

КОНЦЕПЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СЕТИ ПОЛИГОНОВ ДЛЯ ОТРАБОТКИ СЦЕНАРИЕВ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ ГРУПП ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ В СЛОЖНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ И ЛАНДШАФТНЫХ УСЛОВИЯХ: ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ¹

Коргин Н. А.²

(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва;

Московский физико-технический институт, Москва)

Мещеряков Р.В.³

(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Описывается проект по созданию распределенной сети центров исследований проблем и перспектив применения гетерогенных групп транспортных средств с электрическим приводом в сложных климатических и ландшафтных условиях для решения задач обеспечения проведения полевых исследований в интересах научных организаций и эксплуатации приборной базы уникальных научных установок и перспективы его дальнейшего развития. Описываются обобщенный подход, основанный на концепции активного планирования из теории управления организационными системами, результаты опытной апробации отдельных элементов концепции на трех пилотных узлах сети на основе инфраструктуры региональных центров РАН, расположенных в регионах со сложными климатическими и ландшафтными условиями и направления дальнейшего развития проекта. Предложена формальная математическая модель, позволяющая описать процесс согласования интересов в рамках одного узла сети как центра коллективного пользования с расширяемым функционалом и числом пользователей. В заключение предлагается дальнейшая программа научных исследований по проблеме функционирования гетерогенной группы транспортных средств с электрическим приводом как элементов малой распределенной энергосистемы на базе развиваемой сети полигонов по трем основным направлениям – мобильный транспорт как элемент энергосистемы, методы идентификации моделей и синтеза управления для подвижных объектов при движении по нежестким поверхностям с изменяемыми характеристиками и методы

¹ Исследование выполнено частично за счет гранта Российского научного фонда №23-29-00681, <https://rscf.ru/project/23-29-00681>.

² Николай Андреевич Коргин, д.т.н., г.н.с. (nkorgin@ipu.ru).

³ Роман Валерьевич Мещеряков, д.т.н., г.н.с. (mrv@ipu.ru).

анализа и синтеза моделей влияния человека для транспортных средств, сопоставимых по массе с весом человека.

Ключевые слова: электрический транспорт, групповое управление, организационно-техническая система, центр коллективного пользования, микрогрид.

1. Введение

Проект по созданию распределенной сети полигонов для отработки сценариев применения гетерогенных групп транспортных средств с электрическим приводом в сложных климатических и ландшафтных условиях (далее – Проект) был инициирован под эгидой центра интеллектуальных робототехнических систем ИПУ РАН в 2023 году при частичной поддержке РФФИ по результатам серии полевых испытаний опытных платформ малогабаритного транспортного средства повышенной проходимости на электроприводе, предназначенного для передвижения по снежному покрову [9]. Опытные образцы малогабаритных транспортных средств повышенной проходимости на электроприводе, предназначенные для передвижения по снежному покрову (рис. 1) разрабатываются отечественными промышленными партнерами ИПУ РАН в рамках разветвленной сети научного и академического сотрудничества [7], а их апробация проходит в географических локациях со сложными климатическими и ландшафтными условиями – в высокогорных районах Кавказа и горных регионах Заполярья, где размещаются как уже существующие объекты научной инфраструктуры КБНЦ РАН, КНЦ РАН и САО РАН, так и планируемые к созданию, такие как международная арктическая станция «Снежинка» на Полярном Урале [6].

«Бум» разработки транспортных средств с электрическим приводом (ЭТС), наблюдаемый повсеместно, порождает целый ряд вызовов и возможностей не только в рамках традиционных парадигм использования транспортных средств, но и формируя принципиально новые направления.



Рис. 1. Опытные образцы: двухколейный «утилитарный» снегоход и одноколейный «снегоцикл»

В развиваемой в настоящее время концепции транспорта как элемента энергосистемы ЭТС выступает одновременно в роли потребителя, накопителя и транспортировщика электроэнергии как в рамках связанной энергосистемы [28], так и отдельных, изолированных объектов [22]. При этом объективные технологические ограничения, такие как время зарядки аккумуляторных батарей, порождают такие технологические задачи, как сопоставление стратегий заряда батарей на борту ЭТС и замены данных батарей, см., например, [26]. А объективные возможности, как то: наличие значительных электрических мощностей и возможность их восполнения в процессе движения ЭТС, порождают такие технологические задачи как проектирование и внедрение систем генерации электроэнергии с различных узлов ТС, см., например, в [15]. Что, в свою очередь, позволяет обеспечивать управляемость и проходимость ЭТС на принципиально другом уровне, чем в ТС с ДВС. В частности, за счет индивидуального адресного управления каждым движителем (колесом или гусеницей), см., например, [24]. Отдельным направлением развития ЭТС является легкий внедорожный транспорт массой 50–500 кг, не предназначенный для движения по дорогам общего пользования (мотоциклы, квадроциклы, багги, снегоходы и т.п.), для которого актуальным является вопрос: как традиционные для этого класса тех-

ники узлы и агрегаты, см., например, [18], целесообразно модифицировать с учетом особенностей и ограничений электрического привода, см., например, [9], или сохраняя «классическую» схему, см., например, [25]. При этом ТС с ДВС указанного класса, как считается, оказывают достаточно значительное влияние на экологию окружающей среды [30]. В то время как ЭТС данного класса также активно рассматриваются как элементы концепции vehicle-to-building (V2B), см., например, [17]. Значимой проблемой для эффективной реализации концепций vehicle-to-grid (V2G) и V2B является необходимость синхронизации систем генерации переменного тока, располагаемых на борту ЭТС – как между ними в случае подключения гетерогенной группы, так и с несущей частотой сети в случае работы на объектах, подключенных к основной энергосистеме. Отдельный интерес для размещения на изолированных объектах инфраструктуры и на ЭТС, особенно перемещающихся в автономном режиме, представляют энергетические системы на базе водородных технологий как решения, которые позволяют запасать энергию от возобновляемых источников и, в перспективе, – от систем регенерации энергии на ЭТС [19]. В настоящее время ведутся исследования по реализации «малых» энергонакопителей для домохозяйств на базе этих технологий, см., например, [21]. В нашей стране коллегами из НГТУ и МФТИ при взаимодействии с отечественными производителями реализован прототип крупногабаритного внедорожного ТС с электрическим приводом и системой хранения энергии на базе водородных технологий [4]. А за рубежом ведутся исследования по вопросу реализации решений на базе легких внедорожных ТС [23].

Поэтому если акцентировать внимание на оценку перспектив развития и вызовов внедорожного электрического транспорта, особенно предназначенного для перемещения по снегу, то актуальным становится запрос на создание натуральных полигонов для исследований по перечисленным выше вопросам.

