

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-472138>

Оригинальное исследование



# Наблюдатель тягового электромагнитного момента на валу тягового электродвигателя

А.В. Климов<sup>1, 2</sup><sup>1</sup> Инновационный центр КАМАЗ, Москва, Российская Федерация;<sup>2</sup> Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** В настоящее время всё больше ужесточаются требования к энергоэффективности транспортных машин, что связано со снижением затрат на их эксплуатацию. Энергоэффективность особенно актуальна для них, т.к. самым прямым образом влияет на ключевое свойство — дальность хода. Поэтому необходимо управлять электрическими двигателями таким образом, чтобы обеспечивать максимальный коэффициент сцепления с опорным основанием, исключая проскальзывание движителя, а также организовать режимы работы агрегатов и переход от режима к режиму соответствующему максимуму КПД. В этом случае для эффективного управления необходимо оперативно определять электромагнитный момент на валу электродвигателя и момент сопротивления на колесе для генерации соответствующих управляющих и корректирующих воздействий.

**Цель работы** — разработка теоретических основ и закона оценки электромагнитного момента на валу тягового электродвигателя транспортных машин для эффективного управления тяговым электрическим приводом и его диагностики.

**Материалы и методы.** Моделирование наблюдателя электромагнитного момента на валу тягового электродвигателя выполнено в программном комплексе Matlab Simulink.

**Результаты.** В статье приводятся теоретические основы построения закона оптимальной оценки электромагнитного момента на валу тягового электродвигателя транспортных машин для эффективного управления тяговым электрическим приводом, его диагностики, а также результаты моделирования закона оценки электромагнитного момента на валу тягового электродвигателя в Matlab Simulink.

**Заключение.** Практическая ценность исследования заключается в возможности использования предложенного наблюдателя при разработке системы управления и диагностики тягового привода транспортных машин.

**Ключевые слова:** момент сопротивления; крутящий момент; наблюдатель; электродвигатель; электропривод; электромагнитный момент; система управления.

## Как цитировать:

Климов А.В. Наблюдатель тягового электромагнитного момента на валу тягового электродвигателя // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 5. С. 423–431. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-472138>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-472138>

Original Study Article

# The observer of traction electromagnetic torque at the shaft of a traction electric motor

Alexander V. Klimov<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> KAMAZ Innovation Center, Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup> Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Currently, the requirements to energy efficiency of transport vehicles are more and more tightened due to service cost reduction. Energy efficiency is the most relevant for them as it directly influences on the key feature — maximum mileage. Therefore it is necessary to control electric motors in a way to ensure maximal surface grip coefficient excluding propulsors' slipping, as well as to establish operation modes of motors and switching between the modes to the one having the maximal efficiency. In this case, for effective control, it is necessary to define electromagnetic torque at the shaft of an electric motor and resistance torque at wheels rapidly for generating corresponding control and correcting exposures.

**AIMS:** Development of the theoretical basis and the law of estimation the electromagnetic torque at the shaft of a traction electric motor of transport vehicles for the sake of efficient control of traction electric drive and its diagnostics.

**METHODS:** Simulation of the observer of the electromagnetic torque at the shaft of a traction electric motor was carried out in the MATLAB/Simulink software package.

**RESULTS:** The article provides with theoretical basis of formatting the law of optimal estimation of the electromagnetic torque at the shaft of a traction electric motor of transport vehicles for the sake of efficient control of traction electric drive, its diagnostics, as well as the results of simulation the law of estimation of the electromagnetic torque at the shaft of a traction electric motor obtained in the MATLAB/Simulink.

**CONCLUSIONS:** Practical value of the study lies in ability of using the proposed observer for development of control system and diagnostics of transport vehicles.

**Keywords:** resistance torque; torque; observer; electric motor; electric drive.

## To cite this article:

Klimov AV. The observer of traction electromagnetic torque at the shaft of a traction electric motor. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023;90(5):423–431.

