

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА НА УРОВНЕ РЕГИОНА

Д. Ю. Каталевский^{а, б}

Т. Р. Гареев^б

^а Российская академия народного хозяйства
и государственной службы при Президенте РФ,
119571, Россия, Москва, Просп. Вернадского, 82

^б Сколковский институт науки и технологий,
121205, Россия, Москва, Большой бульвар, 30/1

Поступила в редакцию 19.02.2020 г.

doi: 10.5922/2079-8555-2020-2-8

© Каталевский Д. Ю., Гареев Т. Р., 2020

Глобальное распространение электромобилей является примером появления технологии, имеющей многогранные последствия для региональной экономики как с точки зрения адаптации производственных, транспортных и энергетических систем, так и с точки зрения их пространственной оптимизации. Опыт передовых регионов мира, в том числе стран Балтийского региона, свидетельствует о том, что в долгосрочной перспективе электротранспорт может вытеснить традиционные транспортные технологии. В статье предлагается подход к имитационному моделированию распространения электромобилей в регионе (на основе оригинальной модели системной динамики). Между парком электромобилей и зарядной инфраструктурой существуют системные обратные связи, учесть которые позволяет системно-динамический подход. Этот подход особенно актуален для определения инструментов стимулирования спроса в регионах с низким уровнем развития электротранспорта и зарядной инфраструктуры, для которых не имеется достаточных данных для применения эконометрических методов прогнозирования спроса. Предлагаемая модель апробируется на реальных и оценочных данных по Калининградской области, которая в силу своих пространственных характеристик является уникальным полигоном для отработки имитационных моделей регионального масштаба. Данная модель построена в среде AnyLogic. При этом мы подробно обсуждаем особенности модели, принятые допущения и направления ее дальнейшего развития, в том числе возможности построения гибридных моделей, включающих элементы агентного моделирования и пространственной оптимизации

Ключевые слова:

имитационное моделирование, системная динамика, электротранспорт, электромобили, зарядная инфраструктура, регион, прогнозирование спроса, стимулирование спроса, модель Басса, AnyLogic

Для цитирования: Каталевский Д. Ю., Гареев Т. Р. Имитационное моделирование для прогнозирования развития автомобильного электротранспорта на уровне региона // Балтийский регион. 2020. Т. 12, № 2. С. 118–139. doi: 10.5922/2079-8555-2020-2-8.

Введение

Активное развитие электротранспорта происходит в последние 10 лет, на конец 2018 года в мире насчитывалось свыше 5 млн электрокаров¹, и по прогнозам еще через 10 лет — к 2030 году — каждый третий продаваемый автомобиль будет оснащен электродвигателем. Это стало возможным благодаря технологическим прорывам в области разработки и производства аккумуляторных батарей — прежде всего литий-ионных аккумуляторов [1].

Индивидуальный транспорт на электрической тяге является естественным субститутом для транспорта, основанного на ДВС (двигателях внутреннего сгорания). Известно, что он имеет ряд технологических преимуществ (при условии использования) — с точки зрения стоимости эксплуатации, экологичности, а также простоты в обслуживании [2].

Однако при нынешнем уровне развития технологии индивидуальный электротранспорт имеет ряд недостатков, в первую очередь сложности с эксплуатацией литий-ионных аккумуляторов в холодных климатических условиях². Это является наглядным примером ярко выраженной региональной специфики для перспектив распространения электротранспорта.

В современной литературе рассматривается огромное количество новых научных и практических вопросов, связанных с динамикой распространения электротранспорта [3—8]. Из всего многообразия тематик мы сосредоточимся на проблеме обеспечения *критической массы*, необходимой для распространения новой технологии в конкретном регионе, — в данном случае, на анализе условий, при которых распространение индивидуального электротранспорта на региональном уровне станет необратимым процессом. Соответственно, цель работы — проанализировать динамику распространения электромобилей в Калининградской области с учетом покупательской способности жителей региона.

Мы рассматриваем именно региональную проекцию данной тематики, так как развитие электротранспорта критически зависит от региональных факторов и оказывает системное влияние на развитие территории в целом. К таким факторам относятся климатические и социально-демографические характеристики регионов, а также связанные с ними параметры энергетической и транспортной сетей, структуры жилищно-коммунального хозяйства и др. В результате прогнозы развития электротранспорта являются регионально-специфическими.

Наше исследование имеет прикладное значение, так как содержит методический подход к прогнозированию развития систем электротранспорта в условиях нехватки данных для построения эконометрических моделей. Это достигается благодаря применению оригинальной модели имитационного моделирования на основе системной динамики, инструментарий которой базируется на численном решении систем дифференциальных уравнений первого порядка.

Непосредственный предмет данного исследования — *создание модели для оценки и сценарного прогнозирования влияния ключевых факторов на развитие электротранспорта в регионе. В контексте моделирования авторы решают следующие задачи: оценить динамику развития электротранспорта в зави-*

¹ IEA (2018). Global EV Outlook 2018: Towards cross-modal electrification. OECD/ International Energy Agency. URL: <https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/globalevoutlook2018.pdf> (дата обращения: 30.12.2019); IEA (2019). Global EV Outlook 2019: Scaling-up the transition to electric mobility. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019> (дата обращения: 30.12.2019).

² Другие недостатки, например относительно короткий пробег на одну зарядку, достаточно быстро ликвидируются с развитием технологии. Считается, что уже к 2023—2025 годам будет достигнут паритет электротранспорта с ДВС.

симости от различных сценариев: 1) степени развитости инфраструктуры заправочных станций, 2) первичного государственного заказа и 3) объема субсидий на покупку электромобиля. Разработанная модель является уникальной по причине глубокого анализа региональной специфики, определившей контекст моделирования, а также ввиду используемых приемов репрезентации потоковой модели — в частности оригинального подхода к моделированию состояния выбора потребителя и влияющих на него факторов.

Таким образом, выделим вопросы, на которые отвечает предлагаемая модель.

Какие должны быть размеры субсидии, чтобы повлиять на решение о покупке электромобиля?

Какой минимальный объем инфраструктуры заправок необходим для стимулирования отказа от автомобилей с ДВС в пользу электромобилей?

Какой минимальный парк электромобилей необходим для создания стимулов в развитие частной сети электрических заправок?

Данная модель может быть полезна для лиц, принимающих решения в области политики стимулирования внедрения электротранспорта, специалистов по анализу рынков и диффузии инноваций (в данном случае — электромобилей), а также широкого круга лиц, заинтересованных в разработке уточненных прогнозов динамики развития российского рынка электротранспорта.

В качестве пилотного региона для исследования была выбрана Калининградская область.

