

УДК 621.33

Теоретическая система уровней построения движения транспортного средства наземного городского электрического транспорта

А. Э. Аухадеев

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия;
e-mail: auhadeev.ae@kgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7191-4550>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
07.10.2024;

получена
после доработки
13.11.2024;

принята
к публикации
20.11.2024

Ключевые слова:

городской электрический транспорт, теория построения движения, тяговое электрооборудование, алгоритмы эффективного управления, цифровизация транспортной отрасли

Для цитирования

Цифровизация транспортной отрасли и применение технологий искусственного интеллекта при автоматизации управления ее основных процессов определяет необходимость поиска новых подходов к описанию электротехнических комплексов и систем транспортного назначения, их внутренних и внешних системных свойств и связей. В работе система общественного наземного городского электрического транспорта (ГЭТ) рассмотрена как сложный процесс преобразования, передачи и использования электрической энергии и информации в электротехническом комплексе ГЭТ, проявляющийся в организации управляемого движения транспортных средств (ТС) в конкретных условиях производственных задач и технологии внутригородских пассажироперевозок. На основании синергетического описания свойств, принципов организации и функционирования сложной производственно-технической системы ГЭТ управляемое движение ТС представлено как многоуровневый технологический процесс, реализуемый электротехническим комплексом ГЭТ. Доказано, что основой данного процесса, формируемого 5 иерархически выстроенными уровнями (подпроцессами), каждый из которых обеспечивает отдельную специфическую задачу построения движения ТС, является реализация алгоритмов работы тягового электрооборудования ТС. В результате сформулирована теоретическая система уровней построения движения ТС как многоуровневого процесса, идентифицированы математические модели каждого уровня, определены множества условий, характеризующих "внешние" и "внутренние" "параметры порядка", определяющие структурно-функциональные и иерархические межуровневые взаимосвязи. Результаты работы могут представлять интерес для разработчиков систем управления автономных ТС и систем помощи водителю ТС при выборе и обосновании алгоритмов эффективного управления электротехническим комплексом тягового электрооборудования ГЭТ.

Аухадеев А. Э. Теоретическая система уровней построения движения транспортного средства наземного городского электрического транспорта. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 4. С. 577–590. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-577-590>.

Theoretical system of levels of constructing vehicle movement of ground urban electric transport vehicle

Aver E. Aukhadeev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia;
e-mail: auhadeev.ae@kgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7191-4550>

Article info

Received
07.10.2024;

received
in revised form
13.11.2024;

accepted
20.11.2024

Key words:

urban electric transport, theory of motion construction, traction electrical equipment, algorithms of effective control, digitalization of transport industry

For citation

Abstract

Digitalization of the transport industry and the use of artificial intelligence technologies in the automation of control of its main processes determine the need to search for new approaches to the description of electrical complexes and systems of transport purpose, their internal and external system properties. The public ground urban electric transport system is considered as a complex process of conversion, transmission and use of electrical energy and information in the electrical complex of urban electric transport, manifested in the organization of controlled movement of vehicles in specific conditions of production tasks and technology of passenger transportation. Based on the synergetic description of the properties, principles of organization and functioning of a complex production and technical system of urban electric transport, the controlled movement of vehicles has been presented as a multilevel technological process implemented by the electrical complex of urban electric transport. It has been proved that the basis of this process, formed by 5 hierarchically arranged levels, each of which provides a separate specific task of building the movement of vehicles, is the implementation of algorithms of traction electrical equipment. A theoretical system of levels of vehicle motion construction as a multilevel process has been formulated, mathematical models of each level have been identified, and sets of conditions characterizing "external" and "internal" "order parameters" defining hierarchical interlevel interrelations have been determined. The results of the work may be of interest to the developers of control systems of autonomous vehicles and driver assistance systems during the selection and justification of algorithms for the effective control of the electrical complex of traction electrical equipment of urban electric transport.

Aukhadeev, A. E. 2024. Theoretical system of levels of constructing vehicle movement of ground urban electric transport vehicle. *Vestnik of MSTU*, 27(4), pp. 577–590. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-577-590>.

Введение

На протяжении нескольких последних лет Правительство РФ реализует инициативы, направленные на развитие городского электрического транспорта, что соответствует мировым тенденциям "возрождения" систем общественного транспорта на основе электрической тяги. Одной из наиболее значимых, предполагающей выделение на модернизацию городского электрического транспорта (ГЭТ) более 230 млрд руб., является совместная с Министерством транспорта программа Комплексного развития ГЭТ, реализуемая с 2023 г. в рамках федерального проекта "Развитие общественного транспорта" национального проекта "Безопасные качественные дороги". Основными задачами программы являются строительство и реконструкция около 700 км трамвайных путей, 97 тяговых подстанций и 11 депо, укомплектование парков предприятий ГЭТ более 600 трамваями и 300 электробусами, установка не менее 90 станций зарядки и др. (Морозов, 2022). Активная поддержка транспортной отрасли направлена, в первую очередь, на стимулирование российского производителя, что обеспечит снижение импорта готовых технических решений и предотвращение отставания технологического уровня отечественного производства от зарубежных аналогов (Шишкарёв, 2011).

Необходимо отметить, что в рамках программы Комплексного развития ГЭТ планируется реализация проекта по созданию цифровой платформы по управлению общественным транспортом, которая позволит контролировать весь процесс пассажироперевозок, осуществлять диспетчерское управление, планировать маршруты и др. Данный проект соответствует целям стратегического направления в области цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации до 2030 г., в которых особое внимание уделяется цифровизации пассажирских перевозок и цифровизации управления транспортным комплексом с применением технологий искусственного интеллекта (ИИ) (Чеченова, 2021; Pisareva et al., 2021). Также решаются задачи цифровизации транспортных средств (ТС), для решения которых активно ведутся разработки, связанные с беспилотным общественным электротранспортом (Гузъ и др., 2023; Пролиско и др., 2018). Все это определяет востребованность новых научных исследований фундаментального и прикладного характера в области производства новых типов ТС и тягового электрооборудования (ТЭО), перспективных систем управления и др. с применением технологий искусственного интеллекта (ИИ) (Romanova et al., 2020; Рябченко и др., 2022).

В настоящее время общая теория и методы расчета электротехнических комплексов и систем транспортного назначения позволяют решать широкий круг задач в различных отраслях проектирования и эксплуатации ТС ГЭТ. Возрастающая актуальность исследований и разработок в области систем автоведения, помощи водителю, беспилотного управления ТС и др. с применением технологий ИИ определяет необходимость изменения существующих подходов к выбору и обоснованию режимов работы и параметров алгоритмов эффективного управления электротехническим комплексом ТЭО ТС.

Целью научного исследования является развитие теоретических основ повышения эффективности режимов работы и алгоритмов управления ТЭО ТС за счет совершенствования представлений о принципах формирования управляемого движения ТС, являющегося результатом преобразования, передачи и использовании электрической энергии и информации в электротехническом комплексе ГЭТ. В данном случае управляемое движение ТС рассматривается как реализация работы последовательности режимов ТЭО, заданных водителем в соответствии с технологией эксплуатации и задачами производственного процесса ГЭТ. Научная новизна исследования заключается в рассмотрении ГЭТ как сложной производственно-технической системы и применении системно-синергетического подхода для описания принципов ее организации и функционирования (Аухадеев и др., 2019а; Аухадеев et al., 2019а).

Для достижения цели исследования был проведен анализ структурно-функциональных связей и свойств электротехнического комплекса ГЭТ, определяющего реализацию технологического процесса производственно-технической системы ГЭТ; обосновано применение концепции "уровней построения движения", реализующей принципы организации работы мозга человека, на основании которой разработана теоретическая система уровней построения движения ТС ГЭТ; разработаны математические модели для каждого уровня построения движения, а также определены параметры и ограничения, характеризующие их "внешние" и "внутренние" системные свойства и взаимосвязи.

Теоретические основы

В зависимости от решаемых научных и практических задач исследователи относят систему ГЭТ к разным видам и их сочетаниям: к технической, производственной, организационной, экономической, эргатической, социально-технической, производственно-экономической и др. (Якимов, 2008; Михальченко и др., 2017). Интерпретация системы ГЭТ с позиций современной синергетической методологии, основы которой разработал и сформулировал как новую научную парадигму немецкий математик Герман Хакен (он же ввел и термин "синергетика" (Хакен, 1980)), послужит решению актуальной проблемы получения адекватной модели ГЭТ как сложноорганизованной системы (Kashapov et al., 2019; Аухадеев, 2014).

В отечественной научной литературе уже делаются попытки описать транспортные системы в терминах открытых сложноорганизованных систем и синергетики, а также определить сферу проблем теоретического и практического характера, которые можно при этом решать (Вельможин и др., 2011; Сечкарев, 2011). Вместе с тем опыта подобного рассмотрения системы ГЭТ в ходе исследования выявлено не было.