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-472138>

Received: 04.06.2023

Accepted: 15.09.2023

Published online: 13.10.2023

## ВВЕДЕНИЕ

Всё шире в различных отраслях народного хозяйства эксплуатируются транспортные средства с тяговым электрическим приводом. Они также находят применение в сельском хозяйстве при выполнении основных, вспомогательных и транспортных работ. Особое место среди них занимают колёсные аккумуляторные транспортные средства. Для таких машин наиболее важной характеристикой является параметр запаса хода на одной подзарядке системы хранения электрической энергии, к которому всё более ужесточаются требования. Одна из основных задач для разработчиков состоит в поиске путей снижения потерь энергии и её более эффективном использовании. Значительные потери наблюдаются в тяговом электрическом приводе ведущих колёс. Повышение энергоэффективности возможно, как при применении агрегатов с более высоким КПД, так и при использовании оптимального управления ими, выбором наиболее энергоэффективных режимов функционирования. Первый метод не всегда можно реализовать, к тому же он является более ресурсозатратным и трудоёмким. Решение же задачи оптимального управления лишено таких недостатков и не увеличивает себестоимость конечного изделия. Для целей повышения энергоэффективности управления агрегатам необходимо с определенной точностью определять момент сил сопротивления при движении чтобы оперативно принимать мероприятия по оптимальному управлению крутящим моментом на валу электродвигателя. Также необходимо иметь достоверную оценку электромагнитного момента на валу тягового электродвигателя для определения рабочего режима и момент сопротивления на колесе, его эффективности и целей корректировки управляющих воздействий. Поэтому разработка метода оценки электромагнитного момента является весьма актуальной задачей при создании систем управления тяговым электроприводом в составе транспортного средства.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ НА КОЛЕСЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА НА ДВИГАТЕЛЕ

Для определения момента сопротивления вращению двигателя используем дифференциальное уравнение:

$$J\dot{\omega} = M_t - M_r, \tag{1}$$

где  $J$  — приведенный к валу тягового электродвигателя момент инерции вращающихся частей привода;

$\omega$  — угловая скорость вращения вала электродвигателя;  $M_t$  и  $M_r$  — тяговый электромагнитный момент и момент сопротивления на валу электродвигателя, соответственно.

Требуется построить линейную динамическую систему, обеспечивающую получение оптимальной оценки момента сопротивления и электромагнитного момента за счёт минимизации величины  $\Delta\omega = \hat{\omega} - \omega$ , где угловая скорость  $\omega$  определяется при решении уравнения (1), а  $\hat{\omega}$  — измеренное значение угловой скорости ротора электродвигателя с помощью датчика на валу ротора.

Тогда для разности  $\Delta\omega$  имеем

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{1}{J} M_r.$$

Таким образом, задача оценки внешнего воздействия сводится к известной задаче определения оптимального управления  $M_r$ , доставляющего нулевые значения фазовым координатам  $\Delta\omega$  и  $\frac{\Delta\omega}{\Delta t}$ .

Пусть  $x_1 = \hat{\phi} - \phi$ , где  $\phi$  — угол поворота ротора электродвигателя, получаемый при интегрировании уравнения (1);  $\hat{\phi}$  — измеренное значение угла поворота ротора электродвигателя с помощью датчика, установленного на валу ротора. Пусть  $x_2 = \dot{x}_1 = \Delta\omega = \hat{\omega} - \omega$ . Тогда уравнение запишем в виде:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = Bu' \end{cases} \tag{2}$$

где  $B = \frac{1}{J}$ ;  $u = M_r$ .

При синтезе оптимальных систем широко применяют квадратичные интегральные критерии качества, содержащие координаты объекта и управления [1, 2].

Исходная система уравнений состояния представляет собой линейную систему, описываемую следующим векторным линейным дифференциальным уравнением:

$$\frac{dX(t)}{dt} = A(t)X(t) + B(t)u(t), \tag{3}$$

где  $X(t)$  —  $n$ -мерный вектор состояния;  $A(t)$ ,  $B(t)$  — матричные функции времени соответственно порядков  $n \times n$ ;  $n \times m$ ;  $u(t)$  —  $m$ -мерный вектор управления.

Универсальным критерием качества является — основанный на введении оптимизируемого функционала интегрального типа. Использование интегральных критериев, в частности, квадратичных функционалов, позволяет определить требования к переходным процессам системы управления заданием значений небольшого числа их весовых коэффициентов, практически произвольный выбор которых обеспечивает фундаментальное свойство синтезируемой системы — ее асимптотическую

устойчивость [2], что позволяет использовать для синтеза системы управления сложными объектами результаты теории оптимального управления и теории аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР) [3]. Таким образом, для объектов управления (3) приходим к необходимости решения задачи АКОР по соответствующему интегральному критерию.

В настоящее время, в теории и практике оптимального управления широкое распространение получили интегральные квадратичные обобщенные функционалы качества систем автоматического управления вида [3]:

$$I = \int_{t_0}^{t_1} [U^T(t) \cdot r(t) \cdot u(t) + X^T(t) \cdot q(t) \cdot X(t)] \cdot dt, \quad (4)$$

где  $r(t) > 0$ ,  $q(t) > 0$  — весовые коэффициенты.

