

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ТРАКТОРА С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ БУЛЬДОЗИРОВАНИЯ

С.В. Кондаков¹, kondakovsv@susu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6818-1694>

Г.В. Ломакин¹, lomakingv@susu.ru

О.О. Павловская¹, pavlovskayaoo@susu.ru

А.Е. Горелый¹, gorelyj1409@gmail.com

М.В. Дмитриук², dmitryuk_mv@tm10.ru

К.В. Гаврилов¹, gavrilovkv@susu.ru

Ю.В. Рождественский¹, rozhdestvenskiiyv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2107-1310>

Е.А. Гартлиб², gartlib_ea@tm10.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² Завод «ДСТ-УРАЛ», Челябинск, Россия

Аннотация. Появление на рынке доступных, относительно компактных электромашин с постоянными магнитами для тяжелой строительной техники открывает новые перспективы внедрения в трансмиссии промышленных тракторов электрических приводов. Это тоже бесступенчатые, внешне регулируемые трансмиссии, как и гидростатические. Легко автоматизируются и позволяют конструировать беспилотные транспортные и технологические средства. Очевидное преимущество электрических трансмиссий перед гидростатическими состоит в коэффициенте полезного действия. Литературные источники утверждают, что КПД электромашин с постоянными магнитами почти 100 %, в отличие от гидростатических, у которых средний КПД около 80 %. У ГСТ нет возможности рекуперации мощности. Нет дополнительного устройства в виде накопителя энергии (АКБ). Для электрической энергии такого рода возможности известны и широко используются. Накопитель энергии в отличие от общепринятого понимания АКБ соединяет в себе свойства конденсатора, способного быстро заряжаться и разряжаться, и собственно аккумулятора, способного сохранять энергию продолжительное время. Итак, целью данного исследования является математическое описание процесса совместной работы двигателя внутреннего сгорания, генератора, тяговых электродвигателей и АКБ (будем так по традиции называть накопитель энергии) при выполнении бульдозерных операций. Бульдозер нагружает моторно-трансмиссионную установку промышленного трактора резко изменяющимися (до 10 крат) во времени нагрузками за короткий период (100 с). Интересны величины токов и напряжений в ЭМТ в процессе работы промышленного трактора D12E весом 21 т производства завода «ДСТ-Урал»: токи порядка 200 А, напряжения – 500 В. Результаты моделирования важны и для вновь проектируемых сверхтяжелых бульдозеров «ДСТ-Урал» D30 и D40 с электромеханической трансмиссией.

Ключевые слова: бульдозерный цикл, двигатель внутреннего сгорания, электромеханическая трансмиссия, генератор, тяговый электродвигатель, накопитель энергии, средняя выходная мощность моторно-трансмиссионной установки

Для цитирования: Моделирование промышленного трактора с электрической трансмиссией в технологическом цикле бульдозирования / С.В. Кондаков, Г.В. Ломакин, О.О. Павловская и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2026. Т. 26, № 3. С. 105–114. DOI: 10.14529/engin260309

SIMULATION OF AN INDUSTRIAL TRACTOR WITH AN ELECTRIC TRANSMISSION IN A BULLDOZING TECHNOLOGICAL CYCLE

S.V. Kondakov¹, kondakovsv@susu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6818-1694>

G.V. Lomakin¹, lomakingv@susu.ru

O.O. Pavlovskaya¹, pavlovkayaoo@susu.ru

A.E. Gorely¹, gorelyj1409@gmail.com

M.V. Dmitryuk², dmitryuk_mv@tm10.ru

K.V. Gavrilov¹, gavrilovkv@susu.ru

Yu.V. Rozhdestvensky¹, rozhdestvenskiiyv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2107-1310>

E.A. Gartlieb², gartlib_ea@tm10.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² DST-URAL plant, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The emergence of affordable, relatively compact permanent magnet electric machines for heavy construction equipment opens up new prospects for the implementation of electric drives in industrial tractor transmissions. These are also continuously variable, externally adjustable transmissions, like hydrostatic ones. They are easily automated and allow the design of unmanned vehicles and technological equipment. The obvious advantage of electric transmissions over hydrostatic ones is their efficiency. Literary sources claim that the efficiency of permanent magnet electric machines is almost 100 %. In contrast, hydrostatic machines have an average efficiency of approximately 80 %. Permanent magnet electric machines do not have the ability to recuperate power. There is no additional device in the form of an energy storage unit (ESU). For electrical energy, such capabilities are well known and widely used. An ESU, unlike the generally accepted understanding of a ESU, combines the properties of a capacitor, capable of rapid charging and discharging, and a battery, capable of storing energy for an extended period. The purpose of this study is to mathematically describe the combined operation of an internal combustion engine, generator, traction electric motors, and battery (as we will traditionally refer to the energy storage device) during bulldozer operations. The bulldozer loads the motor-transmission unit of an industrial tractor with rapidly changing (up to 10-fold) loads over a short period (100 seconds). Of interest is the magnitude of currents and voltages in the EMT during operation of a 21-ton D12E industrial tractor manufactured by the DST-Ural plant. Currents are approximately 200 A, and voltages are 500 V. The modeling results are also important for the newly designed DST-Ural D30 and D40 super-heavy bulldozers.

