моделирования дорожных циклов движения электрогрузовика.

*Цель исследования* — разработка рациональных алгоритмов управления БСУ электрогрузовика MAZ-4381EE методами компьютерного моделирования динамических процессов, происходящих в силовом электроприводе, в реальных условиях эксплуатации.

*Объект исследований* — БСУ электрогрузовика MAZ-4381EE, основные характеристики которого приведены в таблице 1.

Динамическая схема БСУ электрогрузовика MAZ-4381EE показана на рисунке 1. Шасси электрогрузовика и все его компоненты унифицированы с серийным автомобилем MAZ-4381. В таблице 2

отображены основные параметры динамической модели БСУ MAZ-4381EE. Электромеханическая характеристика тягового ЭМ приведена на рисунке 2.

БСУ электрогрузовика MAZ-4381EE оснащена ИСУ, включающей блок управления тяговым ЭМ, инвертор и блок автоматического переключения КП. Структура ИСУ приведена на рисунке 3.

*Переключения КП* осуществляются в рамках реализации комплексного алгоритма ИСУ БСУ электрогрузовика MAZ-4381EE.

В основу формирования алгоритма переключения КП положен анализ действующих на электрогрузовик внешних сил, включенной передачи и режима работы тягового ЭМ в соответствии с его электромеханической характеристикой (см. рисунок 2). Выбор моментов переключения КП основан на анализе карты энергоэффективности тягового ЭМ MAZ-4381EE с целью обеспечения его работы в зонах наибольшего КПД.

Таблица 1 — Основные характеристики электрогрузовика MAZ-4381EE

Table 1 — Main characteristics of the electric truck MAZ-4381EE

Параметр	Значение
Полная масса автомобиля, кг	12 000
Грузоподъемность, кг	4400
Максимальная скорость, км/ч	90
Максимальный преодолеваемый подъем, %	25
Максимальный пробег на одной зарядке, км	200
Номинальная мощность тягового ЭМ, кВт	130
Емкость тяговой аккумуляторной батареи, кВт·ч	300
Передаточное число главной передачи	4,4
Радиус колеса, м	0,405

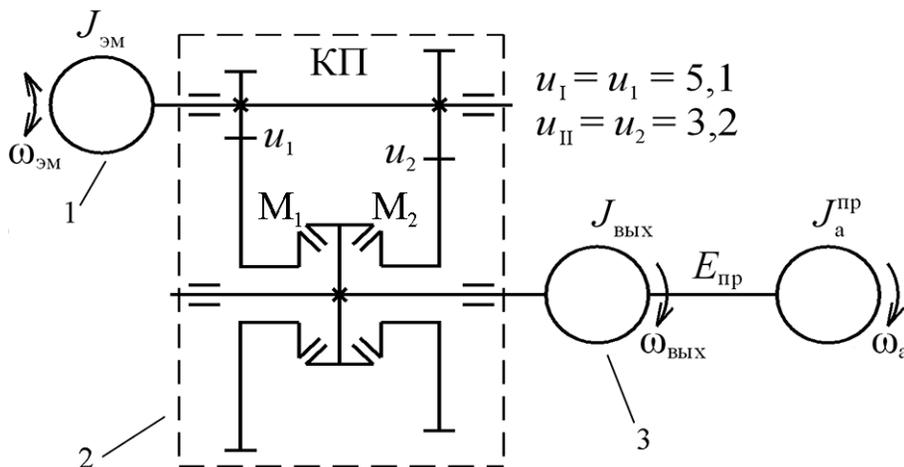


Рисунок 1 — Динамическая схема БСУ электромобиля MAZ-4381EE: 1 — тяговый ЭМ; 2 — двухступенчатая КП; 3 — приведенная масса электрогрузовика;  $u_i$  — передаточные числа;  $J_i$  — инерционные массы;  $\omega_i$  — частота вращения;  $E_{пр}$  — суммарная угловая жесткость валов;  $M_1$  и  $M_2$  — пневмоуправляемые синхронизированные зубчатые муфты, которыми осуществляется переключение КП

Figure 1 — Battery power unit (BPU) dynamic scheme of the electric truck MAZ-4381EE: 1 — traction electric motor (EM); 2 — two-speed gearbox; 3 — electric truck reduced mass;  $u_i$  — gear ratios;  $J_i$  — inertial masses;  $\omega_i$  — rotation frequency;  $E_{пр}$  — total angular stiffness of shafts;  $M_1$  and  $M_2$  — pneumatically controlled synchronized gear couplings, which are used for gearbox shifting

**Трогание и разгон.** Включена 1-я передача на КП за счет подачи сжатого воздуха в пневмокамеру. При достижении оборотов ротора тягового ЭМ  $n_{эм}$  величины  $0,95M_{эм}^{max}$  ИСУ реализует алгоритм переключения КП с 1-й передачи на 2-ю, включающий команды: сброс крутящего момента тягового ЭМ до нуля, переключение КП в нейтральное положение (N), резкое (в нашем случае за 0,95 с) снижение оборотов ротора ЭМ до величины  $8600 \cdot (u_2/u_1) = 5396 \text{ мин}^{-1}$  с целью безударного замыкания муфты  $M_2$  и минимизации нагрузок на элементы трения синхронизатора, замыкание муфты  $M_2$ .

**Замедление электрогрузовика.** Включена 2-я передача КП, обороты ротора тягового ЭМ снижаются. При достижении величины  $n_{эм}$ , равной  $4750 \text{ мин}^{-1}$ , ИСУ реализует алгоритм переключения КП со 2-й передачи на 1-ю, включающий команды: сброс крутящего момента тягового ЭМ до нуля, переключение КП в нейтральное положение, резкое (в нашем случае за 0,72 с) повышение оборотов ротора ЭМ с  $4750$  до  $7570 \text{ мин}^{-1}$ , замыкание муфты  $M_1$ .

Таблица 2 — Параметры динамической модели БСУ MAZ-4381EE  
Table 2 — Parameters of the BPU dynamic model of MAZ-4381EE

Параметр	Значение
Передаточное число 1-й передачи	5,1
Передаточное число 2-й передачи	3,2
Расчетный коэффициент сопротивления качению	0,015
Момент инерции ротора тягового ЭМ, кг·м <sup>2</sup>	0,50
Суммарный момент инерции входного вала КП, кг·м <sup>2</sup>	0,0020
Суммарный момент инерции выходного вала КП, кг·м <sup>2</sup>	0,0094
Моменты инерции карданного вала, кг·м <sup>2</sup>	0,0020
Моменты инерции полуосей ведущего моста, кг·м <sup>2</sup>	0,0080
Моменты инерции колеса, кг·м <sup>2</sup>	4,0
Суммарная угловая жесткость валов, Н·м/град	1890

**Методика моделирования.** Для моделирования динамических процессов переключения передач БСУ MAZ-4381EE использован программный комплекс MATLAB Simulink, который содержит библиотеку типовых моделей узлов и компонентов трансмиссии электромобилей. В данном случае использованы модели упругих элементов [13], шин [14], зубчатых передач [15]. Укрупненная блок-схема разработанной модели для исследования режимов разгона и замедления электрогрузовика MAZ-4381EE с переключением передач с 1-й на 2-ю и обратно представлена на рисунке 4, а на рисунке 5 — детализированная структура математической модели КП.