Значение функционала  $I$  зависит от начального состояния  $X(t_0)$ , момента времени  $t_0$  и управления  $u(t)$  в течение интервала  $(t_0, t_1)$ . Задача оптимального регулирования — минимизировать функционал (4).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРУТЯЩЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ВЕРХНЕГО УРОВНЯ

Как известно, главной координатой управления в тяговом электроприводе является крутящий момент  $M_t$ , т.к. прямой метод управления не применяется в связи с рядом технических сложностей [1]. Качество управления тяговым электроприводом напрямую связано с точностью оценки электромагнитного момента двигателя.

Применительно к электродвигателям одним из самых точных и быстродействующих методов оценки мгновенного электромагнитного момента является энергетический метод [2]. Достижение высокого уровня точности оценки возможно при выполнении ряда определенных условий [2–3]. Во-первых, прямое измерение мгновенной активной мощности и угловой скорости ротора должно быть обеспечено с точностью не хуже  $\pm 1\%$ , что достигается на современном уровне техники. Во-вторых, номинальный КПД должен быть в пределах 90...95%, что соответствует не менее чем 90% рабочих режимов движения транспортного средства. В-третьих, достижимая точность оценки номинальных потерь электрической мощности находится в пределах 10...15%, что делает возможным получить точность оценки мгновенного электромагнитного момента на уровне  $\pm 2,5...3,0\%$ , что является приемлемым.

В основу этого метода положено уравнение мгновенного баланса активной мощности электрических машин. Это уравнение для любой электрической машины в общем случае имеет вид:

$$P(t) = M_t(t)\omega(t) + P_{\text{сн}}(t), \quad (4)$$

где  $P(t)$  — потребляемая электрическая мощность;  $P_{\text{сн}}(t)$  — суммарные потери мощности;  $M_t(t)$  — механический крутящий момент на валу двигателя;  $\omega(t)$  — угловая скорость вала ротора электродвигателя.

$$M_t(t) = \frac{P(t) - P_{\text{сн}}(t)}{\omega(t)}. \quad (5)$$

Для оценки мощности  $P(t)$  необходимо знание массива фазных токов  $i_A, i_B, i_C$  и фазных напряжений  $U_{AN}, U_{BN}, U_{CN}$ . Значения фазных токов регистрируются в режиме реального времени датчиками тока автономного инвертора напряжения управляющего электродвигателем, применяемого для управления двигателем, а значения напряжений рассчитываются при управлении. В случае применения только 2 датчиков тока значение тока третьей фазы рассчитывает инвертор, так как из учёта симметрии трёхфазной системы электродвигателя с обмотками, соединёнными по схеме «звезда»

$$i_A + i_B + i_C = 0.$$

Учитывая взаимосвязь линейных и фазных величин значение линейных напряжений:

$$U_{AB} = U_{AN} - U_{BN}; \quad U_{BC} = U_{BN} - U_{CN};$$

$$U_{CA} = U_{CN} - U_{AN}.$$

Получим значение фазных напряжений

$$U_{AN} = \frac{U_{BC} + 2U_{AB}}{3}; \quad U_{BN} = \frac{U_{CA} + 2U_{BC}}{3};$$

$$U_{CN} = \frac{U_{AB} + 2U_{CA}}{3}.$$

Действующие значения напряжения и тока статора тягового электродвигателя определяются по формулам:

$$U(t) = \sqrt{U_{AN}^2(t) + U_{BN}^2(t) + U_{CN}^2(t)}, \quad (6)$$

$$I(t) = \sqrt{i_A^2(t) + i_B^2(t) + i_C^2(t)}. \quad (7)$$

И мгновенные амплитудные значения первых гармоник напряжений и токов:

$$U_m(t) = \sqrt{\frac{3}{2}}U(t); \quad I_m(t) = \sqrt{\frac{3}{2}}I(t).$$

Вычисляем потребляемую активную электрическую мощность  $P(t)$  по следующей зависимости:

$$P(t) = U_{AN}(t)i_A(t) + U_{BN}(t)i_B(t) + U_{CN}(t)i_C(t). \quad (8)$$

Мгновенный коэффициент мощности принимает вид

$$\cos \varphi(t) = \frac{P(t)}{U(t)I(t)}.$$

Далее вычисляем относительные величины фазных токов и напряжений:

$$\delta U_A(t) = \frac{U_{AN}(t)}{U_m(t)}; \delta U_B(t) = \frac{U_{BN}(t)}{U_m(t)}; \delta i_A(t) = \frac{i_A(t)}{I_m(t)}.$$