В статье описываются полевые выезды в рамках Проекта в течение 2023–2024 годов к объектам научной инфраструктуры РАН, перечисляются их основные результаты, обсуждаются дальнейшие направления развития проекта.

2. Распределенная сеть полигонов

В рамках проекта в соответствии с предложенным в [7] подходом к управлению распределённой организационно-технической системой производилось формирование:

1. Концепции распределенной сети полигонов (далее – РСП) как центров коллективного пользования на базе существующей инфраструктуры научных организаций.

2. Реестров:

- а) опытных транспортных платформ (ОТП) и демонстраторов технологий;
- б) технологий фиксации результатов эксперимента;
- в) сценариев применения гетерогенных транспортных систем.

Проводился анализ возможностей материально-технической базы задействованных организаций – ИПУ РАН, КНЦ РАН (Мурманская область), КБНЦ РАН (КБР), САО РАН (КЧР), которые рассматривались как пилотные узлы РСП (рис 2), для решения задач обеспечения полевых испытаний группировок транспортных средств на электрическом приводе и допустимых режимов ее использования.

В качестве первичной структуры информационной модели был предложен следующий перечень:

1. Отдельный полигон:

- а) объекты материально-технической базы (ОМТБ);
- б) локальные сценарии для апробации (ЛС);
- в) ограничения по режиму использования (ОИ).

2. Перемещаемый объект:

- а) опытная транспортная платформа (ОТП);
- б) объект транспортной инфраструктуры (ОТИ);
- в) объект измерительной инфраструктуры (ОИИ).

3. Общие сценарии применения распределенной сети полигонов для апробации и демонстрации решения задач обеспечения проведения полевых исследований в интересах научных организаций и эксплуатации приборной базы уникальных научных установок посредством применения гетерогенных группировок транспортных средств.

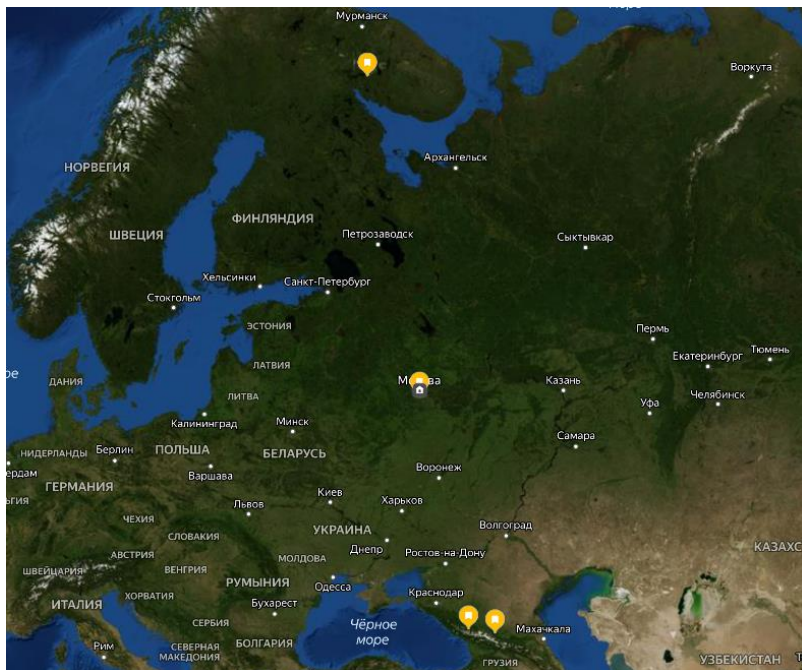


Рис. 2. Расположение первичных узлов РСЦ

В качестве пилотной группы гетерогенных транспортных средств использовалось сочетание из нескольких легких транспортных средств, передвигающихся по снежному покрову (так называемые снегоциклы), созданного на их основе снегохода двухколейной компоновки, БПЛА различной грузоподъемности, осуществляющих задачи навигации, регистрации движения и ретрансляции информации в интересах всей группы ТС (в тех регионах, где это было разрешено текущим законодательством). Кроме того, в ряде сценариев группа дополнялась ТС повышенной грузоподъемности, выступающим в роли «носителя» снегоциклов (рис 3.)

В рамках проекта в течение 2023–2024 гг. была осуществлена серия полевых выездов:

1. К существующим объектам научной инфраструктуры, БТА САО РАН, КБНЦ РАН и КНЦ РАН.



Рис. 3. Пример гетерогенной группы из снегоцикла, транспортного средства повышенной грузоподъемности и БПЛА

2. К перспективным по месторасположению международной арктической станции «Снежинка» на Полярном Урале и водородному полигону на базе СКБ САМИ ДВО РАН.

3. Для участия в межведомственных опытно-исследовательских учениях «Безопасная Арктика - 2023», организованных МЧС России (рис. 4).



Рис. 4. Учения «Безопасная Арктика 2023» - сценарии десантирования ОТП в составе аэромобильной группы и работа по сопровождению колонн тяжелых ТС

В ходе полевых выездов производилась отработка целого спектра сценариев применения гетерогенных групп ТС с электрическим приводом и сбор данных для их дальнейшего анализа:

- применения легких внедорожных транспортных средств для перемещения по снежному покрову на примере снегоциклов и снегоходов для решения задач обслуживания инфраструктуры уникальных приборных установок в зимний период, что будет подробнее описано в разделе 5.

- групповое движение ОТП и ОТИ в сопровождении БПЛА с целью создания цифровой модели рельефа (пример приведен на рис. 3);

- поддержка проведения научных полевых исследований в области гляциологии [10] и лимнологии [27] в зимних условиях, (рис. 5);

- сопровождения и навигация колонны тяжелых ТС с помощью легкого ТС с электрическим приводом с целью оптимизации маршрута движения в условиях ограниченной видимости и динамически изменяемого снежного покрова (пример также приведен на рис. 4);

- базирование и обслуживание ОТП – легкого ТС с электрическим приводом на базе ОТИ в условиях низких температур и ограниченной мощности доступной для восполнения запаса электроэнергии в батареях ОТП (пример также приведен на рис. 3).



Рис. 5. Замер толщины снежного покрова на леднике Гара-Баши на г. Эльбрус на высоте 4000 м исследователями ИГРАН и взятие проб донного грунта на о. Дикое, Мурманская обл., исследователями ИППЭС КНЦ РАН

3. Распределенная сеть полигонов как объект исследования для моделирования подходов к решению проблемы согласования интересов

Приведённый перечень сценариев явился результатом согласования интересов на основе методов активного планирования – имплементации принципа открытого управления из теории открытых систем [5] на основе следующих двух вопросов:

Вопрос 1. Со стороны ИПУ РАН как исследователей ОТП: какие возможности может предоставить региональная организация РАН для испытания электротранспорта в сложных климатических и ландшафтных условиях?