**Результаты моделирования** динамических процессов при переключении КП в БСУ электрогрузовика MAZ-4381EE показаны на рисунках 6–14.

**Выводы.** 1. Для минимизации динамических нагрузок в тяговом электроприводе и нагруженности синхронизированных муфт КП БСУ электрогрузовика MAZ-4381EE при переключении передач необходимо сформировать алгоритмы управления, обеспечивающие синхронизацию оборотов, замыкаемых зубчатыми муфтами элементов КП в следующем порядке:

- сброс крутящего момента тягового ЭМ до нуля;
- выключение действующей передачи КП с переходом в нейтральное положение;
- изменение оборотов ротора тягового ЭМ до расчетного значения согласно заложенным в ИСУ алгоритмам;
- замыкание зубчатых муфт за счет подачи сжатого воздуха в соответствующие пневмокамеры.

2. В результате моделирования динамических процессов, возникающих в силовом электроприводе электрогрузовика MAZ-4381EE, с помощью программного комплекса MATLAB Simulink отработаны алгоритмы управления переключением передач, которые обеспечили следующие результаты:

- время переключения с 1-й передачи на 2-ю — 0,95 с, со 2-й передачи на 1-ю — 0,72 с;
- удельная работа буксования фрикционных элементов синхронизатора при переключении с 1-й

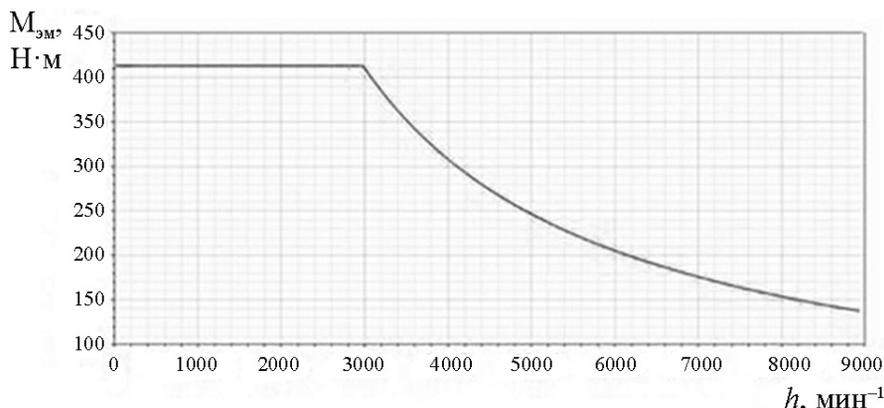
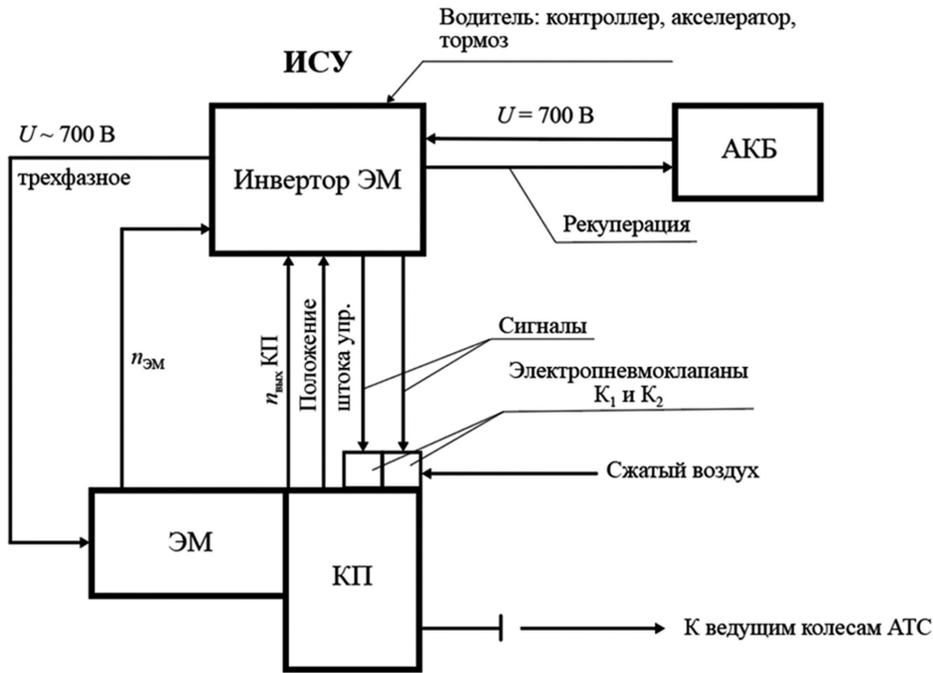
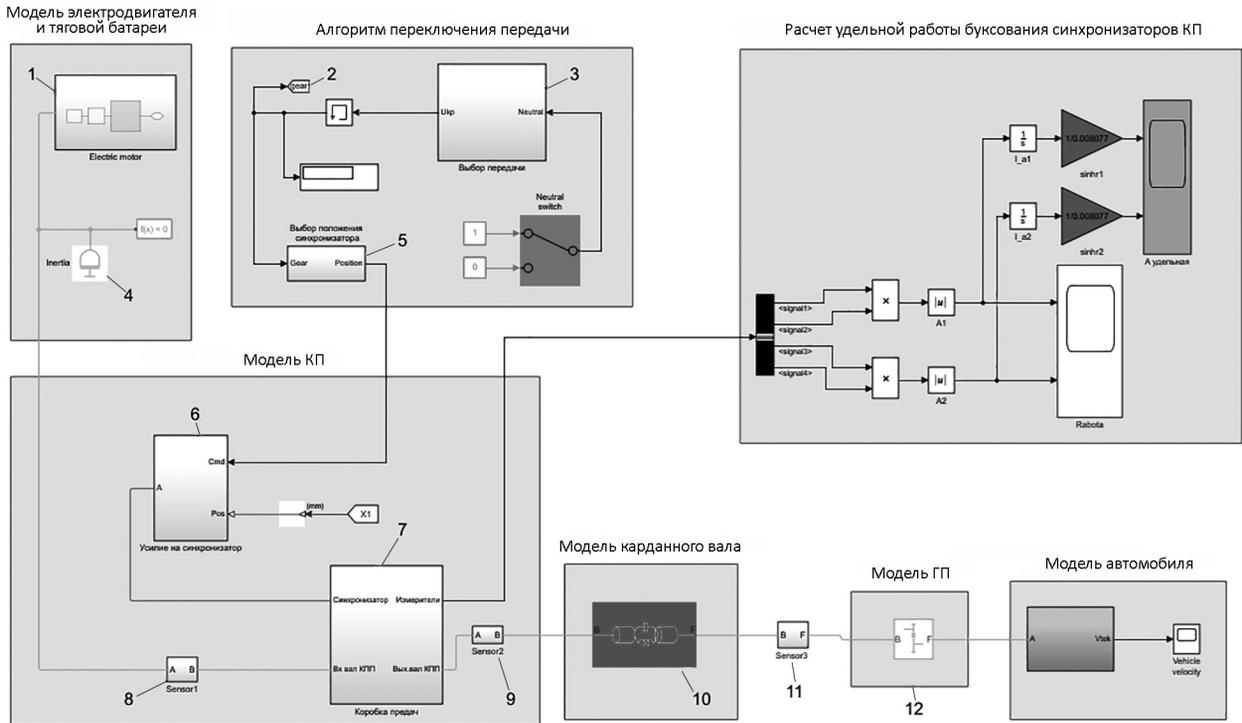