Методологическая значимость представления ГЭТ как открытой сложноорганизованной системы заключается в том, что основные процессы функционирования такой системы требуют пересмотра подходов к их описанию с позиций достижения современной науки. В частности, необходимо учесть синергетическое взаимодействие внутри системы ГЭТ с внешней средой, проявляющееся в специфических свойствах и воздействии на процесс формирования и реализации управляемого движения ТС множества случайных факторов, определяющих в конечном итоге параметры режимов работы ТЭО.

Все вышесказанное определяет необходимость развития методологических представлений о процессе преобразования, передачи и использовании электрической энергии и информации в электротехническом комплексе ГЭТ в управляемое движение ТС, реализуемое в соответствии с технологией эксплуатации и задачами производственного процесса ГЭТ.

Методы исследования

Функционирование электротехнического комплекса ГЭТ в конкретных условиях транспортной работы и технологии перевозок в системе ГЭТ является сложным процессом, выражающимся в управляемом движении ТС и зависящего от множества параметров (тип ТЭО, условия движения, мастерство водителя, расписание движения и др.). Исследование особенностей построения данного технологического процесса, анализ его системных свойств и связей позволит развить общую теорию электротехнических комплексов и систем транспортного назначения в целом и методы выбора и обоснования алгоритмов эффективного управления ТЭО в частности (Aykhadeev et al., 2019b).

Процесс формирования управляемого движения ТС как результата функционирования электротехнического комплекса ГЭТ можно условно разделить на составляющие: "электротехническую" и "механическую". "Электротехническая" составляющая процесса связана с получением, распределением, преобразованием и использованием электрической энергии и электротехнической информации в электротехническом комплексе ГЭТ, следовательно, определяется структурой этого комплекса и применяемой системой электрической тяги. Будем условно называть его "электротехнический процесс".

Имеется возможность иерархически выделить 5 подпроцессов, определяющих уровни организации электротехнического комплекса ГЭТ (рис. 1, а) в части системы тягового электроснабжения (Сонов, 2013), а именно:

- 1) *уровень тягового электрооборудования* ($Y_{ТЭО}$) – включает тяговый электродвигатель (ТЭД) или группу взаимосвязанных (электрически и механически) ТЭД, являющихся основным электроприемником, преобразующим электрическую энергию в механическую энергию движения ТС;
- 2) *уровень секции контактной сети* ($Y_{КС}$) – определяет процессы распределения (связанные с ним потери и др.) электрической энергии от стационарной тяговой подстанции (ТП) до движущегося ТС ГЭТ и решает важную задачу обеспечения стабильного токосяема при любых условиях эксплуатации;
- 3) *уровень РУ постоянного тока* ($Y_{ПТ}$) – устанавливает процессы распределения электроэнергии и взаимодействия ТС через КС, находящиеся в одной подстанционной зоне;
- 4) *уровень РУ переменного тока среднего напряжения* ($Y_{СН}$) – формирует процессы преобразования электроэнергии;
- 5) *уровень РУ высокого напряжения* ($Y_{ВН}$) – указывает процессы распределения электроэнергии и взаимодействия с внешней энергосистемой.

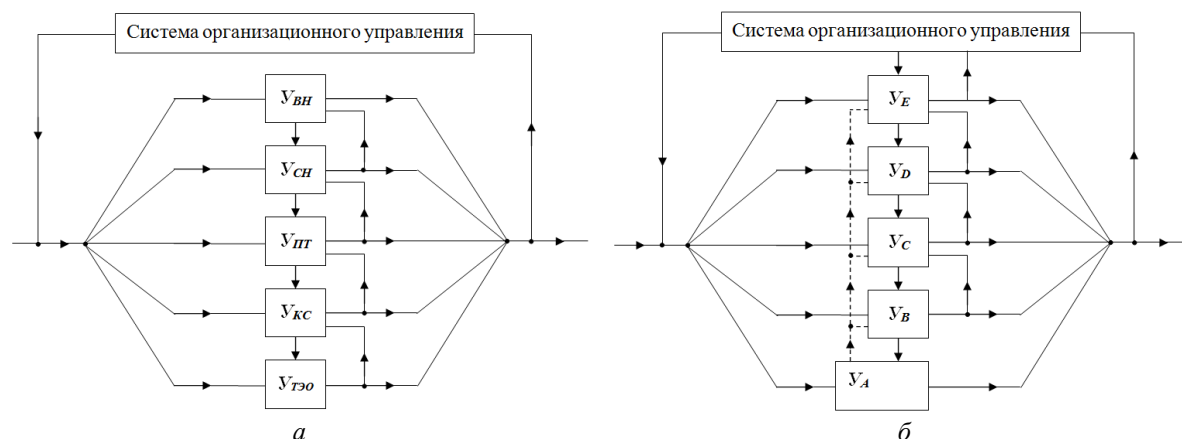


Рис. 1. Структуры процессов электротехнического комплекса ГЭТ:
а – электротехнического; б – механического

Fig. 1. Structures of processes of the electrical engineering complex of urban electric transport:
а – electrical; б – mechanical

Анализ подпроцессов, реализуемых на каждом уровне показывает, что все они происходят параллельно, но каждый уровень решает свою специфическую задачу. При этом наблюдается строгая иерархия, при которой результаты выполнения подпроцесса на более высоком иерархическом уровне являются условиями для выполнения подпроцесса на более низком при условии их непрерывного взаимодействия и подчинения условиям задачи общего "электротехнического процесса". Подпроцесс вышестоящего уровня невозможен без реализации подпроцесса на нижестоящем, так как фактически включает его в себя, при этом решая иную задачу (рис 1, а). Иерархия процессов, вступая во взаимосвязи, формируют систему "электротехнического процесса", подчиняясь, в общем случае, системе организационного управления транспортного производства (рис. 1, а), формирующей контроль и управление в рамках общих производственных задач ГЭТ, таких как обеспечение эффективного использования электроэнергии, экологической совместимости с окружающей средой, бесперебойное энергоснабжение и др.

"Механическая составляющая" технологического процесса, реализуемого электротехническим комплексом ГЭТ, связана с формированием механического движения ТС в условиях маршрутной сети, технологией транспортной работы и заданного пассажиропотока при взаимодействии с окружающей средой (план и профиль пути, дорожная обстановка, климатические и погодные условия и др.). Будем условно называть этот комплекс "механическим процессом". При этом под понятием "реализация механического движения ТС" следует понимать процесс создания электрической тяги, ее управление и регулирование посредством задания водителем алгоритмов управления работой ТЭО в соответствии с технологией эксплуатации и задачами производственного процесса ГЭТ, что приводит к управляемому механическому перемещению ТС (Аухадеев и др., 2019б).

Согласно представленной обобщенной структурной схеме (рис. 2) можно выделить три основных вида ТС, использующие ТЭО и различающиеся по способу получения электроэнергии: 1 – контактный рельсовый и безрельсовый транспорт (трамвай, троллейбус); 2 – безрельсовый транспорт с полностью (электробусы) или частичным автономным ходом с бортовым накопителем электроэнергии (химический аккумулятор, суперконденсатор и др.); 3 – безрельсовый транспорт с бортовым источником электроэнергии (на основе теплового двигателя, топливных элементах и др.), требующий заправки энергоносителем.

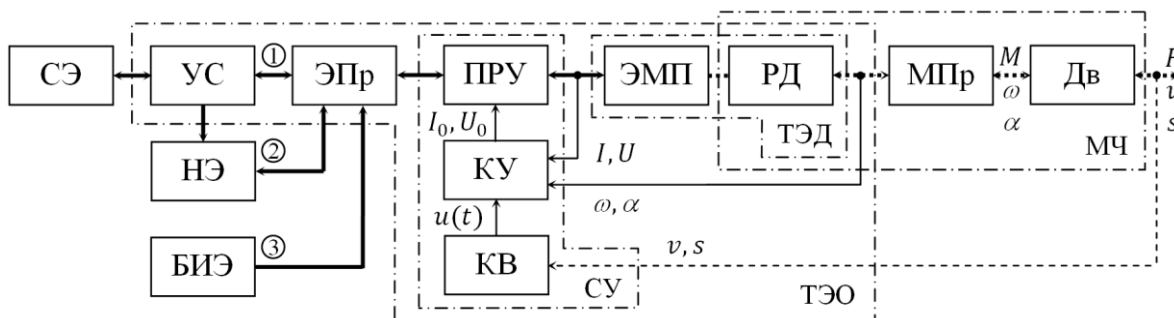


Рис. 2. Обобщенная структурная схема электротехнического комплекса ТЭО ТС:

СЭ – система электроснабжения; УС – устройство сопряжения; НЭ – накопитель электроэнергии; БИЭ – бортовой источник энергии; ЭПр – электрический преобразователь; ПРУ – пускорегулирующее устройство; ТЭД – тяговый электрический двигатель; ЭМП – электромеханический преобразователь; РД – ротор ТЭД; МПр – механический преобразователь; Дв – движитель (колеса, колесные пары и др.); КУ – контроллер управления; КВ – контроллер водителя; СУ – система управления; МЧ – механическая часть ТС

Fig. 2. Generalized structural diagram of the electrical engineering complex of vehicle traction electrical equipment: СЭ – power supply system; УС – interfacing device; НЭ – electric energy storage;

БИЭ – on-board energy source; ЭПр – electric converter; ПРУ – starting regulating device; ТЭД – traction electric motor; ЭМП – electromechanical converter; РД – rotor of traction electric motor; МПр – mechanical converter; Дв – propulsor (wheels, wheel pairs, etc.); КУ – operator's controller; КВ – driver controller; СУ – control system; МЧ – mechanical part of the vehicle

Основным элементом электротехнического комплекса ТЭО является ТЭД, представленный на схеме (рис. 2) двумя элементами: электромеханическим преобразователем энергии ЭМП и ротором тягового электродвигателя РД, на который воздействует момент двигателя M при угловой скорости ω . ТЭД в общем случае определяет вид статических и динамических характеристик ТС. Ротор РД механически жестко связан с движителем Дв (пневматическое колесо, колесная пара и т. д.) посредством механической передачи МПр. Основной задачей движителя Дв является обеспечение преобразования механической энергии РД через взаимодействие со средой в полезную работу по перемещению ТС ГЭТ.

Контроллер КУ осуществляет управление с целью обеспечения заданного режима работы ТЭО. В зависимости от типа ТЭД по каналам обратной связи на вход КУ поступают сигналы, характеризующие текущий режим работы ТЭО (значения токов I , напряжений U , магнитного потока Φ , угловой скорости ω и угла поворота α ротора и др.). На выходе КУ формируются управляющие алгоритмы работы ПРУ, обеспечивающие реализацию требуемого режима работы ТЭД. Данные алгоритмы работы формируются на этапе проектирования ТЭО для определенного типа ТС под конкретные условия эксплуатации. Водитель на основании анализа получаемой обратной связи по скорости v и положению s ТС с помощью изменения положения ручки (трамвай) или педали (троллейбус) контроллера водителя КВ задает продолжительность и последовательность данных алгоритмов управляющим воздействием $u(t)$.

Управление угловой скоростью ω ротора РД обеспечивается посредством регулирования момента M согласно уравнению движения электропривода

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \quad \frac{d\alpha}{dt} = \omega, \quad (1)$$

где $J_{\Sigma} = J_{РД} + J_{МПр} + J_{Дв} + J_{ТС}$ – суммарный момент инерции; $J_{РД}$, $J_{МПр}$, $J_{Дв}$, $J_{ТС}$ – момент инерции ротора РД, механической передачи МПр, двигателя Дв и момент инерции, определяемый массой ТС соответственно; M_c – статический момент, определяемый моментом сопротивления, в том числе и от внешней силы сопротивления движению ТС W ; α – угол поворота ротора.

Регулируемый момент ТЭД M при угловой скорости ω формирует управляемую силу F_k при движении ТС с линейной скоростью v , которые определяются следующим образом:

$$F_k = \frac{2 \cdot \mu}{D_k} M \eta_{мп}, \quad v = \frac{1,8 \cdot D_k}{\mu} \omega, \quad (2)$$

где μ – передаточное число механической передачи; $\eta_{мп}$ – к.п.д. механической передачи; D_k – диаметр движущих колес.

С учетом этого выражение (1) может быть преобразовано в уравнение движения ТС соответственно в "первой форме" и во "второй форме" (Бирюков и др., 2022):

$$\frac{(1+\gamma)}{\xi} m \frac{dv}{dt} = F - W, \quad (3)$$

$$\frac{(1+\gamma)}{\xi'} m v \frac{dv}{ds} = F - W, \quad (4)$$

где m – фактическая масса ТС; $(1 + \gamma)$ – коэффициент инерции вращающихся частей; s – координата пути ТС; ξ , ξ' – переводные коэффициенты.

Выражения (3) и (4) определяют зависимости $v(t)$ и $v(s)$, называемые "кривые движения" ТС (рис. 3) и описывающие режимы движения транспортного средства ГЭТ: тяговый режим ($0; s_p$], режим выбега ($s_p; s_T$] и режим торможения ($s_T; S$]).

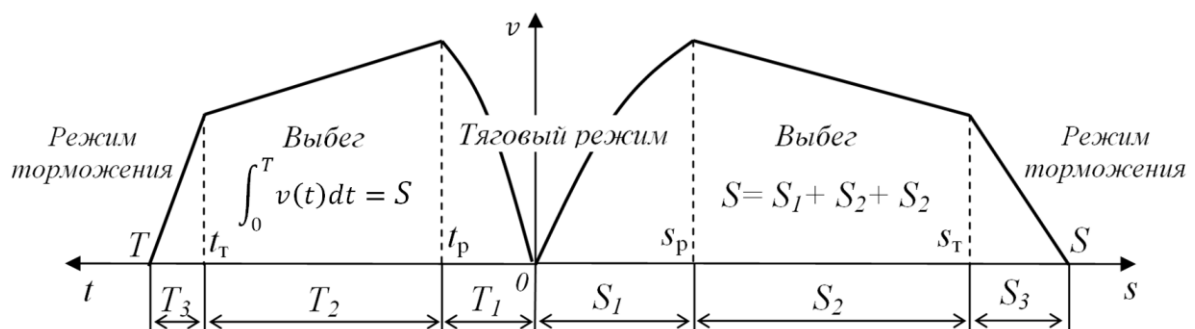


Рис. 3. "Кривые движения" $v(t)$ и $v(s)$ во взаимосвязи:

$S_1, S_2, S_3, T_1, T_2, T_3$ – протяженность и продолжительность участков разгона, выбега и торможения соответственно; t_p – время разгона; t_T – время начала торможения; s_p – координата окончания участка разгона; s_T – координата начала участка торможения; T – время хода на перегоне; S – длина перегона

Fig. 3. "Motion curves" $v(t)$ and $v(s)$ in interrelation:

$S_1, S_2, S_3, T_1, T_2, T_3$ – length and duration of acceleration; coasting and braking sections respectively; t_p – acceleration time; t_T – braking start time; s_p – coordinate of acceleration section end; s_T – coordinate of braking section start; T – distance travel time; S – distance length

Согласно ГОСТ 19350 "Электрооборудование электрического подвижного состава. Термины и определения"¹ выделяют следующие режимы работы ТЭО, соответствующие режимам движения ТС: тяговый режим (0; t_p] – при различных уровнях возбуждения и режим торможения (t_r ; T] – с разными видами типов торможения и уровня возбуждения. Этим режимам соответствуют характерные режимы работы ТЭД, определяемые в общем случае выражением (1).

Водитель ТС посредством контроллера водителя КВ (рис. 2) задает структуру и параметры (последовательность и продолжительность режимов, определяемых t_p , t_r и T) алгоритма управления электротехническим комплексом ТЭО, таким образом формируя определенные реализации движения ТС на заданном участке пути (рис. 3). Выбор водителя, предопределенный его опытом и квалификацией, формируется под влиянием множества эксплуатационных факторов, в том числе и случайных, характеризующих реальные дорожные условия и технологию перевозочного процесса.

Очевидно, что "механический процесс" реализации движения ТС по аналогии с "электротехническим процессом" также является сложной многоуровневой системой технологического процесса, реализуемого электротехническим комплексом ГЭТ. Следовательно, процесс управляемого движения ТС ГЭТ может быть в общем случае представлен совокупностью подпроцессов, реализуемых на иерархически выстроенных уровнях общего "механического процесса". Для описания таких уровней воспользуемся концепцией "уровней построения движения", используемой академиком Д. Е. Охочимским в работах по динамике космического полета, робототехнике и мехатронике (Платонов, 2010). Данная концепция реализует принципы организации работы мозга человека при выполнении спортивных, трудовых и других движений, которые были изучены и сформулированы выдающимся советским биомехаником Н. А. Бернштейном в его научном труде "О построении движений" (Бернштейн, 1947).

Такой подход при изучении управляемого движения ТС ГЭТ соответствует современным тенденциям заимствования биологических аналогий при исследовании работы сложных технических систем. Следует отметить, что прототипом искусственных нейронных сетей, активно применяющихся во многих технологиях ИИ и утвержденных для транспортной отрасли, являются именно биологические нейронные сети человеческого мозга (Малахов и др., 2021; Сивицкий, 2021).