Тогда несложно определить

$$\sin \varphi(t) = \frac{\sqrt{3}[\delta U_A(t) \cos(\varphi) - \delta i_A(t)]}{2[\delta U_B(t) + 0,5\delta U_A(t)]}.$$

Мгновенные суммарные потери мощности  $P_{\text{сн}}(t)$  в виде реактивной мощности:

$$P_{\text{сн}}(t) = U(t)I(t) \sin \varphi(t). \quad (9)$$

Угловая скорость вала электродвигателя определяется либо с помощью датчика углового положения и скорости ротора, либо при отсутствии или выходе его из строя рассчитывается системой управления по данным линейной скорости  $v(t)$  транспортного средства

$$\omega(t) = \frac{v(t)U_{\text{тр}}}{0,377 \cdot 30 \cdot r_k},$$

где  $U_{\text{тр}}$  — передаточное число трансмиссии,  $r_k$  — радиус качения колеса.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ АВТОНОМНЫМ ИНВЕРТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ

В современных тяговых электроприводах аккумуляторных колёсных транспортных средств широко используются синхронные электрические машины переменного тока различных конструкций с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ).

Для таких электродвигателей оценка мгновенного электромагнитного момента  $M_t(t)$  имеет вид [5–9]:

$$M_t(t) = \frac{3}{2} p(\vec{I}_s \times \vec{\Psi}_s), \quad (10)$$

где  $p$  — число пар полюсов;  $\vec{\Psi}_s$  — вектор тока статора;  $\vec{I}_s$  — вектор потокоцепления статора.

При управлении СДПМ используется метод векторного управления, заключающийся в формировании вращающегося вектора напряжения в трёхфазной системе

координат при расчёте его с помощью 2 координатных преобразований во вращающуюся декартову систему координат с осями  $q$  (поперечная ось),  $d$  (продольная ось, совпадающая с направлением полюса ротора).

В проекции на оси  $d, q$  (рис. 1) формула (10) приобретает вид:

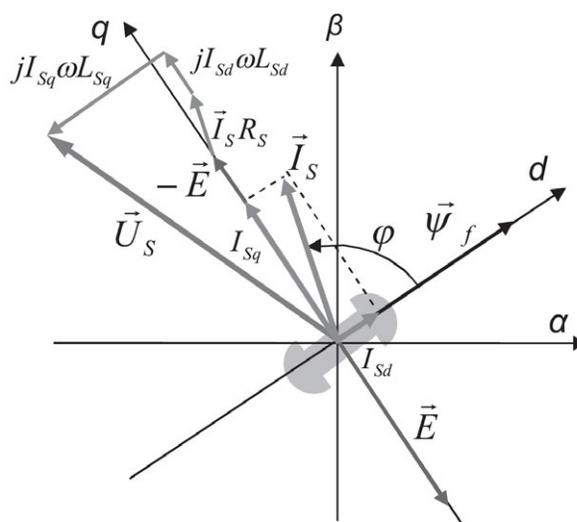
$$M_t(t) = \frac{3}{2} p(I_{sq}\Psi_d - I_{sd}\Psi_q), \quad (11)$$

где  $I_{sq}, I_{sd}$  — проекции вектора тока статора на оси  $d, q$  соответственно;  $\Psi_q, \Psi_d$  — проекции вектора потокоцепления статора на оси  $d, q$  соответственно.

В свою очередь

$$\Psi_d = L_{sd}I_{sd} + \Psi_f, \quad \Psi_q = L_{sq}I_{sq}, \quad (12)$$

где  $\Psi_f$  — потокоцепление, создаваемое постоянным магнитом.



**Рис. 1.** Векторная диаграмма электродвигателя:  $\alpha, \beta$  — неподвижная декартова система координат;  $d, q$  — вращающаяся система координат;  $\vec{I}_s$  — вектор тока статора;  $R_s$  — активное сопротивление статора;  $\vec{U}_s$  — вектор напряжения статора;  $\omega$  — угловая скорость вращения поля;  $\Psi_f$  — потокоцепление, создаваемое постоянным магнитом;  $\vec{E}$  — вектор электромагнитной индукции;  $I_{sq}, I_{sd}$  — проекции вектора тока статора на оси  $d, q$  соответственно;  $L_{sq}, L_{sd}$  — проекции вектора индуктивности статора на оси  $d, q$  соответственно;  $\varphi$  — угол между осью  $q$  и вектором  $\vec{I}_s$ ;  $j$  — мнимая единица.