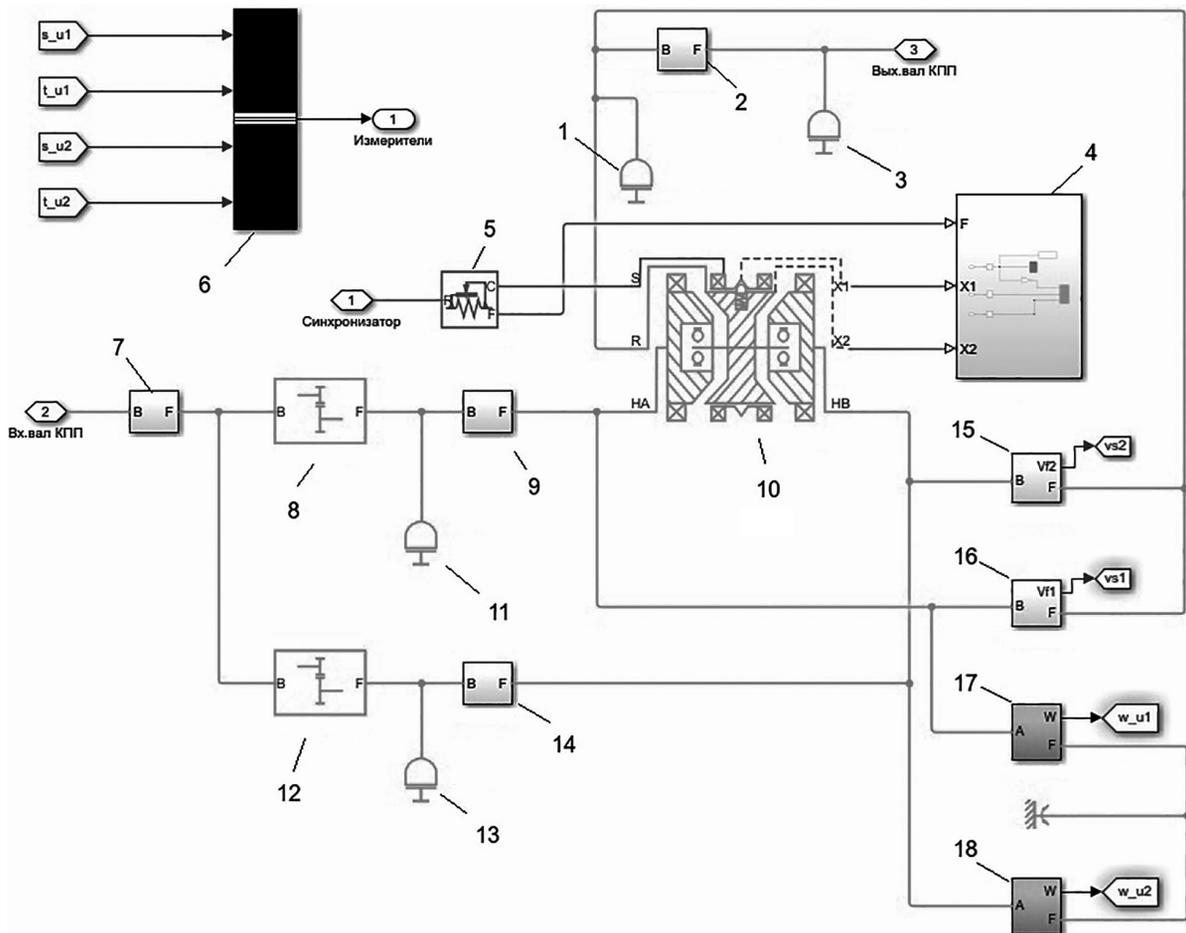
Рисунок 2 — Электромеханическая характеристика тягового ЭМ MAZ-4381EE  
Figure 2 — Electromechanical characteristic of traction EM of MAZ-4381EE



**Рисунок 3** — Структура ИСУ БСУ электрогрузовика MAZ-4381EE:  $K_1$  и  $K_2$  — электропневмоклапаны, соединяющие источник сжатого воздуха с пневмокамерами переключения КП;  $n_{эм}$  и  $n_{вых}$  — обороты ротора тягового ЭМ и выходного вала КП соответственно; АКБ — тяговая аккумуляторная батарея  
**Figure 3** — Structure of the BPU integrated control system of the electric truck MAZ-4381EE:  $K_1$  and  $K_2$  — electro-pneumovalves connecting compressed air source with pneumatic chambers of gearbox shifting;  $n_{эм}$  and  $n_{вых}$  — rotor speed of traction EM and gearbox output shaft respectively; АКБ — traction battery



**Рисунок 4** — Блок-схема математической модели БСУ электрогрузовика MAZ-4381EE: 1 — характеристика момента ЭМ, Н·м; 2 — указатель включенной передачи; 3 — блок алгоритмов выбора передачи; 4 — массо-инерционные характеристики элементов ЭМ; 5 — блок определения положения синхронизатора; 6 — блок, формирующий сигнал перемещения каретки синхронизатора; 7 — модель КП; 8 — датчики измерения частоты вращения и момента на входном валу; 9 — датчики измерения оборотов и момента на выходном валу; 10 — модель карданного вала с параметрами угловой жесткости; 11 — датчик измерения момента на выходе карданного вала; 12 — модель главной передачи  
**Figure 4** — Block diagram of the BPU mathematical model of the electric truck MAZ-4381EE: 1 — EM torque characteristic, N·m; 2 — gear indicator; 3 — gear selection algorithm unit; 4 — mass-inertial characteristics of EM elements; 5 — synchronizer position determination unit; 6 — unit forming a signal of synchronizer carriage movement; 7 — gearbox model; 8 — sensors for measuring speed and torque on the input shaft; 9 — sensors for measuring speed and torque on the output shaft; 10 — cardan shaft model with parameters of angular stiffness; 11 — sensor for measuring torque on the cardan shaft output; 12 — main gear model