Keywords: bulldozer cycle, internal combustion engine, electromechanical transmission, generator, traction electric motor, energy storage device, average output power of the motor-transmission unit

For citation: Kondakov S.V., Lomakin G.V., Pavlovskaya O.O., Gorely A.E., Dmitryuk M.V., Gavrilov K.V., Rozhdestvensky Yu.V., Gartlieb E.A. Simulation of an industrial tractor with an electric transmission in a bulldozing technological cycle. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2026;26(3):105–114. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin260309

Актуальность темы исследования

Появление на рынке доступных, надежных и мощных вентильных электромашин открывает широкие перспективы внедрения их в трансмиссиях колесных и гусеничных машин различного назначения [1–9], в том числе в промышленных тракторах-бульдозерах. Производят электрические тракторы Caterpillar, Comatsy, Libher, John Deere, в Челябинске – тракторные заводы «Уралтрак» и «ДСТ-Урал».

Известные дизель-электрические трактора ДЭТ-250 и ДЭТ-350 хорошо зарекомендовали себя в эксплуатации. Информация о новых возможностях накопителей энергии для транспортно-технологических машин приведена в статьях [10, 11]. Теория и практика применения вентильных электродвигателей изложены в работах отечественных и зарубежных авторов [12–16]. В статье [17] проведен сравнительный анализ исполнительных электродвигателей тягового электроприво-

да транспортных машин. Показано преимущество синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов (СПМ). Показаны параметры СПМ для трактора ДЭТ-400.

В статье рассмотрена моторно-трансмиссионная установка трактора производства завода «ДСТ-Урал», состоящая из генератора (Г), питающегося от ДВС, двух бортовых тяговых электродвигателей (ТЭД), накопителя энергии (АКБ), реле-регулятора (РР) и бортовых редукторов (БР) (рис. 1).

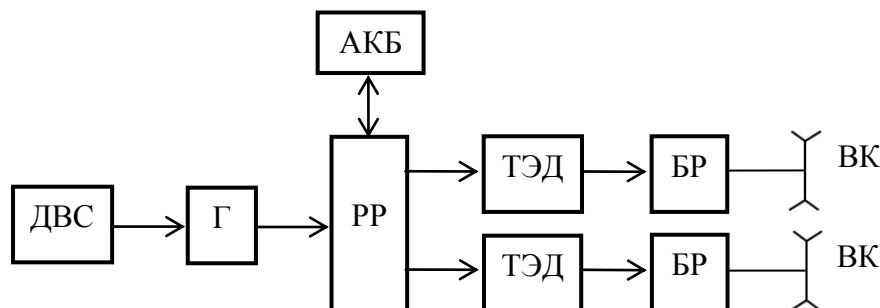


Рис. 1. Структурная схема моторно-трансмиссионной установки
Fig. 1. Structural diagram of the motor-transmission unit

Заряд-разряд отслеживается по направлению тока АКБ. Заряд при положительном токе, разряд – при отрицательном.

Реле-регулятор предназначен для поддержания напряжения в сети (в данном случае на клеммах АКБ). При этом ЭДС АКБ пропорционален заряду. Полный заряд АКБ $50 \text{ А} \cdot \text{ч} = 90 \text{ МДж}$, номинальная ЭДС $E = 540 \text{ В}$.

Бульдозерный цикл дополнен откатом с маленьким сопротивлением движению и скоростью 6 км/ч . В контексте данной статьи это интересно, так как АКБ во время отката заряжается вполне успешно.

Математическая модель МТУ бульдозера отличается от ранее использованных, в том числе авторами [18–20], наличием электрических параметров: тока, напряжения, электродвижущей силы (ЭДС), электрических сопротивлений, зарядом АКБ, передаточным числом реле-регулятора = электрическим коэффициентом трансформации (рис. 2)

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{\text{двс}} \frac{d\omega_{\text{двс}}}{dt} = M_{\text{двс}} - M_{\text{гн}}, \\ J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_{\text{тэд1}} - M_{\text{с1}}, \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{\text{тэд2}} - M_{\text{с2}}, \\ M_{\text{гн}} = k_{\text{гн}} (I_1 + I_2 + I_{\text{акб}}), \\ I_{\text{акб}} = \left(\frac{U_{\text{гн}}}{i_{\text{рр}}} - E_{\text{акб}} \right) \frac{1}{r_{\text{акб}}}, \\ W_{\text{акб}} = \int I_{\text{акб}} E_{\text{акб}} dt, \\ E_{\text{акб}} = aW_{\text{акб}} + b, \end{array} \right.$$

где $J_{\text{двс}}, J_1, J_2$ – моменты инерции ДВС и ведущих колес с присоединенными к ним массами, $\omega_{\text{двс}}, \omega_1, \omega_2$ – частоты вращения коленчатого вала ДВС и ведущих колёс соответственно, $M_{\text{двс}}, M_{\text{гн}}, M_{\text{тэд1}}, M_{\text{тэд2}}, M_{\text{с1}}, M_{\text{с2}}$ – моменты ДВС, генератора, тяговых электродвигателей и сопротивления на ведущих колесах, $W_{\text{акб}}, I_{\text{акб}}, E_{\text{акб}}$ – заряд, ток заряда-разряда, ЭДС АКБ, a, b – коэффициенты аппроксимации.