Вопрос 2. Со стороны региональной организации РАН: чем может быть полезен электрический транспорт для решения задач обеспечения научных исследований, проводимых организацией РАН?

При этом основой в рамках попытки внедрения подходов активного планирования стал принцип делегирования (см. подробнее в [5]): в ходе проекта представителям каждой из трех организаций выделялся некоторый бюджет, который ими расходовался на свое усмотрение для организации работ по анализу возможностей их ОМТБ в рамках ответа на вопрос 1, при необходимости – для организации работ по их модернизации и на организационные мероприятия, связанные с подготовкой к реализации опытных сценариев в рамках ответа на вопрос 2. В ходе реализации самих сценариев представители ИПУ РАН демонстрировали возможности ОТП и осуществляли сбор данных с ОИИ для проведения собственных научных экспериментов (см. пример на рис. б), в то время как представители организаций осуществляли свою регулярную деятельность при ее поддержке. При этом на базе как отдельного ОТП, так и всей группировки с помощью набора разнородных ОИИ одновременно осуществлялся сбор для ряда отдельных экспериментов, часть которых будет описана далее в разделе 4. То есть каждое ОТП выступало в роли «мобильного» ЦКП как для задач региональной организации, так и для исследователей ИПУ РАН по их теоретическим исследованиям. При этом ОМТБ каждой организации рассматривалась как ЦКП по исследованию характеристик движения одиночных транспортных

средств и гетерогенных групп транспортных средств с электрическим приводом в сложных климатических и ландшафтных условиях, а отдельные ОИИ – как ЦКП приборного уровня, предоставляющие данные для разных исследовательских задач.

В рамках проекта проведенный эксперимент в целом следует признать успешным.

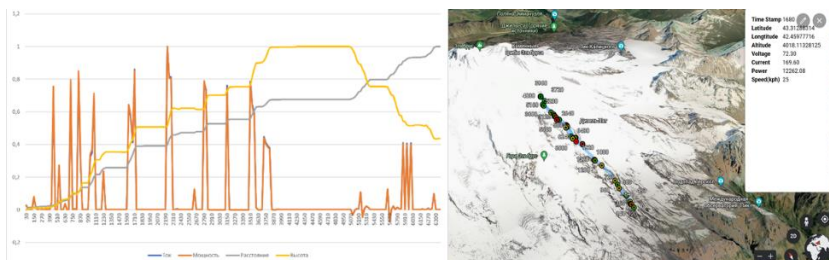


Рис. 6. Пример результатов измерений совместных характеристик движения и расхода электрической энергии, их отображения на 3D-карте местности

Анализ ОМТБ КНЦ РАН позволил определить перспективные зоны базирования и работы техники на базе ПАБСИ КБНЦ РАН и начать разработку программы на их основе для подготовки к экспедиции на ОМТБ КБНЦ РАН, расположенным на о. Шпицберген в п. Баренцбург. Был рассмотрен ОМТБ КБНЦ РАН в районе г. Эльбрус – так называемый «домик Географов», расположенный на плато Гара-Баши на высоте 3800 м над уровнем моря (рис. 7), что позволило бы осуществлять работу с техникой, передвигающейся по снежному покрову (а это был первоочередной тип ОТП в рамках проекта) практически в круглогодичном режиме. Его анализ показал, что он находится в плачевном состоянии и, с учетом целого ряда выявленных в рамках анализа юридических и инфраструктурных проблем, принято решение о подготовке программы создания нового объекта ЦКП консорциумом научных образовательных организаций, куда помимо организаций из КБНЦ РАН входят ИГРАН и ИПУ РАН.

На базе ОМТБ САО РАН удалось развернуть полноценную инфраструктуру полигона, что будет более подробно освещено в разделе 5.

На уровне сбора данных с группировки ОТП, дополненной БПЛА, удалось осуществлять сбор данных сразу для серии экспериментов, более детальное описание которых приведено в разделе 4.



Рис. 7. С.н.с. ИГРАН, к.г.н. Лаврентьев И.И. перед выездом на полевые гляциологические работы с применением снегоцикла. ОМТБ КБНЦ РАН – внутри сугроба на заднем плане

Переходя на уровень формальных подходов, с помощью которых в первую очередь можно иллюстрировать наблюдаемый эффект, возможно обратиться к следующей модифицированной модели использования коллективного блага [8].

Для отдельного узла РСП опишем игру в нормальной форме n агентов ($N = \{1, \dots, n\}$) с целевыми функциями

$$(1) f_i(\theta, x, u) = x_i(\theta u - \sum_{j \in N} x_j)$$

и множеством допустимых действий на проведение собственных исследований $x_i \in [0, +\infty)$, $i \in N$. Параметр $\theta \in R_1^+$ и управление $u \in R_1^+$ характеризуют «общий ресурс» системы – способность приносить участникам системы полезность от выбираемых действий. В нашей интерпретации это ЦКП и проводимые на его основе исследования. Далее будем предполагать, что владельцем ЦКП является агент 1.

В рамках игры в нормальной форме, когда все агенты осведомлены обо всех параметрах и принимают решения одновременно и независимо, получаем, что равновесие Нэша имеет вид

$x_i^*(\theta, u) = \frac{u\theta}{n+1}$ [8]. При этом значение целевой функции любого агента имеет вид

$$(2) f_i(\theta, x^*, u) = (u\theta)^2(n+1)^{-2}.$$

Теперь рассмотрим ситуацию, когда к ЦКП хочет присоединиться еще один агент $i = n + 1$. Нетрудно увидеть, что в этом случае выигрыш любого другого агента в соответствии с (2) уменьшится. То есть все агенты, которые уже эксплуатируют ЦКП, включая его владельца, не заинтересованы в присоединении нового агента. Возможно ли сделать так, чтобы присоединение нового агента было согласованно для всех?

Модифицируем целевую функцию (1) для агентов 1 и $n + 1$ следующим образом:

$$(3) f_1(\theta, x, u) = x_1(\theta(u + u_1) - \sum_{j \in NU\{n+1\}} x_j) + u_{n+1} - u_1,$$

$$(4) f_{n+1}(\theta, x, u) = x_{n+1}(\theta(u + u_1) - \sum_{j \in NU\{n+1\}} x_j) - u_{n+1},$$

где $u_{n+1} \in [0, +\infty)$ будет отражать ту часть полезности от доступа к ЦКП, которую агент $n + 1$ передает владельцу ЦКП для его развития, а $u_1 \in [0, u_{n+1}]$ – какую его часть владелец ЦКП в действительности пускает в развитие ЦКП.