**Рисунок 5** — Детализированная структура математической модели КП БСУ МАЗ-4381ЕЕ: 1 — массо-инерционные характеристики элементов, связанных с синхронизатором; 2 — датчики измерения частоты вращения и момента выходного вала; 3 — массо-инерционные характеристики выходного вала; 4 — блок сбора данных от датчиков на синхронизаторе; 5 — датчик силы; 6 — блок сбора данных от датчиков момента и частоты вращения; 7 — датчики измерения частоты вращения и момента входного вала; 8 — моделирование передаточного числа 1-й передачи; 9 — датчики измерения частоты вращения и момента ведомой шестерни 1-й передачи; 10 — модель синхронизатора; 11 — массо-инерционные характеристики элементов, связанных с шестерней 1-й передачи; 12 — моделирование передаточного числа 2-й передачи; 13 — массо-инерционные характеристики элементов, связанных с шестерней 2-й передачи; 14 — датчики измерения частоты вращения и момента ведомой шестерни 2-й передачи; 15 — датчик измерения скорости относительного скольжения на ведомой шестерне 1-й передачи; 16 — датчик измерения скорости относительного скольжения на ведомой шестерне 1-й передачи; 17 — датчик измерения скорости вращения ведомой шестерни 1-й передачи; 18 — датчик измерения скорости вращения ведомой шестерни 2-й передачи

**Figure 5** — Detailed structure of the BPU gearbox mathematical model of MAZ-4381EE: 1 — mass-inertial characteristics of the elements associated with the synchronizer; 2 — sensors for measuring the rotation speed and torque of the output shaft; 3 — mass-inertial characteristics of the output shaft; 4 — data acquisition unit from sensors on the synchronizer; 5 — force sensor; 6 — data acquisition unit from torque and speed sensors; 7 — input shaft speed and torque sensors; 8 — transmission ratio modeling of the 1st gear; 9 — sensors for measuring the speed and torque of the 1st gear idler pinion; 10 — synchronizer model; 11 — mass-inertial characteristics of the elements associated with the 1st gear pinion; 12 — transmission ratio modeling of the 2nd gear; 13 — mass-inertial characteristics of the elements associated with the 2nd gear pinion; 14 — sensors for measuring the speed and torque of the 2nd gear idler pinion; 15 — sensor for measuring the speed of relative sliding on the 2nd gear idler pinion; 16 — sensor for measuring the relative sliding speed on the 1st gear idler pinion; 17 — sensor for measuring the rotation speed of the 1st gear idler pinion; 18 — sensor for measuring the rotation speed of the 2nd gear idler pinion

передачи на 2-ю — 0,25 кДж/м<sup>2</sup>, со 2-й передачи на 1-ю — 8,1 кДж/м<sup>2</sup>, что значительно ниже допустимых значений (400 кДж/м<sup>2</sup> [19]);  
 - динамическая нагруженность БСУ МАЗ-4381ЕЕ при переключении передач (см. рисунки 12, 13) минимальна: отношение максимального значения  $M_{кр}$  к номинальному составляет не более 5 %;  
 - резкие изменения оборотов ротора тягового ЭМ при переключении передач обеспечиваются алгоритмами инвертора тягового ЭМ, при этом происходит рекуперация энергии ротора ЭМ в АКБ при переключении «вверх» и разгон ротора ЭМ за счет энергии АКБ при переключении «вниз».

3. При переключении передач зубчатыми муфтами имеет место разрыв потока мощности, передаваемой к ведущим колесам грузовика, при этом автомобиль движется по инерции, а КП находится в нейтральном состоянии. Время разрыва потока мощности определяется продолжительностью изменения оборотов тягового ЭМ и перемещения каретки синхронизатора и должно быть минимальным. В нашем случае оно составляет 0,72–0,95 с, что не приводит к ощутимой потере скорости грузовика.

4. Точность синхронизации оборотов, замыкаемых зубчатыми муфтами элементов КП,

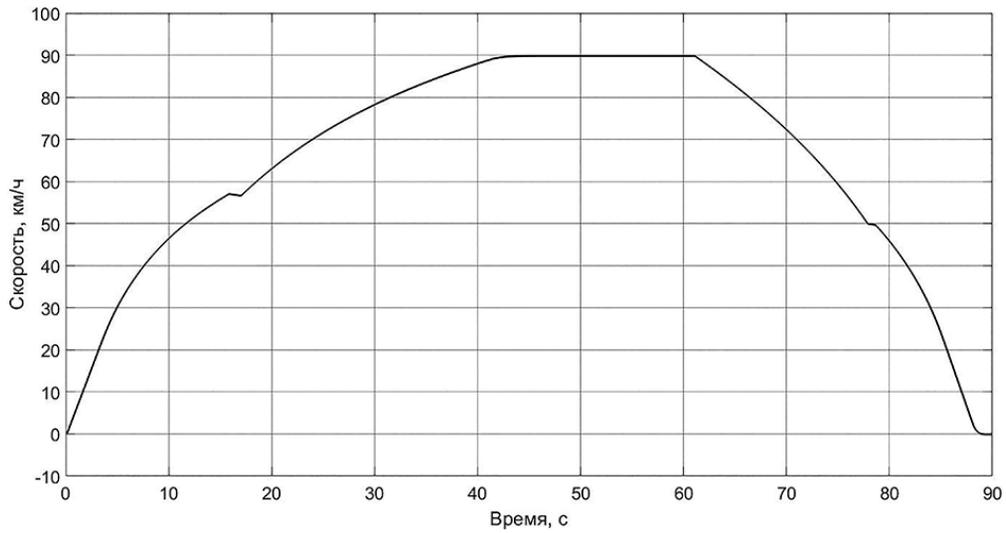


Рисунок 6 — График изменения скорости электрогрузовика при разгоне до максимальной скорости и при замедлении  
 Figure 6 — Graph of electric truck speed change during acceleration to maximum speed and deceleration