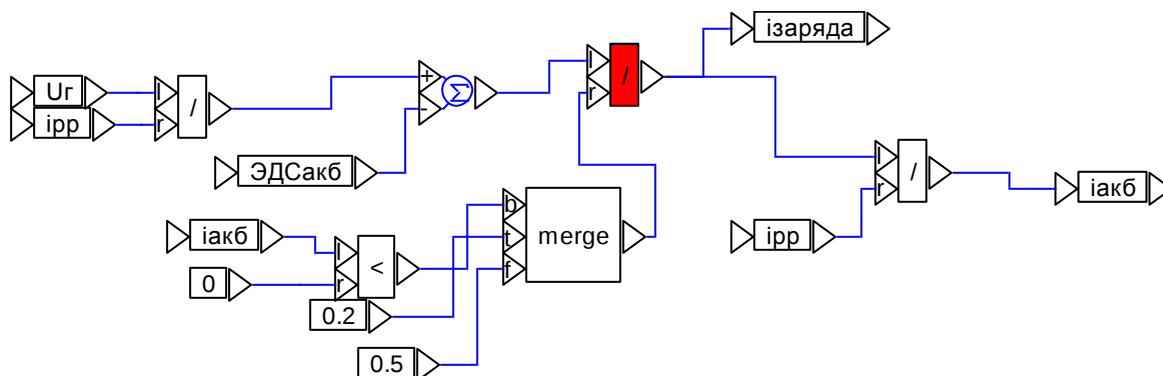


Рис. 2. Блок схема формирования тока заряда-разряда АКБ
Fig. 2. Block diagram of the battery charge-discharge current generation

Главный интерес в моделировании представляет заряд-разряд АКБ в процессе бульдозирования. В течение бульдозерного цикла (100 с) при маленьком сопротивлении движению АКБ заряжается, а при большом – разряжается, и это видно на графиках (рис. 3, 4). Установлено, что при $i_{pp} = 1,24$ заряд АКБ уменьшается за каждый бульдозерный цикл, а при $i_{pp} = 1,05$ заряд АКБ увеличивается за каждый бульдозерный цикл. Указанные значения i_{pp} получены из заданного условия: полностью заряженная АКБ (90 МДж) разряжается в процессе работы до 60 МДж за 15 мин, а затем заряжается до 90 МДж за следующие 50 мин. И этот период повторяется в течение всего времени работы бульдозера, что соответствует условиям предварительных испытаний реального трактора-бульдозера D12E производства завода «ДСТ-Урал». Следует прокомментировать это положение. Бульдозерный цикл (100 с) повторяется многократно в течение 4000 с (1 ч 5 мин). Начинается с полностью заряженной АКБ, в течение 15 мин емкость АКБ снижается до 60 МДж, затем передаточное число реле-регулятора переключается с 1,24 на 1,05 и в течение 50 мин АКБ накапливает заряд до исходных 90 МДж. При этом внутри каждого из 40 циклов по 100 с имеет место в разной степени как заряд, так и разряд АКБ.

Результаты моделирования приведены на рис. 3–5.

По рис. 3 видно, что первые 9 циклов (900 с) АКБ отдает заряд в сеть, затем в течение 10–40 циклов (900–4000 с) восполняет его. Интенсивность разряда уменьшается от первого до девятого цикла, затем от 10 до 40 цикла интенсивность заряда уменьшается.

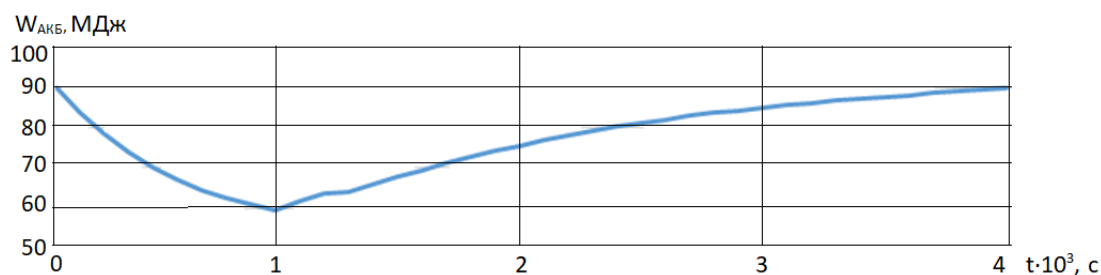


Рис. 3. Емкость (заряд) АКБ в часовом периоде бульдозирования
Fig. 3. Battery capacity (charge) during the hourly bulldozing period