**Fig. 1.** Vector diagram of an electric motor:  $\alpha, \beta$  — fixed Cartesian reference frame;  $d, q$  — rotating reference frame;  $\vec{I}_s$  — vector of stator's current;  $R_s$  — stator's active resistance;  $\vec{U}_s$  — vector of stator's voltage;  $\omega$  — rotation velocity of field;  $\Psi_f$  — flux linkage generated by a permanent magnet;  $\vec{E}$  — vector of electromagnetic induction;  $I_{sq}, I_{sd}$  — components of vector of stator's current at axes  $d, q$  respectively;  $L_{sq}, L_{sd}$  — components of vector of stator's inductance at axes  $d, q$  respectively;  $\varphi$  — angle between the axis  $q$  and the vector  $\vec{I}_s$ ;  $j$  — an imaginary unit.

Тогда

$$M_t(t) = \frac{3}{2} p [I_{sq} \psi_f - I_{sd} I_{sq} (L_{sd} - L_{sq})]. \quad (13)$$

Таким образом, для оценки мгновенного электрического момента  $M_t(t)$  для СДПМ необходимо проводить измерение силы тока в любых двух фазах из трех, например, измерять  $i_A(t)$  и  $i_B(t)$ . Тогда, используя обратное преобразование Парка [4], преобразуем измеренные токи сначала в неподвижную декартовую систему  $\alpha, \beta$  (рис. 1).

$$i_\alpha = i_A, \quad i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} i_A + \frac{2}{\sqrt{3}} i_B.$$

Далее с помощью прямого преобразования Парка получим искомые значения  $I_{sq}, I_{sd}$

$$I_{sd} = i_\beta \sin \varphi + i_\alpha \cos \varphi, \quad I_{sq} = i_\beta \cos \varphi + i_\alpha \sin \varphi.$$

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАБЛЮДАТЕЛЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Для проверки работоспособности приведенного алгоритма оценки мгновенного электрического момента  $M_t(t)$  для СДПМ было проведено моделирование движения аккумуляторного колёсного транспортного средства рис. 2, характеристики которого приведены в табл. 1. В качестве тягового был использован СДПМ, характеристики электродвигателя приведены в табл. 2.

Имитационное моделирование наблюдателя электромагнитного момента выполнено с применением программного продукта Matlab Simulink с использованием математической модели движения транспортного средства (рис. 3). В этом случае необходимо решить дифференциальное уравнение движения [10–11]. Блок тяговые

«Тяговые электродвигатели» оснащен функцией оценки электромагнитного момента (рис. 4), заключающейся в решении дифференциального уравнения (1), (5) и (13).

На рис. 5 представлены реализация мгновенного электрического момента  $M_t(t)$  для СДПМ и оценка этого момента по представленной методике. Мгновенный модельный момент рассчитан по формуле (5), оценка момента — по формуле (13).

## ВЫВОДЫ

1. Предложен новый алгоритм наблюдателя момента сопротивления на валу тягового электродвигателя, отличающийся тем, что задача оценки внешнего воздействия сводится к задаче определения оптимального управления в терминах возмущенного

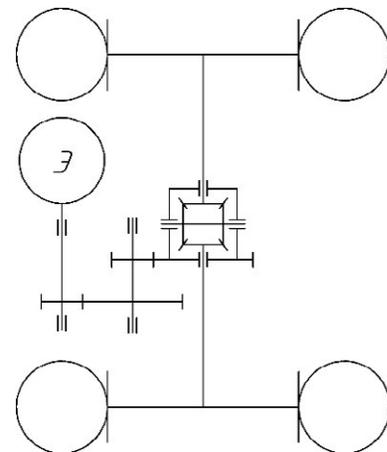
**Таблица 1.** Технические характеристики транспортного средства