Согласно выбранной концепции реализация управляемого движения объектов или систем происходит в общем случае по 5 уровням ("А", "В", "С", "D", "Е"), которые называются уровни построения движения. Описание принципов построения движения на каждом уровне и интерпретация в данном контексте уровней построения "механического процесса", его иерархическое выстраивание, параллельность и взаимосвязь при реализации на каждом уровне ($У_A$, $У_B$, $У_C$, $У_D$, $У_E$), а также подчиненность системе "организационного управления" транспортного производства (рис. 1, б), формирующей контроль и управление в рамках общих стратегических задач ГЭТ, подробно представлены в серии работ автора (Аухадеев et al., 2019b; Аухадеев, 2014; Аухадеев и др., 2019a).

Результаты и обсуждение

Процесс функционирования электротехнического комплекса ГЭТ невозможно однозначно разделить на "механическую" и "электротехническую" составляющие, но схожесть их структур и механизмов работы позволили сформулировать теоретическую систему уровней построения движения ТС ГЭТ, включающей 5 уровней $У_1 - У_5$ (рис. 4).

Уровни выстраиваются в соответствии с иерархией конкретных специфических задач, решаемых параллельно. Процесс каждого уровня непрерывно формируется вышестоящим уровнем и подчиняется условиям задачи общего процесса ("параметрам порядка"). Основным условием реализации управляемого движения транспортного средства ГЭТ является обмен энергетическими R_E (тепловая, электрическая и др. энергия), материальными R_M (в т. ч. финансовыми и кадровыми) и информационными R_I (инструкции, нормы и др.) ресурсами между уровнями и внешней средой.

1. *Уровень формирования ресурсного обеспечения ($У_1$).* Первый уровень является определяющим для всех остальных уровней, так как обеспечивает возможность (посредством ресурсного обеспечения) реализации процесса функционирования всего электротехнического комплекса ГЭТ. Ресурсное обеспечение в общем случае определяется методами и средствами приема, преобразования и распределения энергии электротехническим комплексом ГЭТ, его технологическим уровнем, наличием резерва по мощности, материальным и техническим обеспечением, а также квалификацией обслуживающего персонала. На данном уровне не происходит непосредственного процесса движения ТС, а формируется его готовность путем

¹ ГОСТ 19350. Электрооборудование электрического подвижного состава. Термины и определения. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/36531/?ysclid=m40y9n53bb978564400>.

стабильного и надежного энергетического (R_E) и технического (R_M) обеспечения с заданными показателями (R_I), реализуемого электротехническим комплексом ГЭТ.

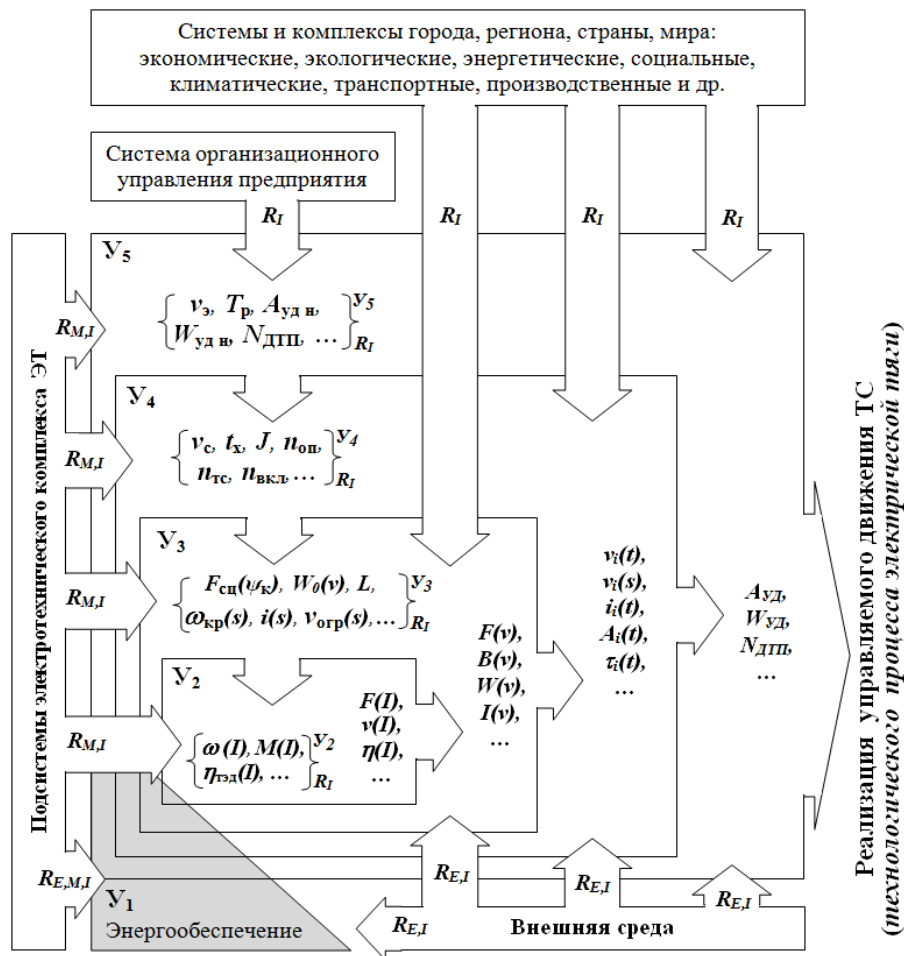


Рис. 4. Система уровней построения процесса движения ТС:
 $У_1 - У_5$ – уровни построения движения; $R_{M,E,I}$ – обмен соответственно материальными, энергетическими и информационными ресурсами
 Fig. 4. System of levels of construction process of vehicle movement:
 $У_1 - У_5$ – levels of movement construction; $R_{M,E,I}$ – exchange of material, energy and information resources, respectively

Энергообеспечение процесса движения ТС осуществляется посредством системы тягового электроснабжения (СТЭ) – сложным электротехническим комплексом с иерархической структурой (рис. 3). Критериями энергообеспеченности могут быть выбраны достаточная мощность (определяемая мощностью тяговой подстанции (ТП) $P_{ТПд}$, обслуживающей i -й участок) и стабильность параметров СТЭ (характеризуемая отклонением напряжения ΔU в контактной сети (КС)).

Достаточная мощность тяговой подстанции $P_{ТПд}$ определяет также предельную пропускную способность участка, которая в общем случае зависит от коэффициента α_n , характеризующего оперативную готовность элементов электротехнического комплекса ГЭТ в данный момент времени t_1 находиться в работоспособном состоянии и, начиная с этого момента, выполнять требуемую функцию при данных условиях в интервале (t_1, t_2) . Таким образом, коэффициент α_n характеризует состояние и надежность функционирования системы ГЭТ и может быть выбран в качестве критерия технического обеспечения. Модель уровня $У_1$ построения движения ТС в общем случае может быть представлена следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} U_{кc}(t, s, \theta) = U_{ном} - \Delta U(s, n, I_{тc}) \\ P_{ТПд} > K_2 \sum_1^{N(\alpha_n)} P_{тc} \\ \alpha_n = \prod_1^m K_{o.g.i}(t_1, t_2) \end{cases}, \quad (5)$$

где $U_{ном} = M[U_{ТП}(t, P_{ТПд}, \theta)]$ – номинальное напряжение на шине ТП, В; $P_{ТПд}$ – достаточная мощность ТП, кВт; $\Delta U(s, n, I_{тc})$ – отклонение напряжения, В; n – число ТС, находящихся в подстанционной зоне; $P_{тc}$ –

мощность ТС, кВт; $N(\alpha_n) \rightarrow N_{\text{норм}} \leq N_{\text{max}}$, $N_{\text{норм}} = \frac{(1440 - t_{\text{техн}}) \alpha_n}{J}$ – пропускная способность участка

маршрута движения ТС в нормальных условиях эксплуатации; $t_{\text{техн}}$ – продолжительность свободного от ТС промежутка времени, предоставляемого для выполнения работ по текущему содержанию пути, устройств, сооружений и т. д.); J – интервал следования ТС, с; K_2 – коэффициент энергопотребности; $K_{\text{ог}}(t_1, t_2)$ – коэффициенты оперативной готовности m элементов электротехнического комплекса ГЭТ; θ – совокупность случайных факторов.

В общем случае напряжение на шинах тяговой подстанции $U_{\text{тп}}$ является случайной величиной, зависящей от мощности $P_{\text{тп}}$, времени суток t и ряда случайных факторов θ . В этом случае значение $U_{\text{норм}}$ будет иметь смысл математического ожидания напряжения $U_{\text{тп}}(t, P_{\text{тп}}, \theta)$. Величина $U_{\text{кв}}$ определяется потерями в тяговой сети, зависящими от числа ТС n на секции подстанционной зоны и токов ТС $I_{\text{тс}}$, формирующих ток линии (фидера), которые в реальных условиях эксплуатации являются случайными.