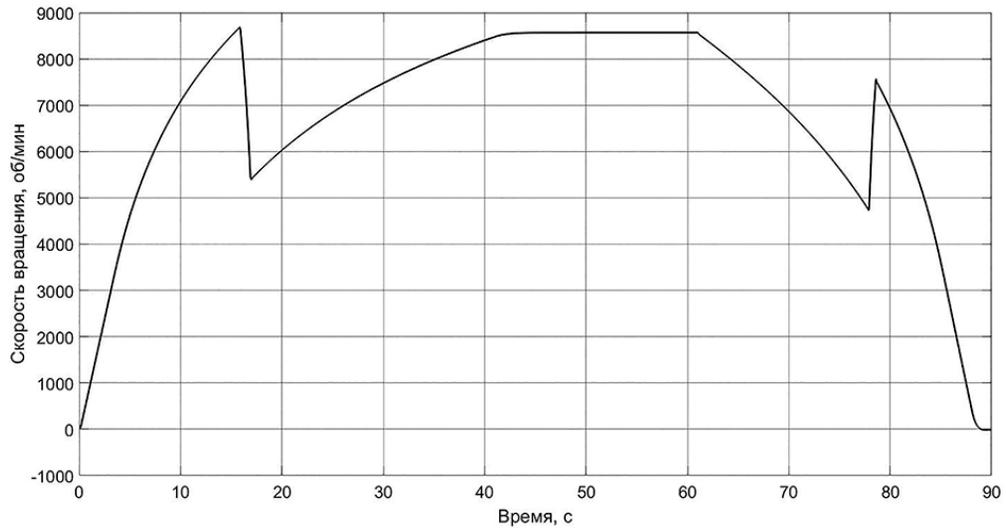


Рисунок 7 — График изменения оборотов ротора тягового ЭМ при разгоне и замедлении электрогрузовика и переключении передач с низшей на высшую и обратно  
 Figure 7 — Graph of traction EM rotor speed change during acceleration and deceleration of electric truck and gear shifting from low to high and vice versa

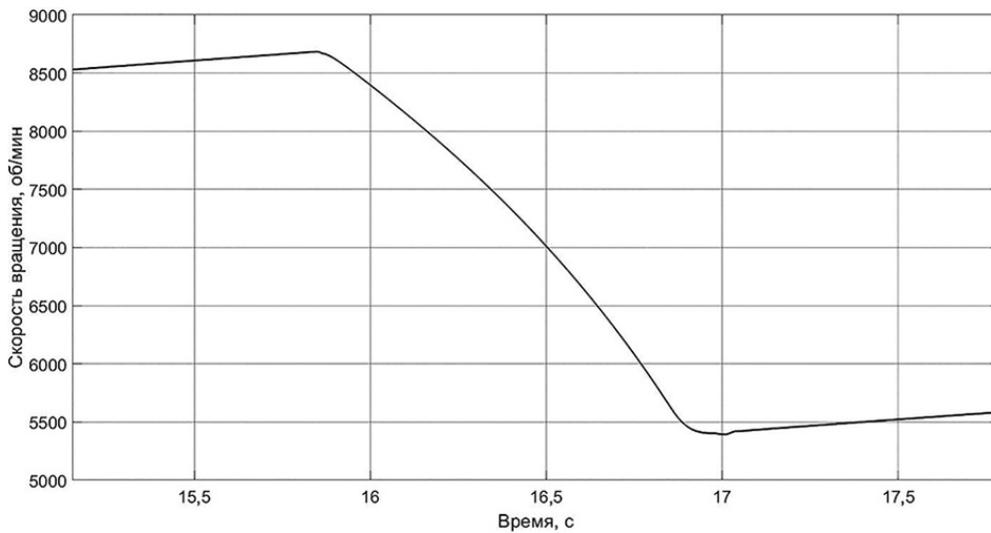


Рисунок 8 — График изменения оборотов ротора тягового ЭМ при переключении с 1-й передачи на 2-ю  
 Figure 8 — Graph of traction EM rotor speed change when shifting from 1st gear to 2nd gear

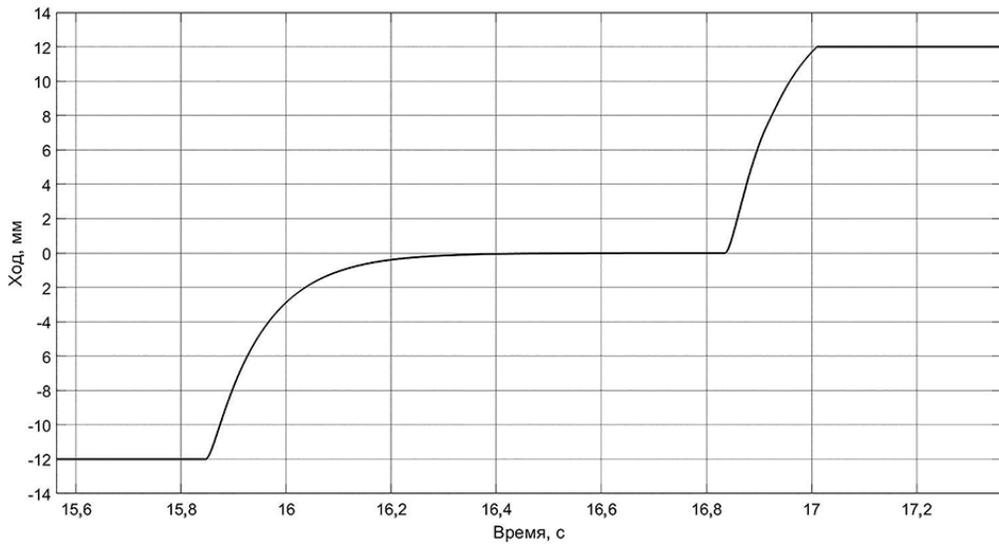


Рисунок 9 — График перемещения каретки синхронизатора КП при переключении с 1-й передачи на 2-ю  
 Figure 9 — Graph of synchronizer carriage movement when shifting from 1st gear to 2nd gear

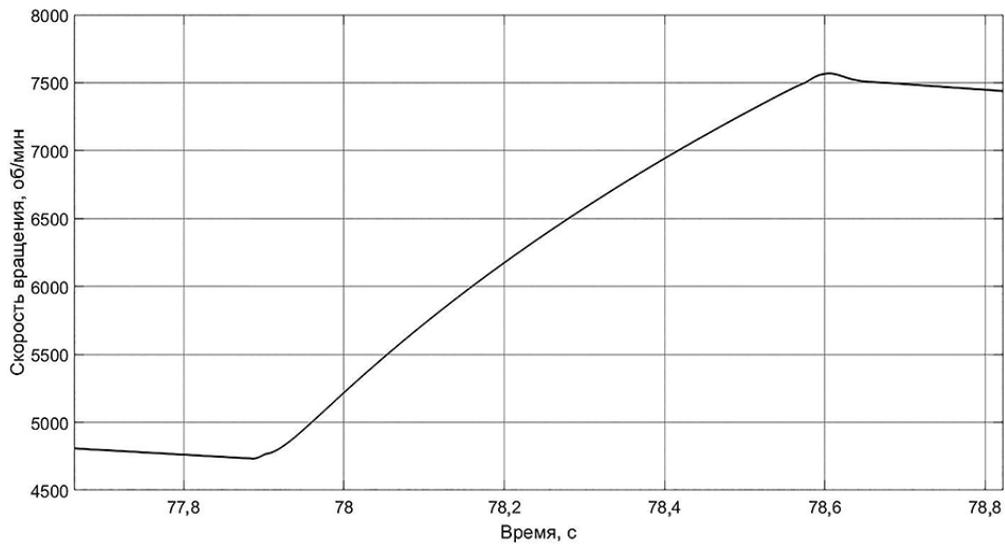


Рисунок 10 — График изменения оборотов ротора ЭМ при переключении со 2-й передачи на 1-ю  
 Figure 10 — Graph of traction EM rotor speed change when shifting from 2nd gear to 1st gear