При этом будем предполагать, что новый пользователь выбирает значение u_{n+1} в рамках иерархической игры Г1 [8], делегируя [5] владельцу ЦКП принять решение о том, какую часть переданного управления пустить на развитие ЦКП, предполагая, что принятое последним решение о развитии ЦКП за счет этих ресурсов подразумевает допуск нового пользователя к его использованию.

Тогда из (2) с учетом модифицированных функций полезности агентов владельца ЦКП (3) и нового пользователя ЦКП (4) можно получить условия согласованности их интересов:

$$(5) (u\theta)^2(n+1)^{-2} + u_{n+1} \leq (u + u_{n+1})^2\theta^2(n+2)^{-2},$$

$$(6) (u + u_{n+1})^2\theta^2(n+2)^{-2} - u_{n+1} \geq 0,$$

где левая часть условия (5) отражает ситуацию, в которой агент 1 получил ресурсы на развитие ЦКП от агента $n + 1$, но не использовал их «по назначению» и не допустил последнего к пользованию ЦКП, а правая – что ресурсы полностью пущены на развитие ЦКП. Условие (6) отражает тот факт, что допуск нового пользователя к ЦКП для него индивидуально рационально. Не трудно

увидеть, что выполнение (5) достаточно для выполнения (6) и всегда найдется такое $u_{n+1} \geq \frac{u}{n+1}$, что выполнено (5). А из выполнения (5) также следует, что все остальные пользователи ЦКП тоже будут заинтересованы в таком присоединении нового агента.

Таким образом, предложенная достаточно простая иллюстративная модель показывает, что между владельцем ЦКП и потенциальным его пользователем возможно согласованное взаимодействие, в рамках которого последний выделяет ресурсы на развитие ЦКП, делегируя первому самостоятельно принимать решение об их использовании, а первый, имея возможность распоряжаться ими на свое усмотрение, пустит их все на развитие ЦКП и допустит потенциального пользователя к работе с данным ЦКП. Именно такая ситуация и наблюдалась в ходе реализации проекта.

4. Сценарии исследования характеристик движения опытных транспортных платформ по пересеченной местности

В ходе проекта разрабатывался и апробировался комплекс сценариев сбора данных о характеристиках движения ОТП разного типа по снежному покрову.

Во-первых, осуществлялся сбор данных для повышения степени автономности информационной системы для динамичных объектов с бортовыми навигационными комплексами [14], суть которых заключается в интеграции данных, собираемых с бортовых навигационных систем, таких как LIDAR, камеры, инерциальные сенсоры, GNSS, и элементов интеллектуальных транспортных систем, таких как базовые станции RTK, и за счет Калмановской фильтрации обеспечивающих повышение точности положения ОТП. Пример работы с данными приведен на рис. 8, где видно, как работа алгоритма повышает точность оценки траектории, предоставляемой исходно одним из сенсоров (красная линия) за счет интеграции с базовой станцией РТК и дополнительным прибором, установленным на этом же ОТП (голубая линия).



Рис. 8. Повышение точности позиционирования ОТП за счет интеграции данных разных приемников

Во-вторых, исследовалась возможность определения режимов движения ОТП за счет размещения на нем сети GNSS-приемников: в качестве пилотного сценария оценивались различные комбинации размещения GNSS-приемников высокого класса точности на снегоцикле (рис. 9).

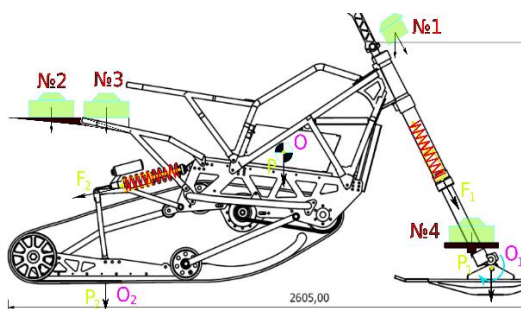


Рис. 9. №1–№4 – позиции размещения GNSS-приемников на снегоцикле

В ходе экспериментов удалось показать, что, совмещая данные даже с пары высокоточных приемников с данными силовой установки ОТП (потребляемая ей электрическая мощность), возможно идентифицировать некоторые особые режимы движения ОТП, такие как «самозакапывание» – заглупление снегоцикла на одном месте – или выход на режим «глиссирования» – быстрого движения по снежной поверхности, когда гусеница практически

не заглубляется, следуя по поверхности следа, проложенного лыжей снегоцикла [11].

На рис. 10 приведен пример собираемых данных при расположении приемников в позициях 1 (на руле) и 3 (на багажнике) снегоцикла. В зоне, выделенной пунктиром, ОТП заглублялось в снег, в правой части графика высота приемника на хвосте снегоцикла «стабилизировалась» с выходом на режим «глиссирования».

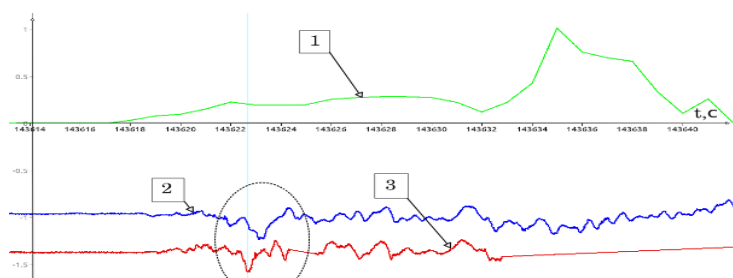


Рис. 10. Движение по «окружности». Кривая 1 – нормированная мощность; 2 – высота приемника №1 (м); 3 – высота приемника №2 (м)

При сопоставлении собираемых данных с визуальным рядом регистрации эксперимента было показано, что математическое моделирование и анализ эффективности управления такими подвижными объектами затрудняется тем, что необходимо учитывать движения самого субъекта, пилотирующего данный объект, которые часто имеют сложную динамику, в связи с чем в ходе проекта были апробированы сценарии сбора данных о положении тела пилота ОТП на основе сети инерциальных датчиков, размещаемых на теле [1, 2].

На рис. 11 приведены фрагменты результатов анализа собранных данных. В центре находится цифровая модель пилота, отражающая положение его тела на основе результатов работы модели SlimeVR, в правом нижнем кадре – результат визуального распознавания движений тела человека с помощью бортового видеорегистратора, расположенного на руле снегоцикла, управляе-

мого пилотом, на верхнем правом – результат визуального распознавания движений тела человека с помощью бортового видеорежистратора, расположенного на руле стационарно стоящего снегохода.