**Table 1.** Main properties of the vehicle

Параметр	Значение
Колёсная формула	4x2
Полная масса автомобиля с разделением по осям/мостам:	8100
- на переднюю ось, кг	3100
- на задний мост, кг	5000
Габаритные размеры:	
Высота, м	2,40
Ширина, м	2,45
Колесная база автомобиля, м	4,475
Колея управляемой оси, м	1,710
Колея ведущего моста, м	1,650
Радиус качения шины, мм	215/75 R17,5



a



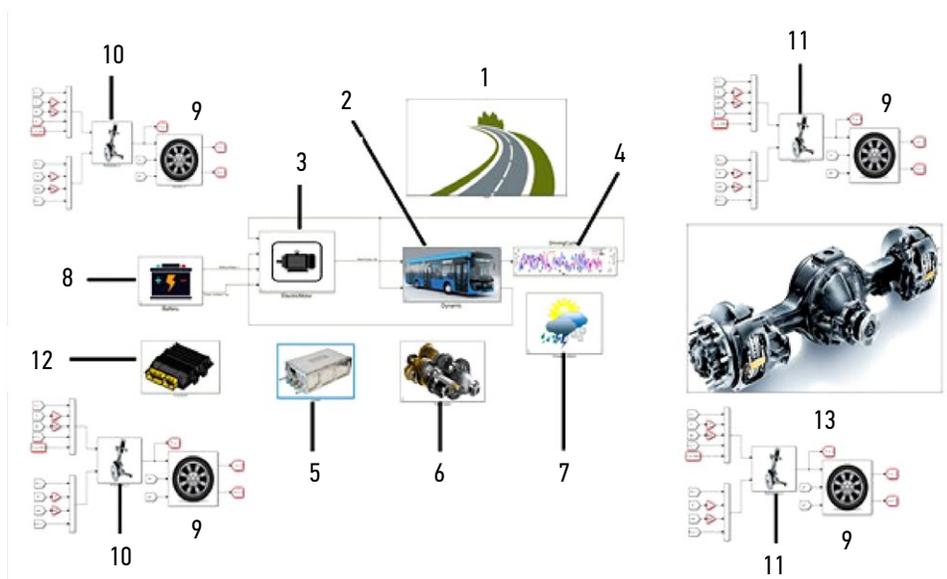
b

**Рис. 2.** Общий вид транспортного средства (a) и схема привода (b).  
**Fig. 2.** Main view of the vehicle (a) and drive train layout (b).

**Таблица 2.** Технические характеристики тягового синхронного электродвигателя

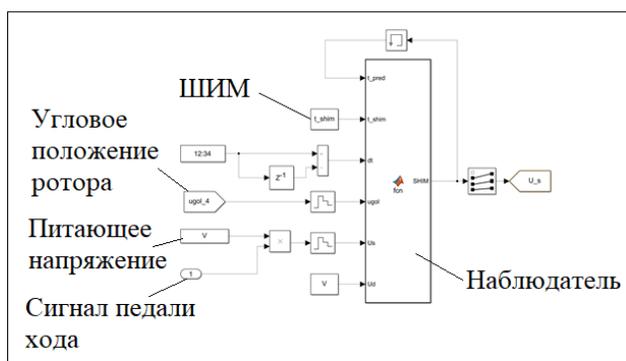
**Table 2.** Technical properties of a traction synchronous electric motor

Параметр	Значение
Номинальная мощность, кВт	70
Номинальный крутящий момент, Н·м	200
Номинальная частота вращения ротора, об/мин	3290
Максимальная частота вращения, об/мин	9000
Напряжение питания, В	520-750
Момент инерции ротора электродвигателя, кг·м <sup>2</sup>	0,09347
Индуктивность обмоток статора по продольной оси, Гн	$1,028 \cdot 10^{-3}$
Индуктивность обмоток статора по поперечной оси, Гн	$0,315 \cdot 10^{-3}$
Число пар полюсов	4
Потокосцепление, Вб	0,114
Активное сопротивление обмоток статора, при +20 °С, мОм	19,24