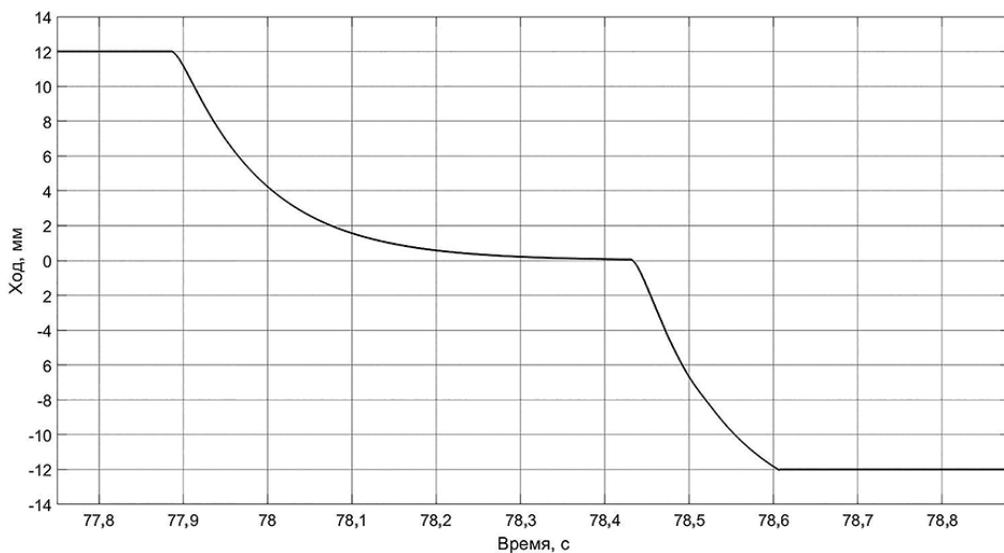


Рисунок 11 — График перемещения каретки синхронизатора при переключении со 2-й передачи на 1-ю  
 Figure 11 — Graph of synchronizer carriage movement when shifting from 2nd gear to 1st gear

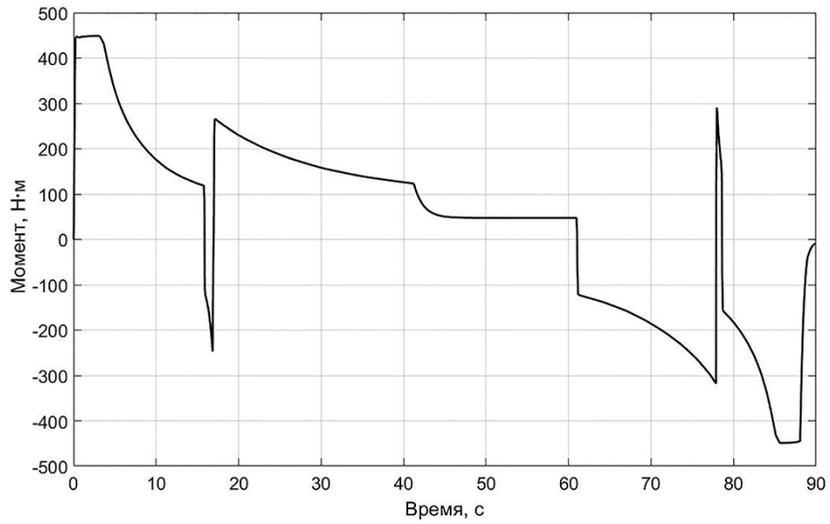


Рисунок 12 — Графики изменения моментов тягового ЭМ электрогрузовика для полной и снаряженной масс  
 Figure 12 — Graphs of variation of electric truck traction EM torques change for gross and curb weights

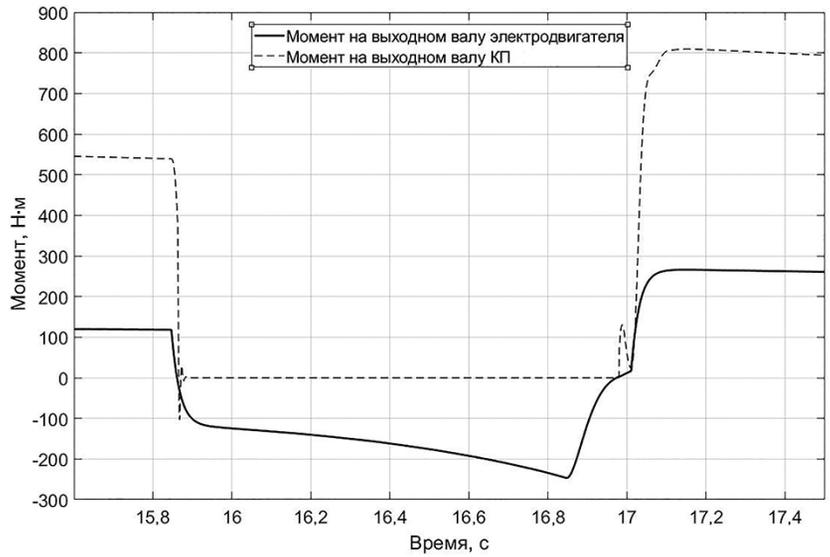


Рисунок 13 — Графики изменения моментов на валу тягового ЭМ и на выходном валу КП при переключении с 1-й передачи на 2-ю

Figure 13 — Graphs of torque change on the traction EM shaft and on the gearbox output shaft when shifting from 1st gear to 2nd gear