Рис. 11. Сбор данных по регистрации движения тела человека

В заключение данного раздела следует отметить, что рис. 11 наглядно иллюстрирует перспективы взаимной локализации и регистрации движений всех участников гетерогенной группы. В кадре представлен момент, запечатленный одновременно несколькими бортовыми видеорежистраторами.

Правое левое изображение, как уже было упомянуто выше, – регистратор на руле снегоцикла: камера, снимающая в режиме 360° во всех направлениях, что позволяет регистрировать не только положение пилота, но и все события, происходящие вокруг на незначительном удалении от нее, включая движение остальных участников гетерогенной группы. В кадре на нем видно относительное положение стационарно расположенного снегохода, на котором в качестве ОИИ располагается GNSS-приемник, осуществляющий сбор данных в режиме RTK. При этом на самом снегоцикле размещена аппаратура для сбора данных в рамках описанных ранее в разделе двух экспериментов.

Кадр, записанный аналогичной бортовой камерой, размещенной на руле снегохода, регистрирует не только движение снегоцикла, но и позволяет фиксировать полеты БПЛА. На нем красным отмечено положение малого БПЛА типа FPV, запись с камеры которого представлена в левом правом кадре рис. 11, на котором отражено взаимное положение двух наземных ОТП группы – снегоцикла и снегохода.

Наконец, в левом нижнем кадре рис. 11 отражена запись с бортовой камеры еще одного БПЛА, удерживающего заранее заданную позицию и осуществляющего в автоматическом режиме слежение за снегоциклом. На этом кадре видны сразу три подвижных объекта группы: обе наземных ОТП и упомянутый ранее малый БПЛА типа FPV, также отмеченный красным на рисунке.

5. Полевые работы на базе инфраструктуры, пример САО РАН

В 2023 году специалистами ИПУ РАН и САО РАН проводился анализ возможностей материально-технической базы (далее – МТБ) САО РАН для решения задач обеспечения полевых испытаний группировок транспортных средств на электрическом приводе и допустимых режимов ее использования.

В рамках полевого выезда к объектам МТБ БТА, основной уникальной приборной установки САО РАН, проводилась апробация сценариев:

1. Применения легких внедорожных транспортных средств для перемещения по снежному покрову, на примере снегоциклов, для решения задач обслуживания инфраструктуры БТА в зимний период.

2. Проведения полевых испытаний группировок транспортных средств на электрическом приводе, предназначенных для перемещения по снежному покрову в условиях сложного рельефа.

По результатам полевого выезда были определены ОМТБ, пригодные для обеспечения задач хранения и обслуживания ОТП и зоны территории, пригодные для проведения экспериментов, и ОМТБ, для обслуживания которых целесообразно применение

исследуемых ОТП. В частности, по результатам анализа была обоснована целесообразность проведения ряда мероприятий по модернизации отдельных помещений технического блока БТА, не используемых в настоящее время в связи с повышением энергоэффективности систем БТА и значительным уменьшением размеров систем управления БТА в рамках технологического прогресса. В то же время электрические мощности и технический парк оборудования, размещенного непосредственно у БТА, позволяет осуществлять зарядку и хранение значительного парка электрических ОТП, что актуально для проведения полевых экспериментов по групповому движению внедорожных транспортных платформ на электрическом приводе.

По результатам проведенного анализа ОМТБ было принято решение о сооружении изолированного бокса, позволяющего поддерживать необходимый температурный диапазон для комфортного обслуживания и хранения техники, и проведен целый ряд подготовительных работ.

По результатам анализа территории БТА САО РАН и прилегающих территорий были определены:

- непосредственно территория САО РАН (рис. 12, участок 6), исключающая доступ сторонних ТС и посторонних лиц, пригодная для проведения полевых испытаний группировок ОТП и размещения высокоточных ОИИ;
- территории, прилегающие к территории САО РАН, с участками сложного рельефа и отсутствующими очагами лавинной опасности, которые в зимний период не используются для народнохозяйственной деятельности – участки 432/4, 205/1, 205/2, 195 и 379 (рис. 12) общей площадью более 20 га, на которых возможна регистрация движения группировок ОТП с применением ОИИ, размещаемой на участке 6.

В качестве локальных сценариев были рассмотрены задачи доступа к удаленным объектам инфраструктуры БТА – насосным станциям и накопительному резервуару. В зимнее время транспортная доступность к данным объектам затруднена, а регулярная расчистка маршрута нецелесообразна в силу отсутствия необходимости регулярного посещения данного объекта и значитель-

ного переноса снежных масс в силу особенностей рельефа. Определены основные параметры маршрутов – протяженность маршрута, профиль, ориентировочное время в пути (см. рис. 13).

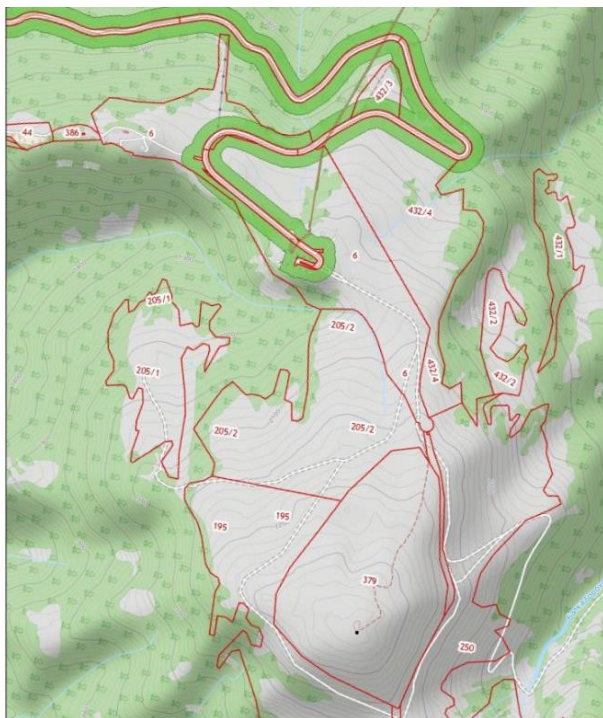


Рис. 12. Территориальная схема в районе БТА САО РАН

В качестве ограничений по режиму использования выделены:

1. Запрет на проведение экспериментов в темное время суток для исключения светового воздействия на уникальную научную установку во время ее функционирования.

2. Ограниченность возможности применения БПЛА из-за особенности ветровых условий и рельефа местности в зимний период.

3. Ограниченный период наличия устойчивого снежного покрова.