2. *Уровень построения алгоритмов работы электротехнического комплекса ТЭО (Y_2)* является "основой" процесса управляемого движения ТС. Уровни $Y_3 - Y_5$ фактически только задают условия для уровня Y_2 , на котором формируются основные характеристики (тепловые, электромеханические, энергетические и др.) процесса электрической тяги.

Условно можно считать, что на данном уровне реализуется определенный набор "заложенных" при проектировании ТС режимов работы ТЭО, формируемый в автоматизированном режиме алгоритмами косвенной системы управления посредством задания определенных ходовых и тормозных позиций контроллера водителя КВ (рис. 2). При этом реализуются электротяговые характеристики ТС: на ободе колеса – статические $v(I)$, $F(I)$, $\eta(I)$ и динамические $v(t)$, $F(t)$ и др., однозначно определяющиеся электромеханическими характеристиками ТЭД, соответственно, статическими $\omega(I)$, $M(I)$, $\eta_{\text{тэд}}(I)$ и динамическими $\omega(t)$, $M(t)$ и др. Динамические характеристики транспортного средства ГЭТ и ТЭО определяются уравнениями движения (3) и (1). Необходимо отметить, что по аналогии с уровнем Y_B уровень Y_2 характеризует построение движения ТС в собственных координатах без взаимодействия с внешней средой (Y_3), т. е. ТС рассматривается как "закрытая система".

Если исключить влияние "внешних" сил (т. е. условно "приподнять" ТС над рельсами, чтобы пропала реакция опоры) и реализовывать одинаковые алгоритмы управления $u(t)$ посредством переключения КВ (рис. 2), то формируемые режимы ТЭО будут идентичны, но при этом движения ТС не будет. Таким образом, на уровне Y_2 решается конкретная специфическая задача для "закрытой системы" ТС, в результате которой реализуются определенные запроктированные режимы работы ТЭО.

В том случае когда ТС установлено на рельсы (или дорожное полотно), возникает "внешняя" сила сцепления $F_{\text{сц}}(\Psi_k)$, которая определяет касательную силу $F_{\text{к}}$. Появление $F_{\text{сц}}$ требует рассмотрения уже "открытой системы", характеризующейся взаимодействием ТС с окружающим пространством и его элементами, а также определяет "переход" процесса построения движения на следующий уровень Y_3 .

Реализация электротяговых характеристик осуществляется под влиянием определенных условий ("параметров порядка"): "внешних" для уровня Y_2 – множество $\left\{ \right\}_{R_i}^{Y_3}$ (сопротивление движению $W_0(v)$, сопротивление от кривых $w_{\text{кр}}(s)$ и от уклонов $i(s)$, ограничения скорости $v_{\text{огр}}(s)$ на перегоне L и др.) и "внутренних" – множество $\left\{ \right\}_{R_i}^{Y_2}$ (ЭМХ ТЭД $\omega(I)$, $M(I)$, $\eta_{\text{тэд}}(I)$ и др.), определяющих подмножество $\{ \dots \}_{\text{ТЭД}}$ и элементов ТЭО (рис. 2) (подмножества $\{ \dots \}_{\text{ПРУ}}$, $\{ \dots \}_{\text{КУ}}$, $\{ \dots \}_{\text{КВ}}$, $\{ \dots \}_{\text{ЭПр}}$, $\{ \dots \}_{\text{МПР}}$, и др.). Модель уровня Y_2 может быть представлена системой уравнений, характеризующих механическую, электрическую и тепловую работу ТЭО транспортного средства ГЭТ:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_{\Sigma}} \sum_{i=1}^n (u \cdot M_i(\omega) - M_c(\Psi_k, \mu, \eta_{\text{мп}}, \theta)) \\ F_{\text{ки}} = \frac{2\mu\eta_{\text{мп}}}{D_{\text{к}}} M_i; \quad v_{\text{к}} = \omega \frac{D_{\text{к}}}{2\mu}; \quad u = u(t) \\ \frac{dA}{dt} = \sum_{i=1}^n (U_{\text{тэд}i}(U_{\text{кв}}(t, s, \theta)) \cdot I_{\text{тэд}i}(t, u)) \\ \frac{d\tau}{dt} = \frac{\tau_{\infty}(I_{\text{тэд}}(t, u), U_{\text{кв}}(t, s, \theta)) - \tau(t)}{T_{\text{тэд}}(I_{\text{тэд}}(t, u), U_{\text{кв}}(t, s, \theta))} \end{array} \right. , \quad \text{где } u(t) = \begin{cases} (0; 1] & \text{при } t \in (t_0; t_p] \\ 0 & \text{при } t \in (t_p; t_t) \\ [-1; 0) & \text{при } t \in [t_t; T] \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{при } \left\{ \begin{array}{l} \{ \dots \}_{\text{ПРУ}}, \{ \dots \}_{\text{ТЭД}}, \{ \dots \}_{\text{МПР}}, \\ \{ \dots \}_{\text{ЭПр}}, \{ \dots \}_{\text{КВ}}, \{ \dots \}_{\text{КУ}}, \dots \end{array} \right\}_{R_i}^{Y_2}$$

где $U_{\text{тэд}}$, $U_{\text{кв}}$ – напряжение на ТЭД и в контактной сети, В; $I_{\text{тэд}}$ – ток якоря ТЭД, А; $F_{\text{ки}}$ – касательная сила на ободе колеса, кН; τ – температура нагрева ТЭД, °С; $T_{\text{тэд}}$ – тепловая характеристика ТЭД; $A(t)$ – расход электрической энергии на тягу ТС, кВт·ч; $u(t)$ – управляющее воздействие, n – число ТЭД.

В общем случае величина момента сопротивления M_c зависит от параметров ТЭО и его отдельных элементов (рис. 2): коэффициента полезного действия МПр $\eta_{мп}$, коэффициента трения Ψ_k , коэффициента передачи МПр μ , а также случайной величины θ , характеризующей среду.

Управляющее воздействие $u(t)$ на данном уровне зависит только от времени t и принимает дискретные значения в интервале $u \in [-1; 1]$, где $u = 1$ при моменте $M_{ЭМ \max}$, реализуемом ТЭД в режиме тяги, а $u = -1$ при моменте $M_{ТОРМ \max}$, реализуемом ТЭД в режиме торможения.

3. *Уровень реализации механического движения ТС ($У_3$)* формирует "простое" движение ТС, которое необходимо для обеспечения перемещения по заданному участку пути S (с конкретными характеристиками) при воздействии определенных внешних факторов (климатические, погодные и др.). При этом на реализуемые режимы движения не накладываются условия или ограничения (время хода, скорость и др.), характеризующие технологический процесс перевозок. Электротехнический комплекс ТС в данном случае рассматривается как "открытая" система, взаимодействующая с внешней средой.

Если на уровне $У_2$ электрическая энергия посредством ТЭО преобразовывалась в механическую энергию вращения Дв (рис. 4), то на уровне $У_3$ происходит преобразование механической работы ТЭО в линейное перемещение ТС под действием внешней по отношению к ТС касательной силы тяги F_k , возникающей на ободе колеса/колесной пары в результате реакции опоры.

Уровень $У_3$ характеризуется воздействием на ТС внешних сил различной природы. При этом из теории электрической тяги известно, что в основном внешние силы представляют собой силы сопротивления движения W , которые, воздействуя на ТС, фактически создают через МПр момент сопротивления M_c действующий РД ТЭД (рис. 2). Таким образом, параметр θ , ранее введенный в переменную $M_c(\Psi_k, \mu, \eta_{мп}, \theta)$, определяющую реализацию режимов работы ТЭО на уровне $У_2$ в выражении (6), формируется характеристиками внешней среды, в общем случае имеющими стохастическую природу, и должен также учитываться в $W(v, \theta)$.

На уровне $У_3$ формируются алгоритмы управления ТЭО $u(t(s))$ при движении ТС по типовым участкам (прямолинейный участок, с уклоном i , с кривой R и др.) с характерными условиями (определенный уровень загрузки ТС и др.) или их комбинации. В дальнейшем "сложное" движение транспортного средства ГЭТ будет формироваться из совокупности "простых" движений по типовым участкам, на которые можно разбить весь заданный маршрут.

Управление режимами движения на уровне $У_3$ происходит так же, как на $У_2$ – посредством переключения ручки контроллера водителя КВ (рис. 2), алгоритмы управления аналогичны. Но если на уровне $У_2$ управляющее воздействие $u(t)$ являлось функцией только времени, то при линейном перемещении по участку пути определенной конфигурации необходимо рассматривать управление $u(t(s))$ как учитывающее координату положения s ТС на участке движения S .