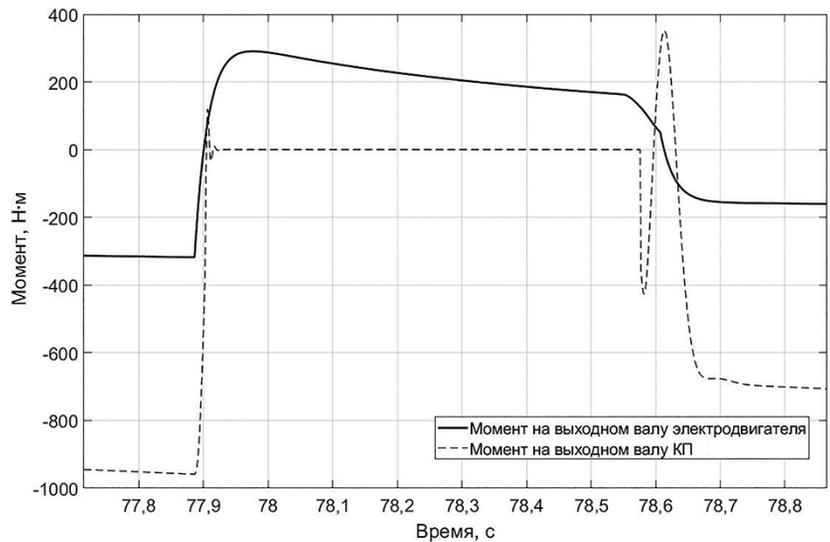


Рисунок 14 — Графики изменения моментов тягового ЭМ и на выходном валу КП при переключении со 2-й передачи на 1-ю

Figure 14 — Graphs of torque change on the traction EM and on the gearbox output shaft when shifting from 2nd gear to 1st gear

определяет нагруженность элементов трения синхронизаторов. При высоком качестве и корректном исполнении алгоритмов управления переключением передач можно отказаться от синхронизированных муфт управления и перейти только к зубчатым муфтам, т. е. значительно уменьшить габариты, массу и стоимость КП.

### Список литературы

1. Применение коробок передач в силовых приводах электротранспорта / С.Н. Поддубко [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2020. — № 3(52). — С. 5–11. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-3-52-5-11>.
2. Chavdar, B. Multi-speed transmission for commercial delivery medium duty plug-in electric drive vehicles / B. Chavdar // Conference: 2016 DOE Vehicle Technologies Office Annual Merit Review and Peer Evaluation, Washington, June 9, 2016. — DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10951.70562>.
3. Красневский, Л.Г. Автоматические трансмиссии. Технология «Clutch-to-Clutch Shifts»: практика применения // Л.Г. Красневский // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск, 2018. — Вып. 7. — С. 48–59.
4. Красневский, Л.Г. Автоматические трансмиссии: технология «Clutch-to-Clutch Shifts» — история и современное состояние / Л.Г. Красневский, А.В. Белевич // Механика машин, механизмов и материалов. — 2018. — № 1(42). — С. 5–13.
5. Альгин, В.Б. Расчет мобильной техники: кинематика, динамика, ресурс / В.Б. Альгин. — Минск: Беларус. навука, 2014. — 271 с.
6. Альгин, В.Б. Комментарий к статье В.В. Михайлова [и др.] «Математическая модель автоматической трансмиссии в структуре испытательного комплекса» / В.Б. Альгин // Механика машин, механизмов и материалов. — 2012. — № 2(19). — С. 30–31.
7. Тарасик, В.П. Влияние характеристик управления фрикционными гидромеханической передачи на показатели эффективности их функционирования / В.П. Тарасик, О.В. Пузанова // Автомобильная промышленность. — 2020. — № 11. — С. 4–11.
8. Тарасик, В.П. Управление фрикционными гидромеханической передачи / В.П. Тарасик, О.В. Пузанова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. — 2021. — № 2(71). — С. 20–30.
9. Математическая модель автоматической трансмиссии в структуре испытательного комплекса / В.В. Михайлов [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2012. — № 2(19). — С. 22–29.
10. Павловский, В.Е. Динамическая модель механической трансмиссии автомобиля / В.Е. Павловский, В.Н. Огольцов // Спецтехника и связь. — 2012. — № 5–6. — С. 27–36.
11. Результаты исследования электромобиля на шасси «ГАЗель» / А.Н. Блохин [и др.] // Наука и образование: науч. издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2012. — № 12. — С. 75–106. — DOI: <https://doi.org/10.7463/1212.0499839>.
12. Шарипов, В.М. О коэффициенте трения в контакте пар трения фрикционных муфт в коробках передач автомобилей и тракторов при переключении передач без разрыва потока мощности / В.М. Шарипов, М.И. Дмитриев, К.И. Городецкий // Наука и образование: науч. издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2016. — № 8. — С. 21–30.
13. Flexible shaft [Electronic resource]. — Mode of access: <https://www.mathworks.com/help/sdl/ref/flexibleshaft.html>. — Date of access: 14.02.2024.
14. Pacejka, H.B. Tyre and vehicle dynamics / H.B. Pacejka. — Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2002. — 627 p.
15. Design, analysis, and simulation of a four-wheel-drive transmission for an all-terrain vehicle / C. Kannan [et al.] // SAE Technical Paper. — 2022. — No. 2022-01-5039. — DOI: <https://doi.org/10.4271/2022-01-5039>.
16. Closed loop clutch control of an automatic shift transmission: pat. US 5046176A / W.C. Lin. — Publ. date: 03.09.1991.
17. Красневский, Л.Г. Автоматические трансмиссии. Комплекс алгоритмов технологии «Clutch-to-Clutch Shifts»: анализ архитектуры, обобщенная структура, развитие. Часть 2 / Л.Г. Красневский // Механика машин, механизмов и материалов. — 2021. — № 3(56). — С. 13–24. — DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-3-56-13-24>.
18. Поддубко, С.Н. Выбор рационального режима процесса переключения передач в механической трансмиссии с двойным сцеплением / С.Н. Поддубко, А.М. Гоман, В.В. Шпортько. — Механика машин, механизмов и материалов. — 2015. — № 3(32). — С. 15–21.
19. Осеичугов, В.В. Автомобиль: анализ конструкции, элементы расчета: учеб. для студ. вузов по спец. «Автомобили и автомоб. хоз-во» / В.В. Осеичугов, А.К. Фрункин. — М.: Машиностроение, 1989. — 304 с.

**PODDUBKO Sergey N., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.**

Director General<sup>1</sup>

E-mail: [bats@ncpmm.bas-net.by](mailto:bats@ncpmm.bas-net.by)

**KALESNIKOVICH Andrei N.**

Head of the Department of Computer Modeling and Virtual Testing of the Republican Computer Center of Mechanical Engineering<sup>1</sup>

E-mail: [kalesnikovich\\_an@oim.by](mailto:kalesnikovich_an@oim.by)

**KRAUCHONAK Aliaksei L.**

Researcher of the Department of Computer Modeling and Virtual Testing of the Republican Computer Center of Mechanical Engineering<sup>1</sup>

E-mail: [kravchenoks@mail.ru](mailto:kravchenoks@mail.ru)

**SHABANAU Pavel E.**

Chief Designer for Automotive Machinery – Head of the Chief Designer’s Department<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>JSC “Minsk Automobile Plant” — Managing Company of “BELAVTOMAZ” Holding, Minsk, Republic of Belarus

Received 21 February 2024.