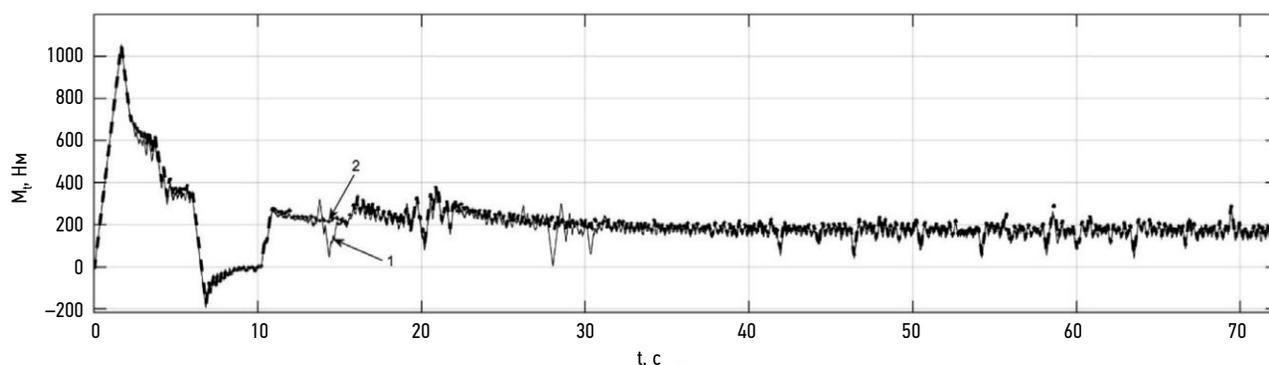
**Рис. 3.** Имитационная модель движения транспортного средства в Matlab Simulink. 1 — опорное основание; 2 — блок динамики движения; 3 — тяговые электродвигатели; 4 — цикл движения; 5 — тяговые инверторы; 6 — трансмиссия; 7 — климатические условия; 8 — система хранения электрической энергии; 9 — колесо; 10 — передняя подвеска; 11 — задняя подвеска; 12 — система управления; 13 — балка заднего моста.

**Fig. 3.** A simulation model of the vehicle motion in the MATLAB/Simulink. 1 — support base; 2 — motion dynamics unit; 3 — traction motors; 4 — driving cycle; 5 — traction inverters; 6 — transmission; 7 — climatic conditions; 8 — electric energy storage system; 9 — wheel; 10 — front suspension; 11 — rear suspension; 12 — control system; 13 — beam rear axle.



**Рис. 4.** Реализация наблюдателя электромагнитного момента в Matlab Simulink.

**Fig. 4.** Implementation of the observer of electromagnetic torque in MATLAB/Simulink.



**Рис. 5.** Реализация мгновенного электрического момента  $M_t(t)$  для СДПМ: 1 — модельное значение электрического момента; 2 — оценка электрического момента.

**Fig. 5.** Time-domain change of instant electromagnetic torque  $M_t(t)$  for a permanent magnet synchronous motor: 1 — the simulated value of electric torque; 2 — estimation of electric torque.

движения, доставляющего нулевые значения фазовым координатам, и позволяющий использовать количественную оценку внешних сопротивлений для алгоритмов адаптации систем управления тяговым электроприводом.

2. Анализ графиков, представленных на рис. 5, показал, что достигается высокая точность оценки электрического момента на валу тягового электродвигателя, что позволяет использовать разработанный метод оценки в системах управления тяговым электроприводом.
3. Разработанные модели наблюдателей силовых и кинематических параметров движения транспортных средств с тяговым электроприводом позволяют перейти к разработке комплексных алгоритмов управления тяговым электроприводом, обеспечивающих выполнение требований по тяговой динамике, энергоэффективности и безопасности движения транспортных средств.
4. Практическая ценность исследования заключается в возможности использования предложенных законов управления для разработки системы управления тяговым приводом транспортных машин, а также для их диагностики.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНО

**Вклад автора.** А.В. Климов — разработка теоретических основ для наблюдателя момента сопротивления, разработка закона оптимальной оценки момента сопротивления, имитационное математическое моделирование функционирования закона оптимальной оценки момента сопротивления, поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, редактирование текста рукописи, создание изображений. Автор подтверждает соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (автор внес существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования

и подготовку статьи, прочел и одобрил финальную версию перед публикацией).

**Конфликт интересов.** Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Разработка математической модели эксплуатации шасси (трансмиссии, ходовой части и механизмов управления) в статическом и динамическом состоянии и создание на ее основе цифрового двойника платформы легкового автомобиля» (шифр: FZRR-2023-0007)

## ADDITIONAL INFORMATION

**Author's contribution.** A.V. Klimov — development of theoretical foundations for the observer of the moment of resistance, development of the law of optimal estimation of the moment of resistance, simulation mathematical modeling of the functioning of the law of optimal estimation of the moment of resistance, search for publications on the topic of the article, writing the text of the manuscript, editing the text of the manuscript, creating images. The author made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agrees to be accountable for all aspects of the work.