Дальнейшее содержание статьи структурировано следующими образом. Сначала мы рассматриваем тенденции распространения электротранспорта в мире, в том числе в странах региона Балтийского моря. Далее приводится более подробная характеристика парка транспорта в Калининградской области. Параллельно обсуждаются особенности и ограничения моделирования развития электротранспорта и зарядной инфраструктуры при недостатке наблюдений. Затем мы описываем подход на основе имитационного моделирования, который учитывает обратные связи между парком электротранспорта и зарядной инфраструктурой. Мы используем прикладной пакет AnyLogic PLE для реализации модели системной динамики [9—11]. Для апробации предложенной модели используются данные Калининградской области. Калининградская область обладает уникальными характеристиками для отработки региональных имитационных моделей благодаря своему эксклавному положению и компактным размерам ключевых подсистем [12]. Это позволяет рассматривать ее в качестве пилотного региона для апробации политики поддержки и развития электротранспорта для регионов России. Мы используем оценки на основе реальных статистических данных по развитию индивидуального и коммерческого транспорта Калининградской области (на основе базы данных «Автостат»), а также сценарные подходы к моделированию инструментов стимулирования спроса (таких как субсидии на приобретение электромобилей и развитие зарядной инфраструктуры [13; 14]. Анализ полученных результатов и обсуждение направлений дальнейшего развития данной тематики завершают работу.

Обзор тенденций развития электротранспорта в мире и в регионе Балтийского моря

Электромобили получают все большую популярность. По прогнозам ведущих мировых экспертов, к 2030 году до 20—30 % автопарка развитых стран будут электрическими. В некоторые страны, как, например, в Норвегии, являющейся лидером по доле рынка электромобилей среди частного автомобильного транспорта, уже на конец 2018 года электромобили составили 46 % рынка³.

Динамика развития парка электромобилей (BEV-и PHEV-типов) в мире тесно связана с динамикой развития общественной зарядной инфраструктуры (рис. 1).

³ IEA (2019).

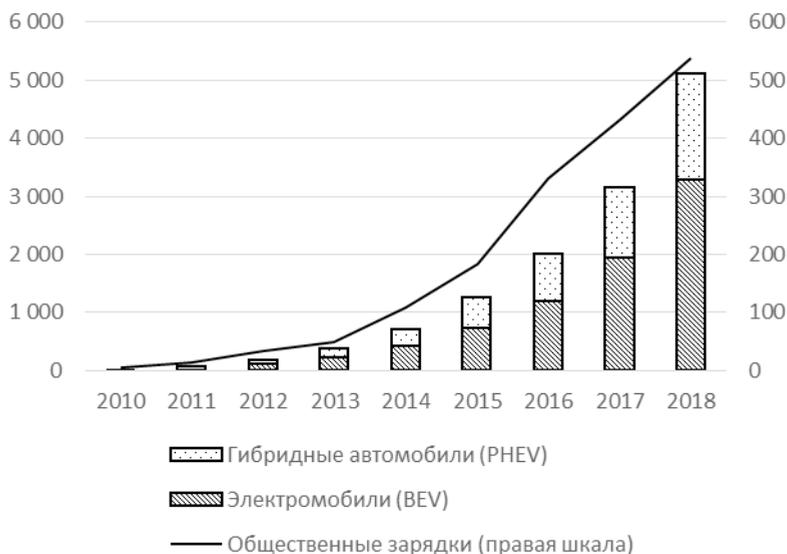


Рис. 1. Глобальная динамика развития парка электромобилей и общественной зарядной инфраструктуры за 2010—2018 годы (левая шкала — тыс. автомобилей, правая шкала — тыс. станций)

Источники: IEA (2019), расчеты авторов.

Внедрение электротранспорта в России идет с сильным отставанием по сравнению с США, Китаем и ведущими странами ЕС. Так, на конец 2019 года в России насчитывалось около 4,8 тыс. электромобилей. К 2025 году доля объема продаж электромобилей, по оценкам отраслевых экспертов, не превысит 0,6%, что составит около 15 тыс. единиц электромобилей⁴. Для сравнения — Китай, страны ЕС и США являются мировыми лидерами по внедрению электромобилей, представляя 45, 24 и 22% соответственно мирового рынка электромобилей в объеме 5,1 млн электромобилей в 2018 году. С 2013 по 2019 год мировые продажи электромобилей росли более чем на 50% в год ежегодно, и к 2030 году мировой рынок электромобилей, согласно прогнозам IEA, составит от 130 до 250 млн единиц, доля электромобилей в продаже новых автомобилей через десять лет может составить до 70% в Китае, до 50% в странах ЕС, 37% в Японии и более 30% в США и Канаде⁵.

Среди ключевых факторов, ограничивающих массовый спрос на электромобили среди населения, традиционно выделяются длительное время подзарядки электромобиля, небольшой пробег электромобиля на одном заряде, высокая стоимость автомобиля, неразвитость зарядной инфраструктуры. Однако за последние 5 лет активное развитие технологий позволило если не снять полностью большую часть из перечисленных выше ограничений, то в значительной степени их ослабить.

По имеющимся наблюдениям складывается достаточно устойчивая пропорция, согласно которой для полноценного развития легкового электротранспорта на 10 электромобилей должна функционировать как минимум 1 общественная зарядная станция⁶. Причем зарядная инфраструктура должна развиваться с некоторым опережением для обеспечения критической массы автомобилей. При этом каждый

⁴ Обзор автомобильного рынка России в 1 полугодии 2019 г. и перспективы развития. Спецвыпуск: электромобили. С. 10. URL: <https://www.pwc.ru/ru/materials/pwc-auto-press-briefing-2019.pdf>. (дата обращения: 12.01.2020).

⁵ IEA (2019).

⁶ IEA (2019).

электромобиль должен иметь индивидуальное место для ночной зарядки. Такие технологические требования объясняют различные стратегии развития зарядной инфраструктуры в разных регионах. Как видно на рисунке 2, Китай является мировым лидером по количеству зарядных станций, при этом делает ставку на развитие быстрой зарядки (рис. 2,б)⁷.

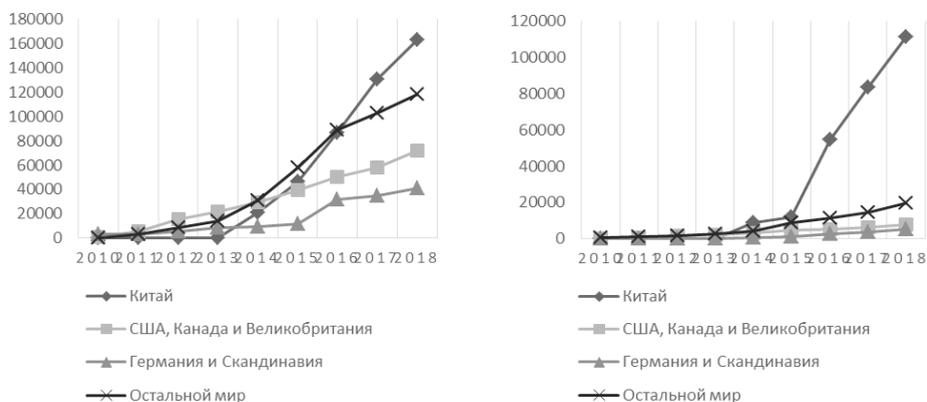


Рис. 2. Распространение общественных зарядных станций в мире в период 2010—2018 гг., шт.:

а — станции медленной зарядки; б — станции быстрой зарядки

Источники: IEA (2019), расчеты авторов.