## MODELING OF DYNAMIC PROCESSES OF ELECTRIC TRUCK MAZ-4381EE POWER UNIT USING MATLAB SIMULINK SOFTWARE PACKAGE

*A dynamic model of the battery power unit of the electric truck MAZ-4381EE with a two-speed gearbox is considered. The dynamic processes arising at gear shifting are investigated. The gearbox is switched by controlling the rotational speed of the traction electric motor synchronously with the process of switching on the synchronized gear coupling of the gearbox. When simulating the processes of gear shifting, dynamic loads, time of clutch engagement and synchronization of rotation frequencies of gearbox links, work and power of slipping of friction elements of the synchronizer are estimated. According to the simulation results, the necessity is shown for using feedbacks for controlling the traction electric motor and state parameters of synchronized gearbox couplings, and an algorithm is proposed for controlling the power electric drive of the electric truck, which provides minimum dynamic loads in the electric drive and low load of gearbox synchronizers.*

**Keywords:** electric truck, battery power unit, traction electric motor, two-speed gearbox, gear shifting, synchronizer, gear coupling

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-2-67-5-14>

### References

- Poddubko S.N., Ishin N.N., Goman A.M., Skorokhodov A.S., Shabanov P.A. Primenenie korobok peredach v silovykh privodakh elektrotransporta [Application of gearboxes in power drives of electric vehicles]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2020, no. 3(52), pp. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2020-3-52-5-11> (in Russ.).
- Chavdar B. Multi-speed transmission for commercial delivery medium duty plug-in electric drive vehicles. *Proc. 2016 DOE vehicle technologies office annual merit review and peer evaluation*. Washington, 2016. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10951.70562>.
- Krasnevskiy L.G. Avtomaticheskie transmissii. Tekhnologiya “Clutch-to-Clutch Shifts”: praktika primeneniya [Automatic transmissions. “Clutch-to-Clutch Shifts” technology: practical application]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2018, iss. 7, pp. 48–59 (in Russ.).
- Krasnevskiy L.G., Belevich A.V. Avtomaticheskie transmissii: tekhnologiya «Clutch-to-Clutch Shifts» — istoriya i sovremennoe sostoyanie [Automatic transmissions: technology “Clutch-to-Clutch Shifts” — history and current status]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2018, no. 1(42), pp. 5–13 (in Russ.).
- Algin V.B. *Raschet mobilnoy tekhniki: kinematika, dinamika, resurs* [Calculation of mobile machinery: kinematics, dynamics, life]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2014. 271 p. (in Russ.).
- Algin V.B. Kommentariy k state V.V. Mikhaylova [i dr.] “Matematicheskaya model avtomaticheskoy transmissii v strukture ispytatelnogo kompleksa” [Commentary on the article by V.V. Mikhailau [et al.] “Automatic transmission simulation model in the test set”]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2012, no. 2(19), pp. 30–31 (in Russ.).
- Tarasik V.P., Puzanova O.V. Vliyanie kharakteristik upravleniya friktsionami gidromekhanicheskoy peredachi na pokazateli effektivnosti ikh funktsionirovaniya [Impact of friction control characteristic hedromechanical transmission for performance indicators]. *Avtomobilnaya promyshlennost*, 2020, no. 11, pp. 4–11 (in Russ.).
- Tarasik V.P., Puzanova O.V. Upravlenie friktsionami gidromekhanicheskoy peredachi [Friction clutch control in hydromechanical transmission]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*, 2021, no. 2(71), pp. 20–30 (in Russ.).
- Mikhailau V.V., Basalae V.N., Snitkov A.G., Sorochan V.M. Matematicheskaya model avtomaticheskoy transmissii v strukture ispytatelnogo kompleksa [Automatic transmission simulation model in the test set]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2012, no. 2(19), pp. 22–29 (in Russ.).
- Pavlovskiy V.E., Ogotsov V.N. Dinamicheskaya model mekhanicheskoy transmissii avtomobilya [Dynamic model of a mechanical transmission of a car]. *Spetstekhnika i svyaz*, 2012, no. 5–6, pp. 27–36 (in Russ.).
- Blokhin A.N., Groshev A.M., Kozlova T.A., Yarjenskii A.D., Seropyan M.S. Rezultaty issledovaniya elektromobilya na shassi “GAZel” [Research data on the electric vehicle with “GAZelle” chassis]. *Science and education of Bauman MSTU*, 2012, no. 12, pp. 75–106. DOI: <https://doi.org/10.7463/1212.0499839> (in Russ.).
- Sharipov V.M., Dmitriev M.I., Gorodetskiy K.I. O koeffitsiente treniya v kontakte par treniya friktsionnykh muft v korobkakh peredach avtomobily i traktorov pri pereklyuchenii peredach bez razryva potoka moshchnosti [On a friction coefficient in contacting friction pairs of friction clutches in car and tractor gearbox in gear shifting without power flow interruption]. *Science and Education of Bauman MSTU*, 2016, no. 8, pp. 21–30 (in Russ.).
- Flexible shaft*. Available at: <https://www.mathworks.com/help/sdl/ref/flexibleshaft.html> (accessed 14 February 2024).
- Pacejka H.B. *Tyre and vehicle dynamics*. Oxford, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2002. 627 p.
- Kannan C., Ashok B., Dighe H., Agarwal S., Kapoor D., Kasana A., Mathew A. Design, analysis, and simulation of a four-wheel-drive transmission for an all-terrain vehicle. *SAE Technical Paper*, no. 2022-01-5039, 2022. DOI: <https://doi.org/10.4271/2022-01-5039>.
- Lin W.C. *Closed loop clutch control of an automatic shift transmission*. Patent US, no. 5046176A, 1991.
- Krasnevskiy L.G. Avtomaticheskie transmissii. Kompleks algoritmov tekhnologii “Clutch-to-Clutch Shifts”: analiz arkhitektury, obobshchennaya struktura, razvitie. Chast 2 [Automatic transmissions. complex of algorithms of “Clutch-to-Clutch Shifts” technology: analysis of architecture, generalized structure, development. Part 2]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2021, no. 3(56), pp. 13–24. DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-3-56-13-24> (in Russ.).
- Poddubko S.N., Goman A.M., Shportko V.V. Vybór ratsionalnogo rezhima protsessa pereklyucheniya peredach v mekhanicheskoy transmissii s dvoynym stsepleniem [The choice of the rational mode of gear shifting process in mechanical dual-clutch transmission]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2015, no. 3(32), pp. 15–21 (in Russ.).
- Osephugov V.V., Frunkin A.K. *Avtomobil: analiz konstruksii, elementy rascheta* [Car: design analysis, calculation elements]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 304 p. (in Russ.).