**Competing interests.** The author declares that they have no competing interests.

**Funding source.** The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the project “Development of a mathematical model of chassis operation (transmission, chassis and control mechanisms) in static and dynamic states and creation of a digital twin of a passenger car platform on its basis” (code: FZRR-2023-0007).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрущенко В.А. Теория систем автоматического управления: Учебное пособие. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1990.
2. Алиев Ф.А., Ларин В.Б., Науменко К.И. и др. Оптимизация линейных инвариантных во времени систем управления. Киев: Наукова думка, 1978.
3. Иванов В.А., Фалдин Ф.В. Теория оптимальных систем автоматического управления. М.: Наука, 1981.
4. Келлер А., Сергеевский Ю.Н. Прямое измерение момента в электроприводе // Труды VIII международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Саранск, 07–09 октября 2014 г. Саранск, 2014. С. 58–62.
5. Smolin V., Topolskaya I., Gladyshev S. Energy Method for Torque Control of a Synchronous Traction Motor // SAE Technical. 2018. P. 2018-01-0766. doi: 10.4271/2018-01-0766
6. Smolin V.I., Topolskaya I.G., Volovich G.I. The energy method for monitoring the instantaneous state and the information of a synchronous motor control variables // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Chelyabinsk: IEEE, 2016. doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911509
7. Шульга Р.Н. К вопросу определения электромагнитного момента на валу тягового асинхронного двигателя // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2022. № 7.
8. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. М.: Изд. дом МЭИ, 2013.
9. Горелов В.В., Жилейкин М.М., Ловцов А.Н., и др. Закон управления с функцией систем активной безопасности для электромеханических трансмиссий многоосных колесных машин // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2013. № 9. С. 56–66.
10. Афанасьев Б.А., Белоусов Б.Н., Жеглов Л.Ф. и др. Проектирование полноприводных колесных машин: Учебник для вузов; В 3 т. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2008. Т. 3.
11. Литвинов А.С., Фаробин Я.Е. Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1989.

## REFERENCES

1. Andryushchenko VA. *Theory of automatic control systems: Textbook*. Leningrad: Izd-vo Leningradskogo universiteta; 1990. (in Russ).
2. Aliev FA, Larin VB, Naumenko KI, et al. *Optimization of linear time-invariant control systems*. Kyiv: Naukova dumka, 1978. (in Russ).
3. Ivanov VA, Faldin FV. *Theory of optimal automatic control systems*. Moscow: Nauka; 1981. (in Russ).
4. Keller A, Sergeevsky YuN. Direct measurement of torque in an electric drive. In: *Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) Conference on Automated Electric Drive AEP-2014. Saransk, October 07–09, 2014*. Saransk; 2014:58–62. (in Russ).
5. Smolin V, Topolskaya I, Gladyshev S. Energy Method for Torque Control of a Synchronous Traction Motor. *SAE Technical papers*. 2018:2018-01-0766. doi: 10.4271/2018-01-0766
6. Smolin VI, Topolskaya IG, Volovich GI. The energy method for monitoring the instantaneous state and the information of a synchronous motor control variables. In: *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Chelyabinsk: IEEE; 2016. doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911509
7. Shulga RN. On the issue of determining the electromagnetic torque on the shaft of a traction asynchronous motor. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*. 2022;7. (in Russ).
8. Anuchin AS. *Electric drive control systems: a textbook for universities*. Moscow: Izd dom MEI; 2013. (in Russ).
9. Gorelov VV, Zhileikin MM, Lovtsov AN, et al. Control law with the function of active safety systems for electromechanical transmissions of multi-axle wheeled vehicles. *Izvestiya VUZov. Mashinostroenie*. 2013;9:56–66. (in Russ).
10. Afanasyev BA, Belousov BN, Zheglov LF, et al. *Design of all-wheel drive wheeled vehicles: Textbook for universities; In 3 volumes*. Moscow: MGU im NE Baumana; 2008;3. (in Russ).
11. Litvinov AS, Farobin YaE. *Car: Theory of performance properties: a textbook for universities*. Moscow: Mashinostroenie; 1989. (in Russ).

## ОБ АВТОРЕ

### Климов Александр Владимирович,

канд. техн. наук,  
руководитель службы электрифицированных автомобилей, доцент Перспективной инженерной школы электротранспорта;  
адрес: Российская Федерация, 107023, Москва,  
ул. Большая Семёновская, д. 38;  
ORCID: 0000-0002-5351-3622;  
eLibrary SPIN: 7637-3104;  
e-mail: klimmanen@mail.ru

## AUTHOR'S INFO

### Alexander V. Klimov,

Cand. Sci. (Tech.),  
Head of the Electric Vehicles Service,  
Associate Professor at the Prospective Engineering School of Electric Transport;  
address: 38 Bolshaya Semenovskaya street, 107023 Moscow, Russian Federation;  
ORCID: 0000-0002-5351-3622;  
eLibrary SPIN: 7637-3104;  
e-mail: klimmanen@mail.ru