Эксперты прогнозируют достижение пробега в 400 миль на одной зарядке (~644 км) на горизонте 5 лет, что позволит пользователям электромобилей значительно увеличить поездки на длинные дистанции и повысит спрос на общественные заправки [15].

Напротив, мировой лидер по количеству электромобилей на душу населения — Норвегия — ориентируется на медленную зарядную инфраструктуру. Вероятно, это объясняется структурой жилищного хозяйства, при которой большинство домохозяйств имеют индивидуальные жилые дома (только около $\frac{1}{4}$ домохозяйств проживает в больших многоквартирных домах)⁸. Следует отметить, что задача оптимизации инфраструктуры зависит также от стоимости электричества в регионе, состояния энергосетей и возможностей городского хозяйства осуществлять технологическое присоединение новых зарядных станций, а также их оптимальное пространственное распределение. Так, исследование показало, что в США при загрузке станций быстрой зарядки на уровне 20% и более стоимость заправки на общественной станции становится конкурентоспособной с заправкой дома — средняя загрузка, по данным исследования, в 2018 году составляла около 5% [15].

Особенности автомобильного рынка Калининградской области представлены в следующем разделе статьи.

⁷ Не вдаваясь в технические подробности, отметим, что пока большинство публичных зарядных станций относятся к условной категории медленных (slow), потому что рассчитаны на выдаваемую мощность примерно до 20 кВт на автомобиль. Легко видеть, что для зарядки автомобиля на 20 кВтч понадобится 1 ч (при этом большинство автомобилей пока ориентируются на емкость батареи около 40 кВтч). Считается, что быстрые зарядные станции (fast) могут выдавать 50 и более кВт на автомобиль, тем самым сокращая время зарядки в 2,5 и более раз. Технологии очень быстро развиваются, и уже внедряются станции (super-fast), которые могут выдавать 150 и более кВт на один автомобиль. Однако пока большинство аккумуляторных батарей (и систем управления зарядом) не могут принимать такую мощность. На горизонте 10 лет ситуация может кардинально измениться, что приведет к скачкообразному росту числа электромобилей.

⁸ Подробная статистика доступна по адресу: *Dwellings. Statistics Norway*. URL: <https://www.ssb.no/en/boligstat> (дата обращения: 16.01.2020).

Автомобильный транспорт в Калининградской области: исходные данные для модели

Несколько факторов, по нашему мнению, создают привлекательные условия для пилотного проекта по стимулированию развития электротранспорта в Калининградской области:

1) удобное географическое расположение — Калининградская область граничит с двумя странами Европейского союза (Польша, Литва), где электротранспорт активно развивается, а вместе с ним и сеть электрических заправок;

2) относительно небольшие размеры региона — максимальная протяженность с запада на восток составляет 205 км, с севера на юг — 108 км, что позволяет эффективно использовать электромобиль для перемещений внутри региона, учитывая возможности пробега современных электромобилей на одной зарядке до 250—400 км;

3) наличие мощностей, позволяющих локализовать производство электромобилей, комплектующих, элементов зарядной инфраструктуры как в масштабах регионального, так и национального рынка;

4) благоприятные социально-демографические характеристики — население области составляет 1,022 тыс. человек, из них 622,4 тыс. человек трудоспособного возраста, из которых 527,5 тыс. человек экономически активного населения (по данным на 2017 год, уровень занятости населения составил 67,1 %)°;

5) прозрачность региональной энергетической сети.

В данном исследовании мы фокусируемся на сегменте легковых автомобилей, поскольку коммерческий и общественный транспорт имеет существенную специфику с точки зрения развития. Тем не менее с точки зрения государственной поддержки парк общественного транспорта обладает преимуществом — зарядная инфраструктура в первую очередь концентрируется в местах базирования парка, а также вдоль основных маршрутов следования.

Для понимания общей картины приведем распределение транспортных средств по типам для Калининградской области (табл. 1).

Таблица 1

Распределение по типам транспортных средств в Калининградской области, тыс. штук

Тип транспортного средства	Количество	Доля, %
Легковые автомобили (PC)	359	75,3
Малотоннажный грузовой транспорт (LCV)	54	11,3
Грузовые автомобили (HCV), средне- и крупнотоннажные	28	5,9
Транспортные средства для перевозки, за исключением LCV	3	0,6
Прочие (мототехника, прицепы и т.п.)	33	6,9
<i>Всего</i>	477	100,0

Источники: база данных «Автостат», расчеты авторов.

Автомобильный парк Калининградской области имеет структуру, унаследованную из начала 1990-х годов, связанную с активным ввозом подержанных легковых автомобилей из Европы. Тем не менее динамика потребительского поведения изменилась, что видно по смене структуры доли автомобилей по стране происхождения производителя (табл. 2).

° Прогноз баланса трудовых ресурсов Калининградской области на 2018—2020 годы. URL: https://gov39.ru/biznesu/zanyatost/prognoz_balansa.php (дата обращения: 15.01.2020).

Таблица 2

Структура парка легковых автомобилей Калининградской области по возрасту и по стране происхождения¹⁰ на конец 1-го квартала 2019 года, шт. / %

Страна	До 1991 года	1991—2000	2001—2010	2011—2019*	Итого*
Германия	72 065 / 20,1	46 516 / 12,9	27 578 / 7,7	14 372 / 4,0	160 531 / 44,7
Япония	9817 / 2,7	16 826 / 4,7	33 586 / 9,3	18345 / 5,1	78 574 / 21,9
Франция	2607 / 0,7	6159 / 1,7	13 079 / 3,6	7974 / 2,2	29 819 / 8,3
США	7855 / 2,2	5922 / 1,6	10 424 / 2,9	3886 / 1,1	28 087 / 7,8
Южная Корея	47 / 0,0	1170 / 0,3	9119 / 2,5	17 199 / 4,8	27 535 / 7,7
Россия	4415 / 1,2	3132 / 0,9	4038 / 1,1	2828 / 0,8	14 413 / 4,0
Чехия	17 / 0,0	886 / 0,2	3027 / 0,8	5586 / 1,6	9516 / 2,6
Швеция	1435 / 0,4	626 / 0,2	958 / 0,3	277 / 0,1	3296 / 0,9
Италия	1066 / 0,3	706 / 0,2	480 / 0,1	31 / 0,0	2283 / 0,6
Великобритания	68 / 0,0	594 / 0,2	671 / 0,2	382 / 0,1	1715 / 0,5
Китай	0 / 0,0	0 / 0,0	396 / 0,1	1271 / 0,4	1667 / 0,5
Прочие	498 / 0,1	724 / 0,2	446 / 0,1	110 / 0,0	1778 / 0,5
<i>Всего</i>	<i>99 890 / 27,8</i>	<i>83 261 / 23,2</i>	<i>103 802 / 28,9</i>	<i>72 261 / 20,1</i>	<i>35 9214 / 100,0</i>

Источники: база данных «Автостат», расчеты авторов.