Для каждого типового участка алгоритмы работы ТЭО (уровень $У_2$) реализуются идентично, формируя с учетом "внутренних" "параметров порядка" (множество $\{ \dots \}_{R_i}^{Y_3}$, включающее подмножества характеристик ТС $\{ \dots \}_{ТС}$, путей сообщения $\{ \dots \}_{ПС}$, системы тягового электроснабжения $\{ \dots \}_{СТЭ}$, окружающей среды $\{ \dots \}_{ОС}$) характеристики уровня $У_3$ – тяговые характеристики ТС ($F(v)$, $B(v)$, $I(v)$ и др.). Процесс движения на уровне $У_3$ еще не является управляемым, т. е. реализуемым по условиям технологии транспортной работы формируемым множеством $\{ \dots \}_{R_i}^{Y_4}$ на уровне построения движения $У_4$.

Первая форма уравнения движения (3) с учетом некоторых дополнений определяется уравнением движения ТЭД, входящего в уравнение (6), в связи с этим модель уровня $У_3$ построения движения ТС на участке S можно в общем виде представить следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \frac{\xi}{(1+\gamma)m} (u \cdot F(v) - W(v, \theta)) \\ F = \sum_{i=1}^n F_{ki}; \quad u = u(t(s)) \\ S = \int_0^{T_x} v(t) dt; \quad S = \sum_1^n S_k \end{cases}, \quad \text{где } u(t(s)) = \begin{cases} (0; 1] \text{ при } t \in (0; t(s_p)] \\ 0 \text{ при } t \in (t(s_p); t(s_t)) \\ [-1; 0) \text{ при } t \in [t(s_t); t(S)] \end{cases} \quad (7)$$

при $\{ \dots \}_{ТС}, \{ \dots \}_{ПС}, \{ \dots \}_{СТЭ}, \{ \dots \}_{ОС} \}_{R_i}^{Y_3}$,

где v – скорость движения ТС, км/ч; $u(t(s))$ – управляющее воздействие, учитывающее характеристики пути s ; $F(v)$ – управляемая сила, создаваемая ТЭО, кН; $W(v, \theta)$ – сила сопротивления движению, кН; S_k – типовой участок перегона S , м; T_x – время хода по перегону S , с; s_p, s_t – участки разгона и торможения, м; $t(s_p) = t_p, t(s_t) = t_t$ – время разгона и торможения, с.

Согласно (7) при $t \in [t(s_t); t(S)]$ управляющее воздействие $u(t(s)) < 0$, следовательно, $F(v)$ становится отрицательной и преобразуется в тормозную силу $B(v)$, проявляющуюся в режиме торможения ТС. При этом управляемая сила F однозначно определяется электромеханическими характеристиками ТЭД ТС, приведенных к ободу колеса.

4. *Уровень построения технологической системы транспортной работы* ($У_4$) обеспечивает формирование управляемого движения ТС, которое соответствует технологическим условиям перевозочного процесса и выстраиваемого путем реализации задач на уровнях $У_1 - У_3$. В результате на уровне $У_4$ формируется движение ТС в условиях таких динамически изменяющихся параметрах транспортной работы, как время хода T_x , эксплуатационная скорость v_s , интервал следования ТС J , время стоянки на остановочных платформах $t_{оп}$ и др. При этом все параметры непрерывно меняются из-за сложной дорожной обстановки, которой характеризуются реальные условия эксплуатации ГЭТ.

На данном уровне важным определяющим фактором реализации управляемого движения является водитель, так как именно он управляет ручкой контроллера КВ (рис. 2) и задает необходимые алгоритмы управления $u(t(s))$. Квалификация водителя определяет возможность реализации алгоритмов эффективного управления электротехническим комплексом ТЭО. Уровень квалификации и стаж работы в этом случае являются одними из основных факторов, определяющих условия реализации управляемого движения на уровне $У_4$. Условно можно доопределить управляющее воздействие $u(t(s))$ как функцию параметра k_b , характеризующего качество вождения ТС в эксплуатации и использовать далее запись $u(t(s, k_b))$.

Для описания процесса движения на уровне $У_4$, реализующегося в условиях перемещения по маршруту, целесообразно использовать вторую форму уравнения движения (4), определяющую "кривую движения" $v(s)$. При этом $v(s)$ однозначно зависит от $v(t)$ (рис. 3), характеризующую процесс построения движения на уровне $У_3$.

Реализация движений по маршруту, выраженная зависимостью $v(s)$, формируется на уровне $У_4$ как совокупность реализаций движений на элементарных участках движения, выстраиваемых на уровне $У_3$, под контролем "параметров порядка" технологии транспортной работы $У_4$, которые представляют собой множество $\{ \dots \}_{R_i}^{Y_4}$: требования правил дорожного движения – подмножество $\{ \dots \}_{ПДД}$, правил технической эксплуатации ТС – $\{ \dots \}_{ПТЭ}$, графика движения ТС – $\{ \dots \}_{ГрДв}$, инструкция водителя ТС – $\{ \dots \}_{ИВ}$ и др. При этом на построение движения на уровне $У_4$ влияют также "внешние" "параметры порядка" уровня $У_5$: множество $\{ \dots \}_{R_i}^{Y_5}$, решающего задачи производственного процесса ГЭТ в контексте обеспечения комфортных и безопасных пассажироперевозок при минимальных материальных затратах, выражающихся в том числе и уровнем электропотребления на тягу ТС.

Характеристиками процесса движения ТС на уровне $У_4$ являются кривые движения $v_i(t)$ и $v_i(s)$, кривые потребления тока $i_i(t)$, кривые нагрева ТЭД $\tau_i(t)$ и др. для конкретных условий эксплуатации ГЭТ. Модель уровня $У_4$ построения движения ТС может быть представлена системой уравнений:

$$\begin{cases} \left(\frac{dv}{dt} \right)_i = \frac{\xi}{v(1+\gamma)m} (u \cdot F(v) - W(v, s, \theta))_i \\ \int_{s_{i-1}}^{s_i} \frac{1}{v_i(s)} ds \leq t_{xi}; u = u(t(s, k_b)) \\ \sum_{i=0}^{n_0} (t_{xi}(u(t(s, k_b))) + t_{oi}(J)) \leq T_P(W_{пас}, \theta) \end{cases} \quad \text{при} \quad \left\{ \begin{array}{l} \{ \dots \}_{ПДД} \\ \{ \dots \}_{ПТЭ} \\ \{ \dots \}_{ИВ} \\ \{ \dots \}_{ГрДв} \end{array} \right\}_{R_i}^{Y_4}, \quad (8)$$

где $\sum_{i=1}^n s_i = L_m$ – длина маршрута, км; n – число перегонов; J – интервал следования ТС, мин; t_{xi} , t_{oi} – время хода по i -му перегону и стоянки на остановке, мин; n_0 – число остановок на маршруте; $T_P(W_{пас}, \theta)$ – рейсовое время, мин; $u(t(s, k_b))$ – управляющее воздействие, учитывающее параметры пути s и качество вождения k_b ; $W_{пас}$ – пассажиропоток, тыс. пасс./км.

5. *Уровень организации производственного процесса ГЭТ* ($У_5$) обеспечивает формирование движения ТС для реализации с задачами производственного процесса ГЭТ. При этом задаются внутренние "параметры порядка" уровня $У_5$: множество $\{ \dots \}_{R_i}^{Y_5}$, включающее подмножества: план по выполнению технологических $\{ \dots \}_{ТП}$ и производственных показателей $\{ \dots \}_{ПП}$; нормы расхода электроэнергии $\{ \dots \}_{Норм}$ и др. Характеристики процесса движения ТС на уровне $У_5$ определяются внешними "параметрами порядка", которые формируются как системой организационного управления предприятием (рис. 1), так и системами более высокого уровня (экономические, экологические, энергетические, социальные и др.) (рис. 3). Модель уровня $У_5$ в общем виде может быть представлена так

$$\begin{cases} W_{пас н} (v_{э} (J, k_{орп}, k_c, k_{тс})) \rightarrow W_{пас н} \\ A (I_{ТС} (u(t(s, k_b)), U_{кв} (t, s, n)) \rightarrow A_{уд н} \\ N_{ДТП} (u(t(s, k_b), k_{орп}, k_c, k_{тс})) \rightarrow \min \end{cases} \quad \text{при} \quad \left\{ \begin{array}{l} \{ \dots \}_{Норм} \\ \{ \dots \}_{ТП} \\ \{ \dots \}_{ПП} \end{array} \right\}_{R_i}^{Y_5}, \quad (9)$$

где $W_{пас н}$ – норма пассажиропотока, тыс. пасс./км; $A_{уд н}$ – норма удельного расхода электроэнергии на тягу ТС, кВт·ч/т·км; $N_{ДТП}$ – количество аварий, случаев; $k_{орп}$, k_c , $k_{тс}$ – коэффициенты, характеризующие

соответственно вид и количество ограничения скорости на перегоне, сложность перегона и/или маршрута движения, техническое состояние электротехнического комплекса ГЭТ.