Оценка КПД по отношению мощности на выходе к мощности на входе (как это сделано в случае ГСТ [20]) становится невозможной для рассматриваемой ЭМТ, поскольку в процессе бульдозирования чередуются циклы заряда и разряда АКБ. При заряде мощность ДВС тратится на ведущие колеса и АКБ, а в случае разряда, наоборот, – ведущие колеса получают энергию из двух источников: ДВС и АКБ. Поэтому КПД ЭМТ определено по интегральному показателю за весь период разряда и заряда АКБ как отношение энергии (работы) на ведущих колесах к энергии, выработанной ДВС за весь период разряда АКБ с 90 МДж до 60 МДж (15 мин) и заряда АКБ с 60 МДж до 90 МДж (50 мин).

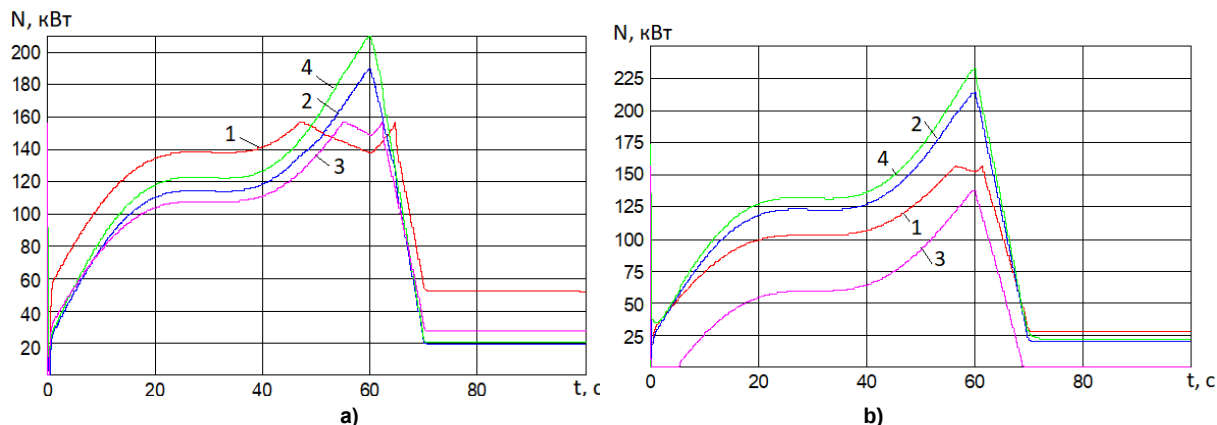


Рис. 4. Мощности ДВС и на ведущих колесах при «зарядном» и «разрядном» режимах работы АКБ при емкости АКБ: а) около 60 МДж; б) около 90 МДж

Fig. 4. Engine power and power at the drive wheels in the “charging” and “discharging” modes of the battery operation at battery capacity: (a) about 60 MJ, (b) about 90 MJ

На рис. 4 графики 1 – мощность ДВС при «зарядном режиме» $i_{pp} = 1,05$ (в среднем 140 кВт в рабочем цикле и 50 кВт при откате), графики 2 – мощность на выходе, графики 3 – мощность ДВС при «разрядном режиме» $i_{pp} = 1,24$ (в среднем 110 кВт при работе, 30 кВт при откате), графики 4 – мощность на выходе (больше при «разрядном режиме», чем при «зарядном режиме», видимо электротяга эффективнее, трактор движется быстрее). При откате мощности на выходе одинаковы в обоих режимах – 20 кВт

Комментарии по графикам мощностей на разных режимах:

- в начале периода разряда мощность на выходе больше мощности ДВС в среднем вдвое, мощность разряда АКБ – 75 кВт. В конце периода разряда мощность на выходе больше мощности ДВС в среднем на 20 %, мощность разряда АКБ – 25 кВт;

- в начале периода заряда, наоборот, мощность на выходе меньше мощности ДВС в среднем на 30 %, мощность заряда АКБ – 20 кВт. В конце периода заряда мощность на выходе меньше мощности ДВС в среднем на 5 %, мощность заряда АКБ – 5 кВт.

По графикам на рис. 4 видно, что в процессе бульдозирования большая часть времени цикла требует от ДВС и генератора мощность не более 120 кВт в разрядном режиме и 140 кВт – в зарядном. И только в конце цикла требуется мощность 180 кВт и больше (до 200 кВт) – мощности ДВС не хватает. В активную работу включается АКБ: отдает заряд на преодоление сопротивлений ведущих колес. В пиковых режимах АКБ выдает в сеть от 50 до 100 кВт мощности.