Примечание: * — на конец 1-го квартала 2019 года. В приведенных данных около 10,2 тыс. автомобилей (2,9% от общего числа) принадлежит юридическим лицам.

Повышение доли новых автомобилей, приобретаемых домохозяйствами, связано с увеличением доли корейских и чешских автомобилей, которые вытесняют с рынка немецкие и японские модели (рис. 3). На бензиновые автомобили приходится 83,3% парка, 16,4% составляют дизельные автомобили, остальные — гибридные (хотя 85% от их численности приходится на 2007—2011 годы выпуска). Отметим, что на середину 2019 года в Калининградской области было зарегистрировано около 800 гибридных и 10 полностью электрических автомобилей. Это свидетельствует о том, что даже в неразвитой с точки зрения владения электромобилем среде находятся категории потребителей-инноваторов, готовых попробовать принципиально новые продукты.

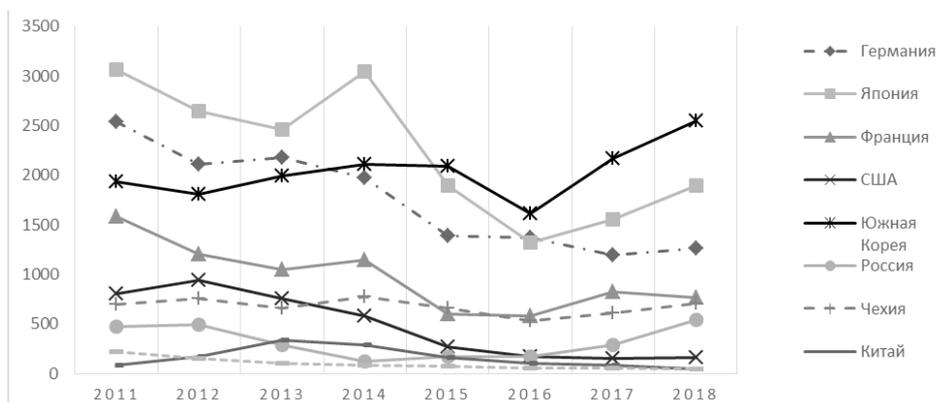


Рис. 3. Структура парка легковых автомобилей 2011—2018 годов выпуска по стране происхождения в Калининградской области

Источники: база данных «Автостат», расчеты авторов.

¹⁰ Следует иметь в виду, что «страна происхождения» часто отличается от «страны производства». Мы учитываем именно страну происхождения (бренда), поскольку, по нашему мнению, она оказывает большее влияние на потребительские предпочтения.

Тем не менее количества электромобилей еще недостаточно, чтобы использовать известные в теории отраслевых рынков методы дискретного выбора для анализа спроса [16]. В странах с более активным развитием электротранспорта, естественно, предпринимались попытки оценки потенциального спроса с помощью эконометрических методов [17]. Однако следует отметить, что их применение ограничено не только имеющимися данными, но и спецификой моделируемой ситуации. Дело в том, что наиболее современные модификации смешанных логит-моделей дискретного выбора [18, с. 955—970], восходящие к VLP-модели [19], сложно адаптируются к ситуации, когда к имеющимся на рынке продуктам добавляется альтернатива с принципиально отличающимися характеристиками. В таких случаях востребованными становятся методы имитационного моделирования, в том числе агентные модели, модели системной динамики, а также их комбинации.

В перспективе до 2025 года на рынке электромобилей будут преобладать небольшие автомобили, а уже после 2025 года можно ожидать достаточного развития технологии производства аккумуляторов для обеспечения их эффективности в более габаритных сегментах. В связи с этим важно, что в структуре парка не менее 35 % занимают компактные автомобили (табл. 3).

Таблица 3

**Потребительские предпочтения по категориям автомобилей и типам кузовов,
в Калининградской области, % от общей численности парка**

Категория	Седан	Универсал	Хэтчбек	Другие	Итого
A	0,11	0,03	2,03	0,02	2,19
B	7,46	0,75	6,14	1,26	15,62
C	6,55	1,87	9,55	2,01	19,98
D	15,59	5,02	0,41	2,91	23,93
E	8,55	1,38	0,05	0,63	10,61
MPV	0,01	4,04	0,83	0,00	4,88
SUV	0,01	15,96	0,85	0,16	16,98
Прочие	1,82	0,72	0,37	2,90	5,81
<i>Всего</i>	40,10	29,78	20,23	9,89	100,00

Источники: база данных «Автостат», расчеты авторов.

Примечание: Выделены условные категории базы данных «Автостат». MPV — Multi-Purpose Vehicle (многоцелевое транспортное средство); SUV — Sport-Utility vehicle (спортивный внедорожник).

Проведенный анализ позволяет перейти к оценке потенциального спроса на электромобили для построения сценариев предлагаемой нами имитационной модели на основе системной динамики. Используемый системно-динамический подход дает возможность реализовать многофакторное моделирование сложных социально-экономических систем с учетом нелинейных эффектов обратной связи [11; 20—22].

Структура модели

В основе системно-динамической модели лежит модифицированная модель диффузии инновационных продуктов Ф. Басса [23; 24]. Системная динамика основана на взаимодействии потоков и накопителей (рис. 4). Накопители представляют собой состояние конкретной переменной в данный момент времени, а пото-

ки — положительные или отрицательные изменения данной переменной за период. Ключевой особенностью моделей системной динамики является возможность моделирования обратных связей (в том числе с элементами запаздывания) между переменными. Гибкость аппарата системной динамики заключается в численном моделировании процессов, что позволяет использовать произвольные зависимости между переменными и снимает требования аналитической разрешимости системы. Принципы современной системной динамики рекомендуют избегать излишней сложности и детализации модели, отражать наиболее существенные свойства моделируемой системы [25; 26].

Классическая модель Ф. Басса предполагает, что любой рынок можно представить в виде как минимум двух переменных — количества потенциальных и фактических покупателей [23]. Интенсивность перетоков между данными категориями зависит от произвольного числа факторов. Базовая модель была существенно переработана и адаптирована авторами для отражения специфики принятия решений потребителем относительно выбора между автомобилем с ДВС и электромобилем. Как отмечалось, в литературе активно рассматриваются модели имитационного моделирования распространения электротранспорта по различным регионам мира [27—33]. Отличиями предлагаемой модели являются особенности моделирования принятия потребительских решений при выборе электромобиля и структура обратных связей. Модель рассчитана на 120 периодов (месяцев). Общий вид модели представлен на рисунке 4.