Необходимо отметить, что данный уровень реализует процесс движения, соответствующий прогнозным расчетам, т. е. идеализированный процесс (аналогично уровню U_E), который является целевым результатом для предприятия ГЭТ. Прогнозный и реальный процессы будут отличаться, но при эффективном управлении уровнями $U_1 - U_4$ будет достигнуто максимальное приближение.

Одним из основных условий реализации процесса управляемого движения ТС в открытой сложноорганизованной системе ГЭТ является обмен материальными R_M , энергетическими R_E и информационными R_I ресурсами между уровнями и внешней средой (Аухадеев, 2014; Хакен, 1980; Пригожин и др., 1986). Условная схема обмена ресурсами представлена на рис. 4.

Эффективность функционирования электротехнического комплекса ГЭТ является одной из важнейших задач развития отрасли и определяется соответствием эксплуатационных и энергетических параметров реализации транспортной работы парка ТС планируемому значению. Применение более полной и точной модели движения ТС ГЭТ на основе системного подхода и синергетической методологии позволит определить направления повышения эффективности системы.

Модель управляемого движения ТС как многоуровневого процесса строится на основе математических моделей каждого из уровней в их взаимосвязи и взаимоподчиненности. Основной процесс управляемого движения ТС носит стохастический характер, так как зависит от множества случайных параметров, определяемых на различных уровнях его построения экспериментальным путем в реальных условиях эксплуатации ГЭТ (Rylov et al., 2017; Zhang et al., 2021; da Silva et al., 2021).

Заключение

Проведенное исследование позволило с позиции синергетического подхода к описанию свойств, принципов организации и функционирования сложноорганизованной производственно-технической системы ГЭТ обосновать, что управляемое движение ТС является многоуровневым технологическим процессом, реализуемым электротехническим комплексом ГЭТ. Это позволило разработать теоретическую систему, а на ее основе математическую модель уровней построения движения транспортного средства наземного городского электрического транспорта, что является важным научным результатом исследований.

В ходе работы теоретически обоснованы следующие положения:

1. Реализация процесса движения ТС или его "построение" происходит по иерархически выстроенным уровням (подпроцессам), каждый из которых решает определенную специфическую задачу. Результаты выполнения подпроцесса на более высоком иерархическом уровне являются условиями для выполнения подпроцесса на более низком при условии их непрерывного взаимодействия и подчинения условиям общей задачи построения управляемого движения ТС ГЭТ.

2. Режимы работы и алгоритмы управления электротехническим комплексом ТЭО, формируемые на уровне U_2 , являются основой процесса управляемого движения ТС. В соответствии с предложенной теоретической системой уровень U_2 формирует построение остальных уровней, определяющих технологию производственного процесса ГЭТ.

3. Непрерывное взаимодействие между уровнями и внешней средой, выражающееся в потоках энергетических, материальных и информационных ресурсов, является обязательным условием существования и стабильного функционирования сложных динамических систем, к которым относится производственно-техническая система ГЭТ.

Разработанная математическая модель может быть использована при создании цифрового двойника ТС ГЭТ, что является важным направлением практического применения результатов исследования. Идентификация эксплуатационных и технологических параметров, входящих в состав предложенных математических моделей по уровням построения движения $U_1 - U_5$, позволит повысить точность и адекватность модели.

Результаты анализа, выявленного в ходе исследования перечня и состава параметров и ограничений, характеризующих "внешние" и "внутренние" системные свойства и взаимосвязи уровней построения движения ГЭТ, могут быть рекомендованы разработчикам систем управления автономных ТС и систем помощи водителю для обоснования критериев выбора режимов работы и алгоритмов эффективного управления электротехническим комплексом тягового электрооборудования городского электрического транспорта.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Аухадеев А. Э. Саморазвитие транспортной системы современного города. Поиск инновационной модели интеллектуального управления. М. : ВИНТИ, 2014. 218 с.
- Аухадеев А. Э., Литвиненко Р. С., Киснеева Л. Н., Егорова П. В. Концептуальная модель процесса электрической тяги как основа развития теории тягового электрооборудования городского электрического транспорта // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2019а. № 1–2(29–30). С. 119–128. EDN: GYGHPI.
- Аухадеев А. Э., Литвиненко Р. С., Киснеева Л. Н., Тухбатуллина Д. И. К вопросу о развитии теории тягового электрооборудования городского электрического транспорта // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2019б. Т. 15, № 4. С. 12–18. DOI: <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2019-15-4-12-18>. EDN: XMUJDE.
- Бернштейн Н. А. О построении движений. М : Медгиз, 1947. 255 с.
- Бирюков В. В., Щуров Н. И., Штанг А. А. Основы электрической тяги. Новосибирск : НГТУ, 2022. 332 с.
- Вельможин А. В., Гудков В. А., Сериков А. А. Проблемы синергетического подхода к организации автомобильных перевозок // Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер. Наземные транспортные системы. 2011. Т. 4, № 12(85). С. 76–79. EDN: ONCMNF.
- Гузь А. Р., Пальмов С. В. Цифровой двойник в интеллектуальной транспортной системе // Региональная и отраслевая экономика. 2023. № 1. С. 112–116. DOI: https://doi.org/10.47576/2949-1916_2023_1_112. EDN: LSWMXF.
- Малахов С. В., Капустин М. Ю. Метод построения адаптивного субоптимального стационарного регулятора движения поезда на основе искусственных нейронных сетей // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2021. Т. 80, № 1. С. 13–19. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-13-19>. EDN: VTGPTM.
- Михальченко А. А., Парфенов Б. Б., Сафроненко А. А., Старовойтов А. Н. Основы теории транспортных процессов и систем. Гомель : БелГУТ, 2017. 379 с.
- Морозов В. Д. Трансформация управления транспортным комплексом крупнейших городов: экономические аспекты // Финансовые рынки и банки. 2022. № 12. С. 112–114. EDN: NDQZHY.
- Платонов А. К. О построении движений в баллистике и мехатронике // Прикладная механика и управление движением : сб. ст. Москва : Ин-т прикладной математики им. М. В. Келдыша, 2010. С. 127–222.
- Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса : Новый диалог человека с природой. М. : Прогресс, 1986. 431 с.
- Пролиско Е. Е., Шуть В. Н. Возможности и перспективы беспилотного городского общественного транспорта // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2018. Т. 9. С. 16–23. EDN: MITOLZ.
- Рябченко Н. Л., Алексева Т. Л., Астраханцев Л. А., Асташков Н. П. [и др.]. Перспективные энергетические технологии электрической тяги поездов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4(76). С. 215–226. DOI: [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.4\(76\).215-226](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.4(76).215-226). EDN: WUQVEY.
- Сечкарев А. А. Региональная транспортная система с позиций синергетики. Брянск, 2011. 122 с.
- Сивицкий Д. А. Анализ опыта и перспектив применения искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2021. № 2(57). С. 33–41. DOI: https://doi.org/10.52170/1815-9265_2021_57_33. EDN: EPTXTN.
- Сопов В. И. Системы электроснабжения электрического транспорта на постоянном токе. Новосибирск : НГТУ, 2013. 728 с.
- Хакен Г. Синергетика. М. : Мир, 1980. 404 с.
- Чеченова Л. М. Устойчивое развитие транспортной отрасли на базе систем искусственного интеллекта // Бюллетень результатов научных исследований. 2021. № 4. С. 125–138. DOI: <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2021-4-125-138>. EDN: OZTFDI.
- Шишкарев С. Н. К вопросу о модернизации городского общественного транспорта // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2011. № 2(33). С. 18–19. EDN: NTNPSV.
- Якимов М. Р. Транспортные системы крупных городов. Анализ режимов работы на примере города Перми. Пермь : ПГТУ, 2008. 184 с.
- Auhadeev A. E., Idiyatullin R. G., Pavlov P. P., Butakov V. M. [et al.]. Improving the theory for calculating the rational modes of traction electrical equipment // E3S Web Conferences. 2019a. Vol. 124. Article number: 05077. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912405077>. EDN: CQWQJZ.
- Aykhadeev A., Idiyatullin R., Kiseeva L., Zalyalov R. [et al.]. Development of the theory and methods for calculating the rational operation modes of electric traction equipment of urban electric transport // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Scientific Electric Power Conference 23–24 May 2019, Saint Petersburg, Russian Federation, 2019b. Vol. 643. Article number: 012027. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/643/1/012027>.
- da Silva L. D., Lollini P., Mongelli D., Bondavalli A. [et al.]. A stochastic modeling approach for traffic analysis of a tramway system with virtual tags and local positioning // Journal of the Brazilian Computer Society. 2021. Vol. 27. Article number: 2 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1186/s13173-021-00105-x>.