Рис. 4а – средняя мощность, снимаемая с ЯМЗ-536 в «разрядном» режиме, составляет 110 кВт, в «зарядном» режиме – 140 кВт. Рис. 4б – средняя мощность, снимаемая с ЯМЗ-536 в «разрядном» режиме, составляет 60 кВт, в «зарядном» режиме – 140 кВт. Существенное различие между рис. 4а и рис. 4б – в мощности ДВС: при большом заряде (90 МДж) АКБ средняя мощность, вырабатываемая ДВС, меньше, чем при 60 МДж – 110 и 60 кВт соответственно.

Энергия, вырабатываемая ДВС за полный часовой период работы, оценена интегрально и составляет 53 % от 172 кВт и равна 91 кВт.

Для оперативного сравнения ГСТ и ЭМТ на рис. 5 приведены графики мощности ДВС и на ведущих колесах трактора-бульдозера в том же бульдозерном цикле [20]. Бульдозерный цикл здесь повторяется многократно и абсолютно идентично: нет разветвления потока мощности как в ЭМТ: мощность ДВС всегда полностью потребляется ведущими колесами. В интегральной оценке нагрузка ЯМЗ-536 с ГСТ составляет 43 %, а с ЭМТ – 53 % от номинальной мощности в 172 кВт. Средняя мощность, снимаемая с ЯМЗ-536 с ГСТ – 76 кВт.

Таким образом, средняя мощность, снимаемая с ДВС с электромеханической трансмиссией, на 15 % больше, чем с гидростатической трансмиссией.

Периоды разряда и заряда АКБ существенно различны, поэтому оценка КПД трансмиссии трактора с ЭМТ проведена через соотношение энергий (работ) на ведущем колесе и на коленчатом валу ДВС на период разряда АКБ с 90 МДж до 60 МДж (15 мин) и заряда АКБ с 60 МДж до 90 МДж (50 мин). КПД составил 92 %. Для сравнения КПД ГСТ составляет 80 % [20].

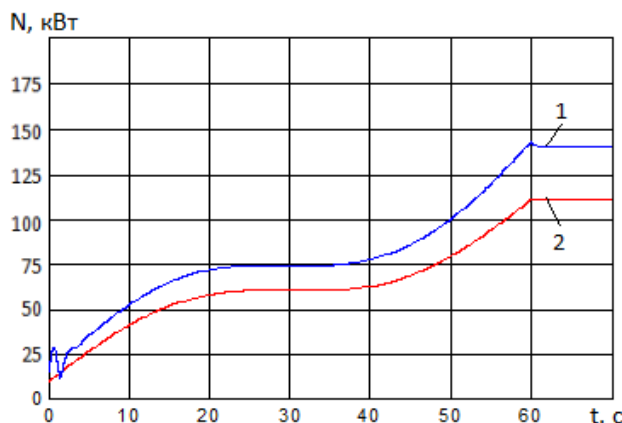


Рис. 5. Мощность ДВС (1) и на ведущих колесах (2) трактора с ГСТ
Fig. 5. Engine power (1) and power at the tractor's drive wheels (2) with a hydrostatic transmission

Проиллюстрируем **величины токов и напряжений в ЭМТ.**

На графиках рис. 6 и 7 приведены величины токов и напряжений в одном из циклов бульдозирования: на 60-й секунде ток генератора достигает 300 А, ток в каждом из тяговых ЭД – по 200 А. Недостающие для баланса 100 А обеспечиваются током АКБ. ЭДС генератора почти во всем цикле бульдозирования больше напряжения на ТЭД, за исключением пикового режима в конце бульдозерного цикла (50–60 с): здесь ЭДС АКБ становится больше ЭДС генератора и ТЭД и соответственно идет разряд АКБ по рис 6.

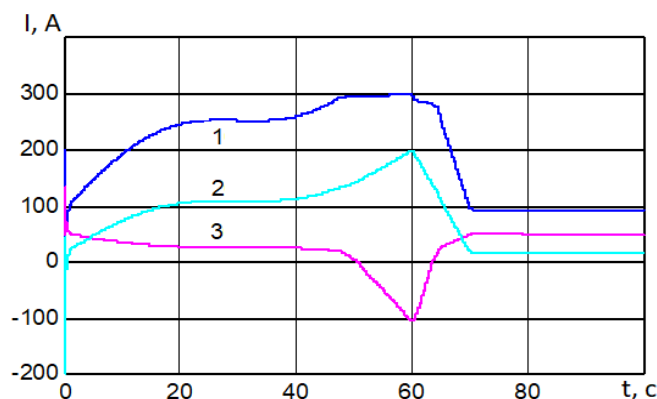


Рис. 6. Ток генератора (1), ток каждого ЭД (2), ток АКБ (3)
Fig. 6. Generator current (1), current of each electric motor (2), battery current (3)