Рис. 13. Схема движения к насосной станции БТА CAO РАН в зимних условиях

На основе проведенного анализа с учетом перечисленных выше ограничений был сделан вывод о перспективности применения инфраструктуры обслуживания уникальной приборной установки БТА как центра коллективного пользования (ЦКП) объектами экспериментально-стендовой и полигонной базы для решения задач экспериментальной проверки решений по управлению распределенными организационно-техническими системами, образуемыми гетерогенными группами подвижных объектов при движении по снежному покрову.

В рамках полевого выезда 2024 г. была проведена апробация ОМТБ, подготовленных специалистами CAO РАН для хранения и обслуживания парка ОТП.

В рамках решения задач обслуживания инфраструктуры БТА в зимний период был осуществлен пробный выезд к нижней насосной станции с участием представителей инженерно-технического персонала CAO РАН (рис. 14)

В рамках отработки концепции «vehicle-to-grid» (V2G) применения электрического транспорта как источников питания в сети [20] в условиях отсутствия линий электропередач, связывающих объекты микрогрид, были проведены пробные работы по

обслуживанию ОМТБ с применением электрического инструмента, питаемого от энергосистемы ОТП (рис. 15).

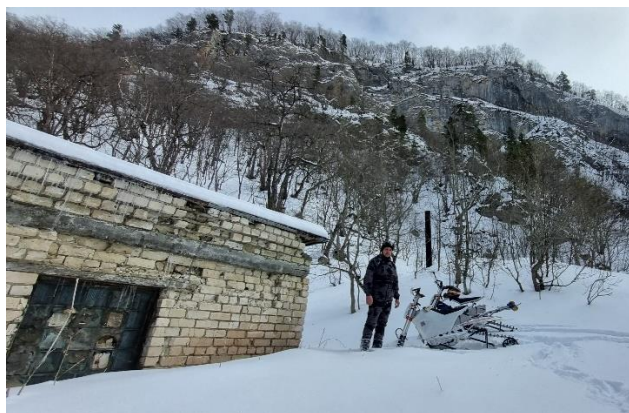


Рис. 14. На нижней насосной станции БТА САО РАН



Рис. 15. Электрический транспорт как элемент энергосистемы для труднодоступной местности

Был проведен эксперимент по использованию ОТП как источников резервного питания для помещений технического блока, что в настоящее время является крайне актуальным направлением исследований для поселений в географических локациях со сложными климатическими и ландшафтными услови-

ями, см., например, [16], являясь крайне существенным дополнением к моделированию электротранспорта «последней мили» в арктических условиях в рамках концепции «Теплого города», см., например, [12].

По направлению проведения полевых испытаний группировок транспортных средств на электрическом приводе, предназначенных для перемещения по снежному покрову в условиях сложного рельефа, исследователями ИПУ РАН была реализована серия экспериментов на основе сценариев, отработанных на территории ИПУ РАН в 2023 г и описанных в разделе 4 (см. рис. 16) с использованием ОИИ как стационарного базирования, так и на размещаемой на вспомогательных ОТП.



Рис. 16. Сбор данных на территории БТА САО РАН

6. Дальнейшие направления развития проекта в контексте взаимодействия по линии РАН

По результатам проекта в 2023 и 2024 годах можно с уверенностью утверждать, что на базе инфраструктуры организаций РАН был реализован полноценный пилот отдельного узла распределенной сети полигонов для отработки сценариев применения гетерогенных групп транспортных средств с электрическим приводом в сложных климатических и ландшафтных условиях. При этом наиболее перспективной для дальнейшего развития

в качестве «пилотного узла» была выбрана инфраструктура уникальной приборной установки БТА, входящей в ЦКП САО РАН.

Созданная на ней инфраструктура базирования и обслуживания ОТП с электрическим приводом позволит в дальнейшем осуществлять проведение полевых исследований не только с парком ТС, доставляемых к месту проведения экспериментов, но и размещаемых в данном узле на постоянной основе. В случае БТА возможность постоянного базирования и обслуживания ОТП является особенно актуальной, так как в рамках проекта был определен целый ряд сценариев применения подобной техники для решения задач обслуживания инфраструктуры уникальных приборных установок. Причем не только в зимний период: задачи из области V2G, такие как автономное питание электрического инструмента при обслуживании объектов, расположенных в труднодоступной местности, или обеспечения резервного бесперебойного питания БТА – крайне актуальной задачи в контексте настоящего состояния энергосистемы региона расположения объекта.

Кроме того, перспективным направлением дальнейшего развития исследований в сфере разработки, апробации и внедрения интеллектуальных технологий управления элементами научно-технической инфраструктуры и приборной базы уникальных научных установок с целью повышения энергоэффективности и минимизации воздействия на окружающую среду может являться проект по организации челночной связи п. Нижний Архыз с БТА за счет дорожных ТС с электрическим приводом – там, где сейчас применяется парк «классических» автомобилей с ДВС.

При этом возможность постоянного базирования и проведения экспериментов с гетерогенными группами ОТП с электрическим приводом на базе инфраструктуры БТА в совокупности с ее изолированностью и компактностью размещения открывает возможность ее применения не только по своему основному назначению в области астрономических наблюдений. Но и междисциплинарного, в других отраслях науки, в частности – теории управления, по вопросам исследования проблем функционирования гетерогенных групп подвижных транспортных средств как в формате коллаборативного взаимодействия на уровне «чело-

век – автономное транспортное средство» и в формате смешанных групп, так и гетерогенных групп мобильных роботов [29]. БТА может потенциально рассматриваться как крупный объект научной инфраструктуры или центр коллективного пользования для более широкого перечня отраслей науки в конкурсах Российского научного фонда и других грантовых программах.

За счет расширения парка ОТП, доступных для исследования в рамках проекта РСП, благодаря сотрудничеству с МФТИ по теме «Разработка, апробация и внедрение интеллектуальных технологий управления объектами и уникальной инфраструктурой в области автономных и полуавтономных транспортных средств с электрическим приводом и полигонов для их испытаний с целью повышения энергоэффективности и минимизации воздействия на окружающую среду» с объектами с многомоторной схемой силового привода и возможностью эксплуатации не только в зимний сезон, становится возможной апробация наработок специалистов ИПУ РАН по управлению многомоторными подвижными объектами с электрическим приводом на данных платформах, см., например, [29].

Отдельно следует выделить проблематику одновременного создания цифровых двойников как подвижных объектов, так и среды, в которой осуществляется движение объекта, для чего планируется интеграция массива собираемых в рамках проекта данных в среду виртуального моделирования, развиваемую в ИПУ РАН [29]. Это позволит в дальнейшем проводить анализ и сопоставление плановых и реализованных траекторий движения гетерогенных групп подвижных объектов в гетерогенных средах.