Модель состоит из двух основных блоков:

- 1) блока принятия потребительских решений «Потребительский выбор»;
- 2) блока «Зарядная инфраструктура».

Блок «Потребительский выбор» отражает принципиальную схему выбора между автомобилями с ДВС и электромобилями. Накопитель «Потенциальные покупатели» дополнительно разделяется на две группы — «Покупатели ДВС-автомобилей» и «Покупатели электромобилей» (данным группам соответствуют одноименные накопители на рисунке 4). «Покупатели ДВС-автомобилей» по истечении определенного периода (60 месяцев, что эквивалентно среднему сроку владения автомобилем) переходят в категорию «Покупатель в состоянии выбора» (соответствующий накопитель). В этом состоянии они могут сделать выбор как в пользу автомобиля с ДВС (возвращаются в соответствующий накопитель — «Покупатели ДВС-автомобилей»), так и в пользу электромобиля. Выбор в пользу электромобиля осуществляется в зависимости от привлекательности опции покупки электромобиля по сравнению с покупкой традиционного автомобиля и определяется на основании *соотношения стоимости цены на электромобиль с учетом государственной субсидии и стоимости автомобиля с ДВС*. Чем ниже стоимость электромобиля с учетом субсидии по сравнению с ДВС-автомобилем, тем выше заинтересованность потенциального покупателя в выборе электромобиля.

Кривая предпочтения автомобилей в зависимости от стоимости основана на экспертных оценках авторов статьи и представлена на рисунке 5. Так, например, если средняя стоимость субсидированного электромобиля в 1,5 раза ниже средней стоимости автомобиля с ДВС, то 15 % покупателей, находящихся в состоянии выбора, выберут электромобиль. В случае, если стоимость субсидированного электромобиля будет в два раза ниже, то выбор в пользу электромобиля будут делать чуть более 20 % покупателей.

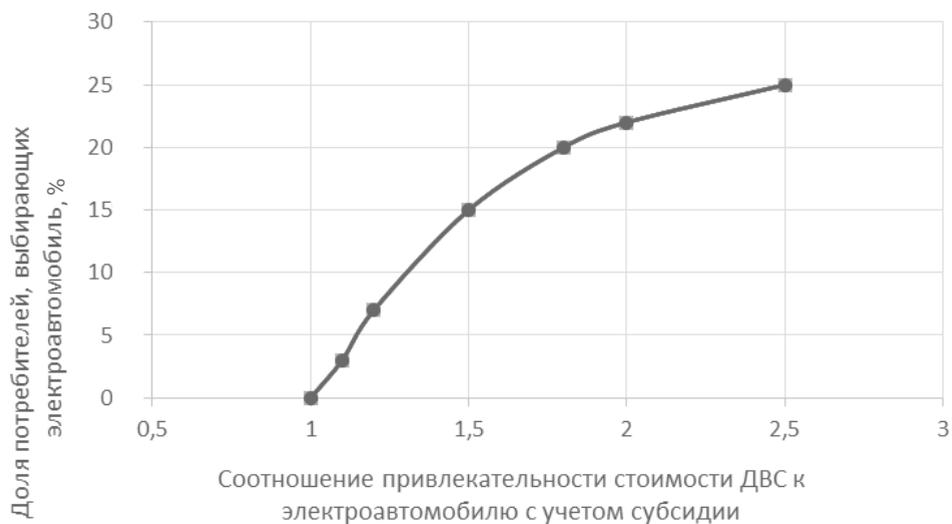


Рис. 5. Кривая предпочтений потребителей, совершающих выбор в пользу электроавтомобиля, в зависимости от соотношения стоимости автомобиля с ДВС к электроавтомобилю

По статистике в среднем в год в Калининградской области продается около 8 тыс. автомобилей, из которых примерно половина приходится на новые автомобили, проданные в кредит (4 194 автомобиля в 2018 году)¹¹. Средний размер автокредита в 2018 году составил 883 тыс. руб. Если кредит составляет от 30 до 50 % стоимости автомобиля, ожидаемая стоимость нового автомобиля находится в диапазоне 1,2—1,8 млн руб. Соответственно, потенциальный покупатель сравнивает стоимость электроавтомобиля с субсидией и автомобиля с ДВС. Ограничения на размер субсидии установлены от 25 до 50 % стоимости электроавтомобиля, что согласуется с международной практикой [14].

Для демонстрационных целей мы использовали двухфакторную модель выбора электроавтомобиля, учитывающую (1) стоимость электроавтомобиля и (2) развитость зарядной инфраструктуры в регионе. Оба фактора имеют первостепенное значение, представляя минимально необходимый набор критически значимых характеристик для предпочтения электроавтомобиля автомобилю с ДВС. Авторы сознательно пошли на упрощение модели, избегая ее усложнения второстепенными факторами, таким образом оставляя область для последующих научных исследований. Между тем моделирование даже относительно простой двухфакторной модели выбора электроавтомобиля представляет собой нетривиальную научную задачу.

Развитость зарядной инфраструктуры учитывается с помощью поправочного коэффициента, на который корректируется количество желающих приобрести электроавтомобиль (рис. 6). Поправочный коэффициент основывается на экспертных оценках авторов. Коэффициент динамически изменяется на основе развития инфраструктуры в регионе — по мере роста сети общественных зарядных станций. Под сеть заправок для электроавтомобилей мы подразумеваем соотношение быстрых (fast и superfast) и медленных заправок в пропорции 1 к 4 соответственно.

¹¹ Аналитики: в Калининграде растет спрос на новые автомобили. URL: <https://kaliningrad.rbc.ru/kaliningrad/12/02/2019/5c62a6949a7947df2c286878> (дата обращения: 20.01.2020).