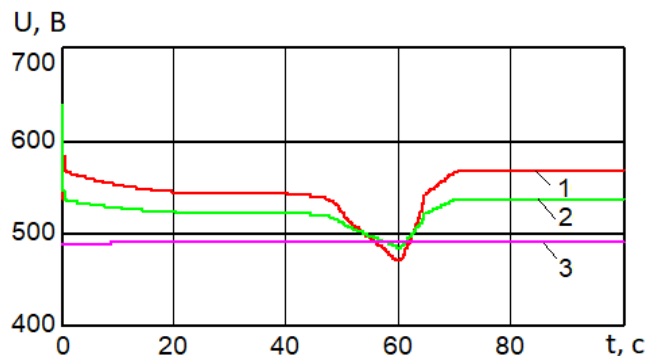


Рис. 7. ЭДС генератора (1), напряжение тяговых ЭД (2), напряжение АКБ (3)
Fig. 7. Generator EMF (1), traction electric motors voltage (2), battery voltage (3)

По полученным при моделировании данным КПД ЭТ превосходит ГСТ по меньшей мере на 15 %. А с учетом увеличения на 15 % загрузки ДВС мощность на ведущих колесах повышается относительно МТУ с ГСТ на 32 %. Соответственно, можно ожидать преимущество и по производительности.

Выводы

1. Разработанная математическая модель описывает работу трактора с электрической трансмиссией в бульдозерном цикле с подключением в пиковых режимах (при перегрузке ДВС) АКБ. Модель отличается от известных в литературе алгоритмом управления двумя потоками мощности с целью увеличения средней выходной мощности моторно-трансмиссионной установки.
2. АКБ позволяет разгружать ДВС в пиковых режимах до 50 кВт.
3. Средняя мощность процесса в 1,32 раза больше, чем на тракторе с ГСТ.
4. По сути, рассматриваемый трактор имеет гибридную силовую установку. В режиме преодоления пиков нагрузки работают два источника энергии – ДВС и АКБ. С другой стороны, АКБ заряжается от ДВС, и считать ее самостоятельным источником энергии неправильно.
5. Заряд АКБ идет независимо от технологического цикла в течение 50 мин, начиная от 60 МДж до 90 МДж, на этом этапе «зарядный режим» $\text{ipr} = 1,05$. Затем реле-регулятор переключается на «разрядный режим» $\text{ipr} = 1,24$ и постепенно, за 15 мин, заряд АКБ снижается с 90 МДж до 60 МДж.

Список литературы

1. Yu Q., Zhang H., Li Y., Wang J. A review on the powertrains and energy management strategies for electric tractors // The Innovation: Energy. 2024. Vol. 1. Article 100064. URL: <https://www.the-innovation.org/article/doi/10.59717/j.xinn-energy.2024.100064> (дата обращения: 12.01.2026).
2. Banday R. U. Z. et al. Current status, performance characteristics and future perspectives of electric tractors // Agricultural and Biological Engineering Research. 2024. Vol. 6, no. 4. P. 45–60. URL: <https://aber.apacsci.com/index.php/ama/article/view/3078> (дата обращения: 12.01.2026).
3. Basma H. et al. Battery electric tractor-trailers in the European Union. ICCT Working Paper 2021-XX. 2021. 64 p. URL: <https://theicct.org/sites/default/files/publications/eu-tractor-trailers-analysis-aug21.pdf> (дата обращения: 12.01.2026).
4. Götz K. et al. Unlocking the potential of electric and hybrid tractors via sensitivity and techno-economic analysis // Applied Energy. 2025. Vol. 380. Article 123456. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261924019287> (дата обращения: 12.01.2026).
5. Zhang Y. et al. Design of tractor hybrid electric powertrain and energy management strategy for improved fuel economy // Energy Reports. 2025. Vol. 11. P. 200–215. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772427125001986> (дата обращения: 12.01.2026).
6. John Deere. Sustainability Report 2020. 2020. 120 p. URL: <https://www.deere.com/assets/pdfs/common/our-company/sustainability/sustainability-report-2020.pdf> (дата обращения: 12.01.2026).
7. John Deere. Interest in electric tractors: Customers react to John Deere's new electric tractor prototype. 29.04.2025. URL: <https://www.deere.com/en/stories/featured/electric-tractor/> (дата обращения: 12.01.2026).
8. Исаков П.П., Иванченко П.Н., Егоров А.Д. Электромеханические трансмиссии гусеничных тракторов. М.: Машиностроение, 1981. 302 с.
9. Гинзбург Ю.В., Швед А.И., Парфенов А.П. Промышленные тракторы. М.: Машиностроение, 1986. 293 с.
10. Advances in battery technology, powertrain design, and control strategies for electric tractors // International Journal of Agricultural Engineering and Technology. 2025. Vol. 7, issue 10, part D. P. 210–218. URL: <https://www.agriculturaljournals.com/archives/2025/vol7issue10/PartD/7-10-36-350.pdf> (дата обращения: 12.01.2026).
11. Chen K., Luo J., Huang Y. Impact of low temperature exposure on lithium-ion batteries: A multi-scale study of performance degradation, predictive signals and underlying mechanisms // Chemical Engineering Journal. 2025. Vol. 503. Article 158260.
12. Самосейко В.Ф. Теоретические основы управления электроприводом: учебное пособие. СПб.: Элмор, 2007. 464 с.