- Kashapov N. F., Sabitov L. S., Auhadeev A. E., Litvinenko R. S. [et al.]. Description of a complex technical system of urban electric transport from the standpoint of synergistic methodology // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Scientific-Technical Conference on Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials 2018 (ISTC-IETEM-2018) 5–7 December 2018, Kazan, Russia, 2019. Vol. 570. Article number: 012040. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/570/1/012040>.
- Pisareva O. M., Alexeev V. A. Organizational aspects of ensuring information security in the framework of creating an intelligent transport system in the Russian Federation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, International science and technology conference "Earth science" 8–10 December 2020, Vladivostok, Russian Federation, 2021. Vol. 666. Article number: 062077. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/6/062077>. EDN: APDCIG.
- Romanova N., Kakhriyanova D., Semenova A., Safronova A. [et al.]. Development of artificial intelligence as a modern business technology using the transport industry as an example // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, VIII International Scientific Conference Transport of Siberia – 2020, 22–27 May, 2020, Russia, Novosibirsk, 2020. Vol. 918. Article number: 012065. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/918/1/012065>. EDN: ZRKSZN.
- Rylov Yu. A., Aukhadeev A. E., Solovyeva S. I., Korolkov A. Yu. Experimental research of operating modes traction electric rolling stock // Modern Science. 2017. № 9. P. 137–140. EDN: ZISOWR.
- Zhang Yu., Zhang Z., Xu L., Ying T. [et al.]. Coupling real-time simulation of power supply, trains and dispatching for urban rail transit // Transportation Safety and Environment. 2021. Vol. 3, Issue 3. Article number: tdab010. DOI: <https://doi.org/10.1093/tse/tdab010>.

References

- Aukhadeev, A. E. 2014. Self-development of the transportation system of a modern city: Search for an innovative model of intellectual management. Moscow. (In Russ.)
- Aukhadeev, A. E., Litvinenko, R. S., Kisneeva, L. N., Egorova, P. V. 2019a. Conceptual model of the electric traction process as a basis for the development of the theory of traction electrical equipment of urban electric transport. *Models, Systems, Networks in Economics, Engineering, Nature and Society*, 1–2 (29–30), pp. 119–128. EDN: GYGHPI. (In Russ.)
- Aukhadeev, A. E., Litvinenko, R. S., Kisneeva, L. N., Tukhbatullina, D. I. 2019b. To the issue of the development of the theory of traction electrical equipment of urban electric transport. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 15(4), pp. 12–18. DOI: <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2019-15-4-12-18>. EDN: XMUJDE. (In Russ.)
- Bernstein, N. A. 1947. On the construction of movements. Moscow. (In Russ.)
- Biryukov, V. V., Shchurov, N. I., Stang, A. A. 2022. Fundamentals of electric traction. Novosibirsk. (In Russ.)
- Velmozhin, A. V., Gudkov, V. A., Serikov, A. A. 2011. Problems of synergetic approach to the organization of road transportation. *Izvestiya Volgogradskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Ser. Nazemnyye Transportnyye Sistemy*, 4(12(85)), pp. 76–79. EDN: ONCMNF. (In Russ.)
- Guz, A. R., Palmov, S. V. 2023. Digital twin in the intelligent transportation system. *Regional and Branch Economy*, 1, pp. 112–116. DOI: https://doi.org/10.47576/2949-1916_2023_1_112. EDN: LSWMXF. (In Russ.)
- Malakhov, S. V., Kapustin, M. Yu. 2021. Method of building an adaptive suboptimal stationary regulator of train motion based on artificial neural networks. *Russian Railway Science Journal*, 80(1), pp. 13–19. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-13-19>. EDN: VTGPTM. (In Russ.)
- Mikhailchenko, A. A., Parfyonov, B. B., Safronenko, A. A., Starovoitov, A. N. 2017. Fundamentals of the theory of transportation processes and systems. Gomel. (In Russ.)
- Morozov, V. D. 2022. Transformation of management of the transport complex of the largest cities: Economic aspects. *Financial Markets and Banks*, 12, pp. 112–114. EDN: NDQZHY. (In Russ.)
- Platonov, A. K. 2010. On motion construction in ballistics and mechatronics. In *Applied Mechanics and Motion Control*. Coll. of articles. Moscow, pp. 127–222. (In Russ.)
- Prigozhin, I., Stengers, I. 1986. Order out of chaos: A new dialogue between man and nature. Moscow. (In Russ.)
- Prolisko, E. E., Shut, V. N. 2018. Opportunities and prospects of unmanned urban public transportation. *Matematicheskie Metody v Tekhnike i Tekhnologiyakh – MMTT*, 9, pp. 16–23. EDN: MITOLZ. (In Russ.)
- Ryabchenok, N. L., Alekseeva, T. L., Astrakhantsev, L. A., Astashkov, N. P. et al. 2022. Perspective energy technologies of the electric traction of trains. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*, 4(76), pp. 215–226. DOI: [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.4\(76\).215-226](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.4(76).215-226). EDN: WUQVEY. (In Russ.)
- Sechkarev, A. A. 2011. Regional transport system from the position of synergetics. Bryansk. (In Russ.)
- Sivitskiy, D. A. 2021. Analysis of experience and prospects of application of artificial neural networks on railway transport. *Bulletin of Siberian State University of Railway Transport*, 2(57), pp. 33–41. DOI: https://doi.org/10.52170/1815-9265_2021_57_33. EDN: EPTXTN. (In Russ.)
- Sopov, V. I. 2013. Systems of electric power supply of electric transportation on direct current. Novosibirsk. (In Russ.)
- Haken, G. 1980. Synergetics. Moscow. (In Russ.)

- Chechenova, L. M. 2021. Sustainable development of the transportation industry on the basis of artificial intelligence systems. *Bulletin of Scientific Research Results*, 4, pp. 125–138. DOI: <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2021-4-125-138>. EDN: OZTFDI. (In Russ.)
- Shishkarev, S. N. 2011. To the question of modernization of urban public transport. *Transport of the Russian Federation*, 2(33), pp. 18–19. EDN: NTNPSV. (In Russ.)
- Yakimov, M. R. 2008. Transport systems of large cities. Analysis of operation modes on the example of the city of Perm. Perm. (In Russ.)
- Auhadeev, A. E., Idiyatullin, R. G., Pavlov, P. P., Butakov, V. M. et al. 2019a. Improving the theory for calculating the rational modes of traction electrical equipment. *E3S Web Conferences*, 124. Article number: 05077. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912405077>. EDN: CQWQJZ.
- Aykhadeev, A., Idiyatullin, R., Kisneeva, L., Zalyalov, R. et al. 2019b. Development of the theory and methods for calculating the rational operation modes of electric traction equipment of urban electric transport. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, International Scientific Electric Power Conference 23–24 May 2019, Saint Petersburg, Russian Federation, 2019. Vol. 643. Article number: 012027. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/643/1/012027>.
- da Silva, L. D., Lollini, P., Mongelli, D., Bondavalli, A. et al. 2021. A stochastic modeling approach for traffic analysis of a tramway system with virtual tags and local positioning. *Journal of the Brazilian Computer Society*, 27. Article number: 2 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1186/s13173-021-00105-x>.
- Kashapov, N. F., Sabitov, L. S., Auhadeev, A. E., Litvienko, R. S. et al. 2019. Description of a complex technical system of urban electric transport from the standpoint of synergistic methodology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, International Scientific-Technical Conference on Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials 2018 (ISTC-IETEM-2018) 5–7 December 2018, Kazan, Russia, 2019. Vol. 570. Article number: 012040. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/570/1/012040>.
- Pisareva, O. M., Alexeev, V. A. 2020. Organizational aspects of ensuring information security in the framework of creating an intelligent transport system in the Russian Federation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, International Science and Technology Conference "Earth Science" 8–10 December 2020, Vladivostok, Russian Federation, 2021. Vol. 666. Article number: 062077. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/6/062077>. EDN: APDCIG.
- Romanova, N., Kakhrianova, D., Semenova, A., Safronova, A. et al. 2020. Development of artificial intelligence as a modern business technology using the transport industry as an example. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, VIII International Scientific Conference Transport of Siberia – 2020, 22–27 May, 2020, Russia, Novosibirsk, 2020. Vol. 918. Article number: 012065. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/918/1/012065>. EDN: ZRKSZ.
- Rylov, Yu. A., Aukhadeev, A. E., Solovyeva, S. I., Korolkov, A. Yu. 2017. Experimental research of operating modes traction electric rolling stock. *Modern Science*, 9, pp. 137–140. EDN: ZISOWR.
- Zhang, Yu., Zhang, Z., Xu, L., Ying, T. et al. 2021. Coupling real-time simulation of power supply, trains and dispatching for urban rail transit. *Transportation Safety and Environment*, 3(3). Article number: tdab010. DOI: <https://doi.org/10.1093/tse/tdab010>.

Сведения об авторе

Аухадеев Авер Эрикович – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: auhadeev.ae@kgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7191-4550>

Aver E. Aukhadeev – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: auhadeev.ae@kgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7191-4550>