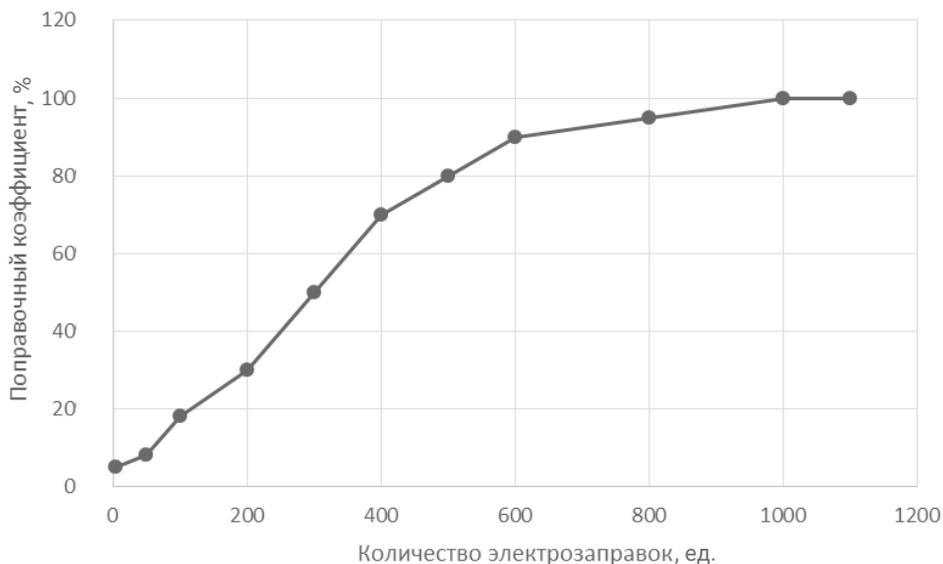


Рис. 6. Кривая предпочтений потребителей, совершающих выбор в пользу электромобиля, в зависимости от наличия зарядной инфраструктуры

Так, по мере введения в оборот зарядной инфраструктуры поправочный коэффициент возрастает с 5 до 100 %, то есть при наличии в регионе общественных зарядных станций не менее 1000 единиц поправочный коэффициент на инфраструктуру превращается в единицу — все потребители, выбирающие электромобиль, его приобретают. Если же количество зарядных станций составляет, например, 600 единиц, то только 80 % потенциальных покупателей электромобиля совершают покупку.

Соответственно, **блок «Зарядная инфраструктура»** моделирует скорость введения новых зарядных станций. Мы исходим из предположения, что первичная инфраструктура зарядных станций обеспечивается при государственном участии, а с ростом количества электромобилей в регионе постепенно к развитию зарядной инфраструктуры подключаются и частные инвесторы. Как указывают зарубежные исследователи [33], создание изначальной инфраструктуры заправочных станций критически важно для запуска цикла продаж электромобилей.

Развитие инфраструктуры заправочных станций моделируется с помощью стандартного «целевого» поведения системы (goal seeking behavior). Целевой ориентир регулируется в окне настроек модели (рис. 7). Целевое значение количества зарядных станций выбирается из диапазона в 200—1000 единиц. Для простоты анализа количество строящихся станций рассчитывается как фиксированная доля разницы между уже построенными и планируемыми к постройке станциями (3 %). Число планируемых к постройке станций задается параметром *Плановое количество станций*.

Также в модели отслеживается показатель *Количество электромобилей на зарядную станцию*, представляющий собой отношение количества электромобилей к количеству зарядных станций. В качестве стандартного используется соотношение «10 электромобилей на 1 общественную станцию», обоснованное в *Global EV Outlook 2019*¹². Поскольку за государственный счет финансируется только ограниченное количество станций, с ростом покупок электромобилей соотношение количества электромобилей на зарядную станцию начинает возрастать. В результате строительства новых зарядных станций как за счет бюджетных, так и внебюджетных источников финансирования показатель *Количество электромобилей на зарядную станцию* достигает целевого уровня. В дальнейшем по мере роста парка

¹² EIA (2019).

электромобилей и ухудшения показателя *Количество электромобилей на зарядную станцию* данный цикл повторяется автоматически. В модели заложено предположение, что частный инвестор в среднем вводит по 15 станций за единицу модельного времени до тех пор, пока этот показатель не придет к своему целевому значению «1 публичная станция на 10 электромобилей»).

Базовые параметры и предпосылки расчета приведены в таблице 4.

Таблица 4

Основные предпосылки моделирования

Название переменной	Значение	Единица измерения	Примечание
Период моделирования	120	Месяцев	—
Потенциальные покупатели	40 000	Покупателей	Фиксированный параметр. Прогнозное количество покупателей новых автомобилей в Калининградской области за 10 лет
Средний темп покупки автомобилей в месяц	1,65 %	Доля от количества потенциальных покупателей	Фиксированный параметр. Ежемесячная доля людей, покупающих любой автомобиль. Включает количество покупаемых электромобилей и автомобилей ДВС
Средняя стоимость покупки автомобиля с ДВС	1 200 000	Руб. / автомобиль	Фиксированный параметр
Средняя стоимость покупки электромобиля (без субсидии)	1 700 000	Руб. / автомобиль	Фиксированный параметр
Количество электрических заправок, построенных за счет бюджетного финансирования	200—1000	Единиц	Варьируемый параметр (см. раздел «Анализ чувствительности модели»)
Размер государственной субсидии на покупку электромобиля	30—50 %	Доля от стоимости электромобиля	Варьируемый параметр (см. раздел «Анализ чувствительности модели»)
Количество электромобилей на зарядную станцию (целевое значение)	10	Единиц	Фиксированный параметр. В случае превышения соотношения электромобилей на одну электрозаправку активируется опция строительства заправок за счет частного финансирования

Результаты имитационного эксперимента приведены на рисунке 7: в случае субсидирования покупки электромобилей на 50 % и строительства в регионе инфраструктуры зарядных станций в количестве не менее 400, число покупателей электромобилей за десять лет составит примерно 5,7 тыс. человек (5694 покупателя). При этом количество покупателей автомобилей с ДВС — более 28 тыс. человек (28 341 покупатель). На поздних этапах модели (после первых 60 мес.) в среднем в месяц совершается около 50—60 покупок электромобилей и около 500—520 покупок автомобилей с ДВС.

Всего количество покупателей электромобилей за весь период составит 17 %. За десятилетний период при базовом сценарии может быть введено 514 заправокных станций, из которых за счет государственных средств — 400, за счет средств частных инвесторов — 114 (график «Количество зарядных станций» на рисунке 7). Частные станции вводятся по мере превышения показателя *Количество электромобилей на зарядную станцию* выше целевого значения, установленного в размере 10 электромобилей на 1 станцию.

Полученные результаты моделирования в целом соответствуют сложившейся европейской практике, где доля электромобилей по данным на 2019 год составляет около 5—15% от общих покупок новых автомобилей¹³.

Анализ чувствительности модели

Преимущество имитационного моделирования состоит в том, что оно позволяет проводить множество экспериментов, гибко задавая различные сценарии. Сценарии задаются путем варьирования наиболее значимых параметров в различных комбинациях [11]. На основе созданной модели нами был проведен анализ чувствительности по двум ключевым переменным модели:

- 1) количеству общественных зарядных станций;
- 2) размеру необходимой субсидии на приобретение электромобиля.

Результаты анализа чувствительности к количеству зарядных станций представлены на рисунках 8—9. Расчеты показывают (рис. 7), что разница в общем количестве покупателей электромобиля в зависимости от диапазона от 200 до 600 станций представляется существенной. В этом случае число покупателей варьируется от 3770 тыс. человек (200 станций) до 6890 (600 станций). Разница между сетью из 800 и 1000 станций практически незначительна. Таким образом, по нашим расчетам, сеть из заправочных станций в количестве 600 единиц будет в целом достаточной для успешного развития электротранспорта в Калининградской области, принимая во внимание географические и социально-демографические характеристики региона.