13. Воронин С.Г., Курносов Д.А. Регулирование механических координат вентильного электропривода методом векторного управления // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2015. Вып. 15, № 3. С. 52–58. DOI: 10.14529/power150307
14. Глинкин С.А., Захаров А.В. Опыт конструирования и освоения производства опытно-промышленной партии вентильно-индукторных двигателей // Вестник ИГЭУ. 2015. Вып. 1. С. 1–7.
15. Овсянников Е.М., Клюкин П.Н. Стартер-генераторные устройства для двигателей внутреннего сгорания автомобилей // Материалы международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ». 2015. С. 135–138.
16. Стадухин А.А., Сарач Е.Б. Перспективы применения тягового электропривода на гусеничных машинах // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/977.html> (дата обращения: 12.01.2026).
17. Voronin S.G., Sogrin A.I., Shaburov P.O., Kuleva N.I. Comparative evaluation of actuating motors for traction electric drive of transport robots // Proceedings of the 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). 2018. Article no. 8570149. DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570149.
18. Холодов А.М. Основы динамики землеройно-транспортных машин. М.: Машиностроение, 1968. 156 с.
19. Кондаков С.В., Довжик В.Л., Злотник М.И. Влияние динамики нагружения на выбор параметров моторно-трансмиссионной установки промышленного трактора // Тракторы и сельхозмашины. 1988. № 1. С. 17–20.
20. Кондаков С.В., Ломакин Г.В., Павловская О.О. и др. Повышение эффективности промышленного трактора-бульдозера совершенствованием алгоритма управления моторно-трансмиссионной установкой. Результаты математического моделирования и полевых испытаний // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2024. Т. 24, № 1. С. 49–59. DOI: 10.14529/engin240105.

References

1. Yu Q., Zhang H., Li Y., Wang J. A Review on the Powertrains and Energy Management Strategies for Electric Tractors. *The Innovation: Energy*, 2024, vol. 1, article 100064. URL: <https://www.the-innovation.org/article/doi/10.59717/j.xinn-energy.2024.100064> (accessed 12 Jan. 2026).
2. Bandy R.U.Z. et al. Current Status, Performance Characteristics and Future Perspectives of Electric Tractors. *Agricultural and Biological Engineering Research*, 2024, vol. 6, no. 4, pp. 45–60. URL: <https://aber.apacsci.com/index.php/ama/article/view/3078> (accessed 12 Jan. 2026).
3. Basma H. et al. *Battery Electric Tractor-Trailers in the European Union*. ICCT Working Paper 2021-XX. 2021. 64 p. URL: <https://theicct.org/sites/default/files/publications/eu-tractor-trailers-analysis-aug21.pdf> (accessed 12 Jan. 2026).
4. Götz K. et al. Unlocking the Potential of Electric and Hybrid Tractors via Sensitivity and Techno-Economic Analysis. *Applied Energy*, 2025, vol. 380, article 123456. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261924019287> (accessed 12 Jan. 2026).
5. Zhang Y. et al. Design of Tractor Hybrid Electric Powertrain and Energy Management Strategy for Improved Fuel Economy // *Energy Reports*, 2025, vol. 11, pp. 200–215. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772427125001986> (accessed 12 Jan. 2026).
6. John Deere. *Sustainability Report 2020*. 2020. 120 p. URL: <https://www.deere.com/assets/pdfs/common/our-company/sustainability/sustainability-report-2020.pdf> (accessed 12 Jan. 2026).
7. John Deere. *Interest in Electric Tractors: Customers React to John Deere's New Electric Tractor Prototype*. 29 Apr. 2025. URL: <https://www.deere.com/en/stories/featured/electric-tractor/> (accessed 12 Jan. 2026).
8. Isakov P.P., Ivanchenko P.N., Egorov A.D. *Elektromekhanicheskie transmissii gusenichnykh traktorov* [Electromechanical transmissions of crawler tractors]. Moscow, 1981. 302 p.
9. Ginzburg Yu.V., Shved A.I., Parfenov A.P. *Promyshlennyye traktory* [Industrial tractors]. Moscow, 1986. 293 p.
10. Advances in Battery Technology, Powertrain Design, and Control Strategies for Electric Tractors. *International Journal of Agricultural Engineering and Technology*, 2025, vol. 7, issue 10, part D,

pp. 210–218. URL: <https://www.agriculturaljournals.com/archives/2025/vol7issue10/PartD/7-10-36-350.pdf> (accessed 12 Jan. 2026).

11. Chen K., Luo J., Huang Y. Impact of Low Temperature Exposure on Lithium-Ion Batteries: A Multi-Scale Study of Performance Degradation, Predictive Signals and Underlying Mechanisms. *Chemical Engineering Journal*, 2025, vol. 503, article 158260.