Совокупность проводимых исследований в дальнейшем позволит получить данные для разработки систем управления движения легких ТС (чей вес сопоставим с весом человека) в автономных и полуавтономных режимах в условиях сложной поверхности и рельефа.

В рамках проекта было определено, что, несмотря на значительное расстояние между планируемой к созданию международной арктической станцией «Снежинка», планируемой к созданию на Полярном Урале [6] и территорией размещения БТА, есть много общих характеристик с точки зрения климата и рельефа, что делает актуальным на период строительства первого объекта,

развертывание полигона по обработке отдельных элементов научной программы и сценариев эксплуатации объектов научной инфраструктуры на базе БГА.

Следующим немаловажным направлением, в котором активно функционирует в настоящее время САО РАН, является просветительская деятельность. Дополнение и диверсификация образовательных и популяризационных мероприятий в области астрономии комплиментарными направлениями, в нашем случае – созданием тестово-ознакомительной площадки для внедорожных экспериментальных транспортных платформ с электрическим приводом, может быть очень перспективным и актуальным проектом в области экологического просвещения населения и развития электротранспорта на территории РФ.

7. Заключение

Реализованный в 23–24 годах проект по апробации элементов эскизной концепции распределенной сети полигонов как центров коллективного пользования на базе существующей инфраструктуры научных организаций показал перспективность предлагаемого подхода к повышению степени эффективности использования существующей материально-технической базы и научно-технической инфраструктуры организаций РАН, расположенных в регионах со сложным климатическими и ландшафтными условиями, включая инфраструктуру обслуживания уникальных приборных установок за счет ее адаптации к решению задач экспериментальной проверки решений по управлению распределенными организационно-техническими системами, образуемыми гетерогенными группами подвижных объектов.

Помимо того, что за счет достаточно незначительных вложений существующая инфраструктура успешно может быть модернизирована для базирования и обслуживания опытных платформ для апробации технических решений, сами организации получают возможность апробации новых подходов к решению уже существующих у них задач обеспечения проведения полевых исследований в интересах научных организаций и эксплуатации приборной базы уникальных научных установок.

Дальнейшие перспективы по данному направлению включают в себя, во-первых, расширение сети организаций, на базе которых могут разворачиваться ее «узлы», расширяя географию, сезонность, перечень сценариев проведения полевых исследований в интересах научных организаций и эксплуатации приборной базы уникальных научных установок при поддержке электрического транспорта.

Во-вторых, как было отмечено в статье, на примере одного узла целесообразно сосредоточиться на реализации элементов программы полевых исследований по сбору данных и опытной апробации результатов теоретических исследований специалистов ИПУ РАН по проблемам разработки методов анализа движения и синтеза управления для подвижных объектов в сложно моделируемых средах, управления объектами инфраструктурной и транспортной энергетики, механизмов управления организационно-техническими системами, таких как:

1. Модели и методы согласованного планирования сценариев применения как одиночных подвижных объектов, так и гетерогенных групп транспортных средств разной степени автономности как элементов малой энергосистемы как в рамках концепций «подвижный объект-инфраструктурный объект» (V2B) и «подвижный объект – сеть» (V2G), так и в рамках концепции отдельного транспортного средства как сети независимых потребителей (мультимоторные ТС, бортовые системы, сопутствующая нагрузка) и источников и накопителей электроэнергии разного типа (аккумуляторные батареи, ДВС генераторы, водородные топливные элементы, рекуперативные системы сбора энергии);

2. Методы идентификации моделей и синтеза управления для подвижных объектов при движении по нежестким поверхностям с изменяемыми характеристиками, например, снежного покрова и естественных грунтов разного типа, с помощью сетей ГНСС- (GNSS-) приемников, инерциальных измерительных сенсоров (IMU) и характеристик функционирования силовых и управляющих приводов, их интеграция с методами одновременной локализации и картографии (SLAM);

3. Методы анализа и синтеза моделей человека как значимой составляющей эргатических систем «пилот – подвижный

объект» для транспортных средств, сопоставимых по массе с весом человека, таких как мотоциклы, легкие вездеходы, снегоходы и получившие в последнее время большое распространение так называемые средства индивидуальной мобильности.

Литература

1. БАЗЕНКОВ Н.И. *Моделирование движений человека: методы и актуальные задачи* // Труды 17-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2021, Москва). – М.: ИПУ РАН, 2021. – С. 295–300.
2. БАЗЕНКОВ Н.И., ПЫЖЬЯНОВ А.А. *Система сбора данных для реконструкции движения мотоциклиста* // Сборник докладов XIV Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2024). – М.: ИПУ РАН, 2024. – С. 1961–1964.
3. БИРИН Д.А., МЕЩЕРЯКОВ Р.В., ТУРОВСКИЙ Я.А. *Проблемы управления группой ртк* // XVI Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023). – 2023. – С. 287–290.
4. БЛОХИН А.Н., ГОЛОВ Д.А., РЯБОВ А.Г. *Оценка эксплуатационных свойств вездеходного транспортного средства, работающего на водороде* // Механика машин, механизмов и материалов. – 2024. – №2(67). – С. 15–22.
5. БУРКОВ В.Н., ЕНАЛЕЕВ А.К., КОРГИН Н.А. *Согласованность и неманипулируемость механизмов организационного управления: текущее состояние проблемы, ретроспектива, перспективы развития теоретических исследований* // Автоматика и телемеханика. – 2021. – №7. – С. 5–37.
6. ВАСИЛЬЕВ Ю.В. *Арктический полигон водородных технологий «Снежинка»* // Топливные элементы и энергоустановки на их основе: Девятая всероссийская конференция с международным участием, Черноголовка, 20–23 июня 2022 года. – Черноголовка: Изд-во Черноголовка, 2022. – С. 12.
7. КОРГИН Н.А., МЕЩЕРЯКОВ Р.В. *Концепция проекта по созданию распределенной сети полигонов для отработки сценариев применения гетерогенных групп транспортных*