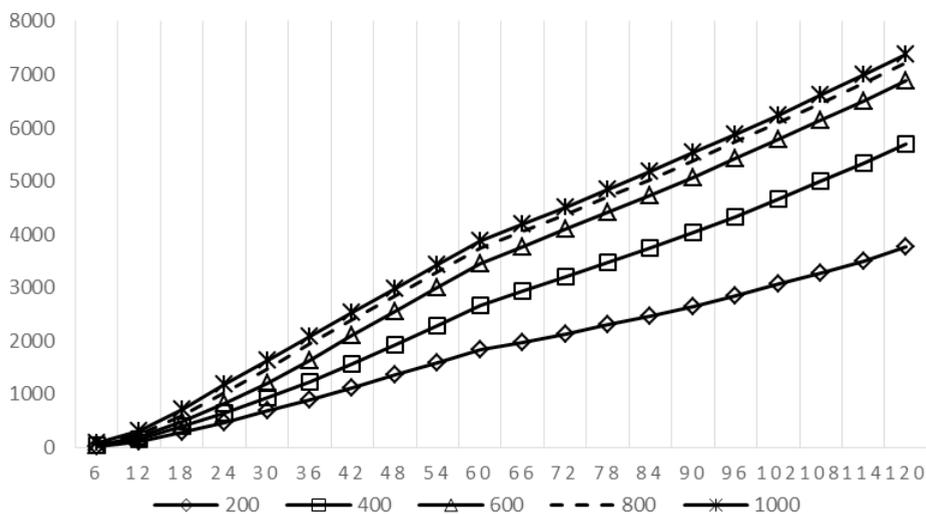


Рис. 8. Анализ чувствительности в зависимости от вводимых зарядных станций за государственный счет (диапазон 200—1000 станций, шаг 200 станций): по горизонтальной оси — время (120 мес.), по вертикальной оси — количество покупателей электромобилей (покупателей всего) в зависимости от развития заправочной инфраструктуры

На рисунке 9 представлено количество покупателей электромобилей в месяц в зависимости от размера субсидий. Результаты имитационного эксперимента наглядно показывают, что выбор потребителем электромобиля в значительной степе-

¹³ EIA (2019).

ни также зависит от уровня субсидирования стоимости электромобиля со стороны государства. Чем выше субсидирование — 35–40 % и более, тем значительнее количество покупателей электромобиля. Разница между количеством покупателей электромобиля в зависимости от уровня субсидирования в 30 и 50 % существенна: более чем в семь раз — 1030 человек (30 %) против 7 490 (50 %). Следует отметить, что данный результат во многом основывается на кривой предпочтений, основанной на анализе авторов (рис. 5). По мере валидации кривой предпочтений на основе дальнейших исследований рынка результаты моделирования могут быть существенно уточнены.

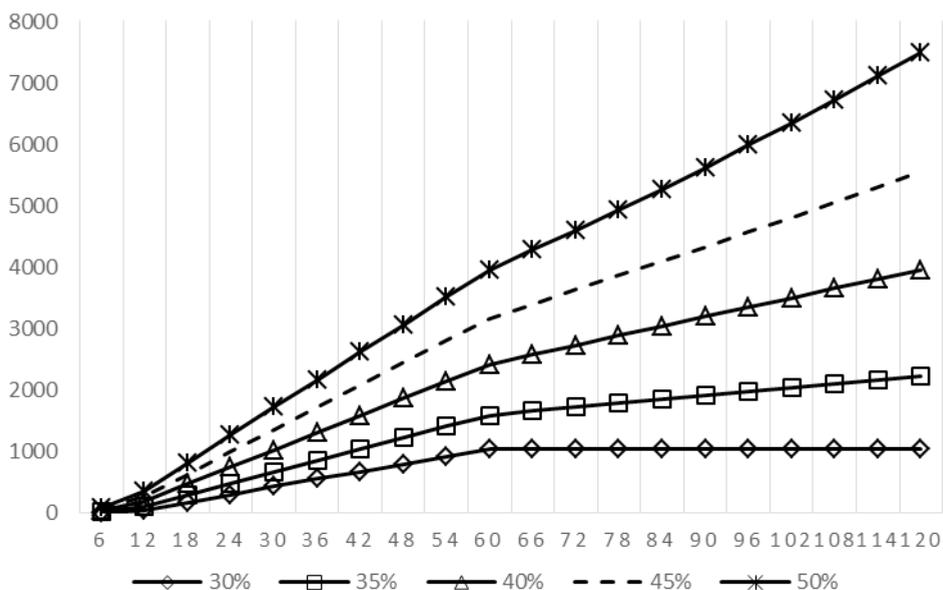


Рис. 9. Анализ чувствительности модели в зависимости от размера субсидирования стоимости электромобиля (диапазон субсидии в размере 30–50 % от стоимости электромобиля, шаг в 5 %): по горизонтальной оси — время (120 мес.), по вертикальной оси — количество покупателей электромобилей (покупателей в месяц) в зависимости от уровня субсидирования

Заключение

С помощью предлагаемой модели системной динамики мы исследуем проблему оценки необходимых мер стимулирования спроса на электромобили для региона с низким уровнем развития электротранспорта.

Мы отмечаем решающее влияние государственной поддержки на стимулирование внедрения электротранспорта. Государственная поддержка в разных странах оказывается в разных формах: от стимулирования покупки электромобилей путем прямого субсидирования до косвенных мер, таких как, например, бесплатная парковка для электротранспорта. Ключевой мерой является развитие сети сверхбыстрых заправочных станций, поскольку заправочные станции представляют собой комплементарный товар для электромобиля [34–36]. Наличие развитой сети заправочных станций, стимулируемых государством, позволяет преодолеть изначальную инерцию и сформировать минимально необходимое количество электромобилей для последующего устойчивого развития (критическую массу). С другой стороны,

требуется определенное минимальное значение электромобилей в качестве стимула для формирования сети зарядных станций. Там, где электротранспорт активно развивается, частный бизнес — в том числе производители электромобилей, крупные нефтегазовые компании, частные операторы сети заправок и зарядных станций, венчурные фонды и фонды прямых инвестиций — самостоятельно участвует в создании зарядной инфраструктуры.

Построенная нами модель позволяет оценить сценарии развития зарядной инфраструктуры на примере эксклавной Калининградской области. Новизна подхода заключается в том, что модель может быть адаптирована для любых регионов, имеющих низкий уровень распространения электротранспорта и зарядной инфраструктуры. На основе проведенного моделирования можно дать следующие рекомендации.