12. Samoseiko V.F. *Teoreticheskie osnovy upravleniya elektropriivodom: uchebnoe posobie* [Theoretical foundations of electric drive control: a textbook]. Saint Petersburg, 2007. 464 p.

13. Voronin S.G., Kurnosov D.A. Regulation of Mechanical Coordinates of the Switching Control Synchronous Motor by Method of Vector Control. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 52–58. (In Russ.) DOI: 10.14529/power150307

14. Glinkin S.A., Zakharov A.V. Experience in Designing and Mastering the Production of an Experimental-Industrial Batch of Switched Reluctance Motors. *Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University*, 2015, issue 1, pp. 1–7. (In Russ.)

15. Ovsyannikov E.M., Klyukin P.N. Starter-Generator Devices for Internal Combustion Engines of Automobiles. *Materials of the International Scientific and Technical Conference of AAI "Automotive and Tractor Engineering in Russia: Development Priorities and Personnel Training" Dedicated to the 145th Anniversary of MSTU "MAMI"*, 2015, pp. 135–138. (In Russ.)

16. Stadukhin A.A., Sarach E.B. Prospects for the Use of Traction Electric Drives on Tracked Machines. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, issue 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/977.html> (accessed 12 Jan. 2026). (In Russ.)

17. Voronin S.G., Sogrin A.I., Shaburov P.O., Kuleva N.I. Comparative Evaluation of Actuating Motors for Traction Electric Drive of Transport Robots. *Proceedings of the 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC)*, 2018, article no. 8570149. DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570149.

18. Kholodov A.M. *Osnovy dinamiki zemleroino-transportnykh mashin* [Fundamentals of the dynamics of earth-moving and transport machines]. Moscow, 1968. 156 p.

19. Kondakov S.V., Dovzhik V.L., Zlotnik M.I. Influence of Loading Dynamics on the Choice of Parameters of the Motor-Transmission Unit of an Industrial Tractor. *Tractors and Agricultural Machines*, 1988, no. 1, pp. 17–20. (In Russ.)

20. Kondakov S.V., Lomakin G.V., Pavlovskaya O.O. et al. Increasing the Efficiency of an Industrial Tractor-Bulldozer by Improving the Control Algorithm of the Motor-Transmission Unit: Results of Mathematical Modeling and Field Tests. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Mechanical Engineering"*, 2024, vol. 24, no. 1, pp. 49–59. DOI: 10.14529/engin240105. (In Russ.)

Информация об авторах

Кондаков Сергей Владимирович, д.т.н., профессор, профессор Передовой инженерной школы, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kondakovsv@susu.ru

Ломакин Георгий Викторович, к.т.н., доцент, доцент Передовой инженерной школы, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; lomakingv@susu.ru

Павловская Ольга Олеговна, к.т.н., доцент, доцент кафедры систем автоматического управления, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; pavlovskayaoo@susu.ru

Горелый Артём Евгеньевич, аспирант Передовой инженерной школы, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; gorelyj1409@gmail.com

Дмитрюк Максим Валерьевич, руководитель отдела сельскохозяйственной техники, завод «ДСТ-Урал», Челябинск, Россия; dmitryuk_mv@tm10.ru

Гаврилов Константин Владимирович, д.т.н., доцент, профессор Передовой инженерной школы, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; gavrilovkv@susu.ru

Рождественский Юрий Владимирович, д.т.н., профессор, профессор Политехнического института, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; rozhdestvenskiiyv@susu.ru

Гартлиб Екатерина Александровна, ведущий инженер, завод «ДСТ-Урал», Челябинск, Россия; gartlib_ea@tm10.ru

Information about the authors

Sergey V. Kondakov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Advanced Engineering School, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kondakovsv@susu.ru

Georgy V. Lomakin, candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Advanced Engineering School, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; lomakingv@susu.ru

Olga O. Pavlovskaya, candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Automatic Control Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; pavlovskayaoo@susu.ru

Artyom E. Gorely, graduate student of the Advanced Engineering School, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; gorelyj1409@gmail.com

Maxim V. Dmitryuk, Head of the Agricultural Machinery Department, DST-URAL plant, Chelyabinsk, Russia; dmitryuk_mv@tm10.ru

Konstantin V. Gavrilov, Doctor of Engineering, Associate Professor, Professor at the Advanced Engineering School, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; gavrilovkv@susu.ru

Yuri V. Rozhdestvensky, Doctor of Engineering, Professor, Professor at the Polytechnic Institute, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; rozhdestvenskiyv@susu.ru

Ekaterina A. Gartlib, Lead Engineer, DST-URAL plant, Chelyabinsk, Russia; gartlib_ea@tm10.ru

Статья поступила в редакцию 28.01.2026; принята к публикации 01.02.2026.

The article was submitted 28.01.2026; accepted for publication 01.02.2026.