- средств с электрическим приводом в сложных климатических и ландшафтных условиях // Труды 11-й Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная си-нергетика»: сборник научных трудов (п. Нижний Архыз, ССПС-2022). – Ростов н/Д.: Южный федеральный универси-тет, 2022. – С. 197–202.*
8. КОРГИН Н.А., НОВИКОВ Д.А. *Иерархические и рефлексив-ные игры // Теория управления (дополнительные главы). – М.: Издательская группа URSS, ООО «ЛЕНАНД», 2019. – С. 510–546*
 9. КРАВЧУК С.Г., КОРГИН Н.А., КЛЮСОВ Н.В. и др. *Про-ектно-образовательный эксперимент в арктическом ди-зайне: формирование облика инновационного снегоходного транспорта // Техническая эстетика и дизайн исследова-ния. – 2023. – Т. 5, №1. – С. 56–68.*
 10. ЛАВРЕНТЬЕВ И.И. и др. *Гляциологические исследования Института географии РАН на Эльбрусе в 2023 г. // Лёд и снег. – 2024. – Т. 63, №. 4. – С. 553–557.*
 11. МОРОЗОВ Ю.В., КОРГИН Н.А. *Особенности постобра-ботки GNSS-позиции на электрическом снегоходе одноко-лейной компоновки при движении по снегу // Труды XVI Все-российской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2023). – 2023. – С. 195–197.*
 12. ПРОКОПОВА С.М. *«Теплый город» в Арктике: адаптация, оптимизация феноменология // Архитектон: известия ву-зов. – 2022. – №2(78).*
 13. ТРЕФИЛОВ П.М. *Алгоритм интеграции сенсорных данных для оценки состояния автономных роботов в интеллекту-альной транспортной среде // Управление большими систе-мами. – 2024. – Вып. 112. – С. 257–273.*
 14. ТРЕФИЛОВ П.М., КОРГИН Н.А. *Повышение степени авто-номности информационной системы для динамических объек-тов с бортовыми навигационными комплексами // Сборник до-кладов XIV Всероссийского совещания по проблемам управле-ния (ВСПУ-2024). – М.: ИПУ РАН, 2024. – С. 1270–1274.*

15. ALDIN H.N.S. et al. *A comprehensive review of energy harvesting and routing strategies for IoT sensors sustainability and communication technology* // Sensors International. – 2024. – Vol. 5. – P. 100258.
16. BREMDAL B. et al. *E-Mobility and Batteries—A Business Case for Flexibility in the Arctic Region* // World Electric Vehicle Journal. – 2023. – Vol. 14, No. 3. – P. 61.
17. DADMAN S., BREMDAL B., TANGRAND K. *The role of electric snowmobiles and rooftop energy production in the Arctic: The case of Longyearbyen* // J. Clean Energy Technol. – 2021. – Vol. 9. – P. 46–53.
18. DIAKOV A.S., POZDEEV A.V., NOVIKOV V.V. *The main directions of the development of snowmobiles in the Russian Federation* // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences – 2018. – Vol. 224. – P. 02080.
19. HANDWERKER M., WELLNITZ J., MARZBANI H. *Comparison of hydrogen powertrains with the battery powered electric vehicle and investigation of small-scale local hydrogen production using renewable energy* // Hydrogen. – 2021. – Vol. 2, No. 1. – P. 76–100.
20. JOSEPH A., BALACHANDRA P. *Energy internet, the future electricity system: Overview, concept, model structure, and mechanism* // Energies. – 2020. – Vol 13, No. 16. – P. 4242.
21. LI N., LUKSZO Z., SCHMITZ J. *An approach for sizing a PV–battery–electrolyzer–fuel cell energy system: A case study at a field lab* // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2023. – Vol. 181. – P. 113308.
22. MAZZEO D. et al. *A smart algorithm to optimally manage the charging strategy of the Home to Vehicle (H2V) and Vehicle to Home (V2H) technologies in an off-grid home powered by renewable sources* // Energy Systems. – 2024. – Vol. 15, No. 2. – P. 715–752.
23. PERTL P. et al. *Development of hydrogen powered fuel cell e-snowmobiles* // SAE Technical Paper. – 2020. – No. 2019-32-0555.
24. SALAMA M.A. et al. *UGV with a distributed electric driveline: Controlling for maximum slip energy efficiency on stochastic terrain* // Journal of Terramechanics. – 2018. – Vol. 79. – P. 41–57.

25. SATTAROV R., AMINEV R., SALATOV N. *Simulation of Snowmobiles-Small Electric Vehicles with a Track* // Int. Ural Conf. on Electrical Power Engineering (UralCon-2024). – IEEE, 2024. – P. 864–868.
26. SCHMIDT S. *Use of battery swapping for improving environmental balance and price-performance ratio of electric vehicles* // ETransportation. – 2021. – Vol. 9. – P. 100128.
27. SLUKOVSKII Z. et al. *Pristine Tundra Lakes in the North of Murmansk Region (Arctic): Geochemistry of Sediments, Pollution Assessment and Heavy Metal Forms* // Int. Journal of Environmental Research. – 2024. – Vol. 18, No. 4. – P. 57.1–57.17.
28. SOVACOOOL B. K. et al. *Actors, business models, and innovation activity systems for vehicle-to-grid (V2G) technology: A comprehensive review* // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2020. – Vol. 131. – P. 109963.
29. TREFILOV P., KULAGIN K., MAMCHENKO M. *Developing a Flight Mission Simulator in the Context of UAVs Group Control* // Proc. of the 13th Int. Conf. "Management of Large-Scale System Development" (MLSD-2020). – Moscow: IEEE, 2020. – P. 1–4.
30. XIAO X. et al. *Winter tourism and climate change: Exploring local and non-local snowmobilers' perceptions of climate change and adaptation behaviors* // Journal of Outdoor Recreation and Tourism. – 2020. – Vol. 31. – P. 100299.

THE CONCEPT OF A DISTRIBUTED NETWORK OF TEST GROUNDS FOR SCENARIOS' ASSESSMENT FOR THE USE OF HETEROGENEOUS GROUPS OF ELECTRIC VEHICLES IN COMPLICATED CLIMATE AND TERRAIN ENVIRONMENT - IMPLEMENTATION EXAMPLES AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Nikolay Korgin, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, (nkorgin@ipu.ru).

Roman Meshcheryakov, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, (mrv@ipu.ru).

Abstract: The article describes a project of the distributed network of test grounds for scenarios' assessment for the use of heterogeneous groups of electric vehicles in complicated climate and terrain environment for field research support in the interests of scientific organizations and operating the instrumentation base of unique scientific installations and the prospects for its further development. The article describes a general approach based on the concept of active planning from the theory of organizational systems, the results of experimental testing of individual elements of the concept on three pilot network nodes based on the infrastructure of regional centers of the RAS located in regions with complex climatic and landscape conditions, and directions for further development of the project. A formal mathematical model is proposed that allows describing the process of coordinating interests within a single network node as a center for collective use with expandable functionality and number of users. In conclusion, a further program of scientific research is proposed on the problem of the functioning of a heterogeneous group of electric-powered vehicles as elements of a small distributed energy system based on the developing network of testing grounds.

Keywords: electric transport, group control, organizational and technical system, shared use center.

УДК 007.5

ББК 39.1

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Б.Р. Андриевским.*

Поступила в редакцию 11.12.2024.

Опубликована 31.01.2025.