1. Регионам, заинтересованным в высокой динамике внедрения электротранспорта, следует в сжатые сроки самостоятельно создать ядро зарядной инфраструктуры. Как показывают эксперименты, это особенно важно на начальном этапе запуска цикла положительной обратной связи «количество зарядных станций — количество электромобилей». После создания минимальной (критической) инфраструктуры далее уже включается стандартный рыночный механизм и происходит подключение бизнеса.

2. На старте программы стимулирования для загрузки строящейся зарядной инфраструктуры рекомендуется предусмотреть меры по созданию в регионе минимального парка электромобилей методом целевого государственного заказа либо на условиях государственно-частного партнерства с крупным бизнесом.

При слабо развитой зарядной инфраструктуре особое значение приобретает комплекс стимулов по переходу владельцев автомобилей с ДВС на электротранспорт — в особенности меры по прямому субсидированию населения частичной стоимости покупки электромобиля. Наш анализ показывает, что размер субсидирования во многом определяет динамику приобретений электромобилей. Регионам, желающим ускорить переход на индивидуальный электротранспорт, следует проработать механизм субсидирования и предусмотреть соответствующие средства в первые 2—3 года реализации программы. Дальнейшее развитие модели может быть связано со следующими задачами:

— необходимо валидировать кривые предпочтений по стоимости электромобиля и влиянию инфраструктуры; моделируемые зависимости могут быть валидированы на основе дополнительно проведенных исследований — социологических опросов, фокус-групп, включения в анализ характеристик геодемографической обстановки и т.д.;

— модель может быть дополнена инструментами имитационного моделирования, в том числе агентного (для более подробного анализа потребительского выбора путем включения в него большего количества факторов, влияющих на выбор электромобиля, включая, например, нефинансовые стимулы, а также индивидуальные поведенческие эффекты), а также системой пространственной оптимизации распространения сети зарядных станций (на основе ГИС и использования данных о транспортных потоках, а также о состоянии распределительных сетей).

Представленная модель функционирует в демонстрационном режиме и отражает общий подход к исследуемой проблеме. Необходимо отметить, что преимуществом модели системной динамики является возможность ее постоянной калибровки и настройки в результате расширения базы практических наблюдений за реальным развитием системы.

Список литературы

1. *Handbook on Battery Energy Storage System*. Asian Development Bank. 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.22617/TCS189791-2>.
2. *Buekers J., Van Holderbeke M., Bierkens J., Panis L.* Health and environmental benefits related to electric vehicle introduction in EU countries // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2014. Vol. 33. P. 26—38. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.09.002>.
3. *Babic J., Podobnik V.* A Review of Agent-Based Modelling of Electricity Markets in Future Energy Eco-Systems // 2016 International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech). IEEE. 2016. doi: 10.1109/SpliTech.2016.7555922.
4. *Gnann T., Stephens T., Lin Z. et al.* What drives the market for plug-in electric vehicles? — A review of international PEV market diffusion models // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 93. P. 158—164. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.055>.
5. *Wee S., Coffman M., La Croix S.* Do electric vehicle incentives matter? Evidence from the 50 U.S. states // *Research Policy*. 2018. Vol. 47, № 9. P. 1601—1610. doi: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.05.003>.
6. *Wolbertus R., Kroesen M., van den Hoed R., Chorus C.* Policy effects on charging behaviour of electric vehicle owners and on purchase intentions of prospective owners: Natural and stated choice experiments // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2018. Vol. 62. P. 283—297. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.05.012>.
7. *Yang W., Xiang Y., Lui J., Gu C.* Agent-Based Modeling for Scale Evolution of Plug-In Electric Vehicles and Charging Demand // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018. Vol. 33, № 2. P. 1915—1925. doi: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2017.2739113>.
8. *Zhuge C., Wei B., Dong C. et al.* Exploring the future electric vehicle market and its impacts with an agent-based spatial integrated framework: A case study of Beijing, China // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 221. P. 730—737. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.262/>
9. *Borshchev A.* The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with Anylogic 6. AnyLogic North America, 2013.
10. *Каталевский Д.Ю., Солодов В.В., Кравченко К.К.* Моделирование поведения потребителей // *Искусственные общества*. 2012. Т. 7. № 1—4.
11. *Каталевский Д.Ю.* Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении. 2-е изд., перераб. и доп. М., 2015.
12. *Gareev T.* The Special Economic Zone in the Kaliningrad Region: Development Tool or Institutional Trap? // *Baltic Journal of Economics*. 2013. Vol. 13, № 2. P. 113—130.
13. *Javid R., Nejat A.* A comprehensive model of regional electric vehicle adoption and penetration // *Transport Policy*. 2017. № 54. P. 30—42. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.11.003>.
14. *Hardman S., Chandan A., Tal G., Turrentine T.* The effectiveness of financial purchase incentives for battery electric vehicles — A review of the evidence // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 80. P. 1100—1111. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.255>.
15. *Lee H., Clark A.* Charging the Future: Challenges and Opportunities for Electric Vehicle Adoption. Working paper. Cambridge, Mass, 2018. URL: https://projects.iq.harvard.edu/files/energyconsortium/files/rwp18-026_lee_1.pdf (дата обращения: 15.01.2020).
16. *Train K.* *Discrete Choice Methods with Simulation*. 2nd ed. Cambridge University Press, 2009.
17. *Wang N., Tang L., Pan H.* Effectiveness of policy incentives on electric vehicle acceptance in China: A discrete choice analysis // *Transportation Research Part A*. 2017. Vol. 105. P. 210—218. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.08.009>.
18. *Грин У.* Эконометрический анализ : в 2 кн. Кн. 2 / пер. с англ. ; под науч. ред. С.С. Сивельникова, М.Ю. Турунцева. М., 2016.
19. *Berry S., Levinsohn J., Pakes A.* Automobile Prices in Market Equilibrium // *Econometrica*. 1995. Vol. 63, № 4. P. 841—890.
20. *Sterman J.* *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston, MA, 2000.
21. *Лычкина Н.Н.* Инновационные парадигмы и технологии имитационного моделирования и их применение в управлении и информационных бизнес-системах и системах поддержки принятия решений // *Вестник Университета (Государственный университет управления)*. 2012. № 20. С.136—145.
22. *Кавтарадзе Д.Н.* Наука и искусство управления сложными системами // *Государственное управление. Электронный вестник*. 2014. № 43. С. 266—297.

23. Bass F. A new product growth model for consumer durables // *Marketing Science*. 1969. № 15. P. 215—227.
24. Bass F.M. The relationship between diffusion rates, experience curves, and demand elasticities for consumer durable technological innovations // *The Journal of Business*. 1980. Vol. 53, № 3. P. S51-S67.
25. Pruyt E. Using Small Models for Big Issues: Exploratory System Dynamics Modelling and Analysis for Insightful Crisis Management // 18th International Conference of the System Dynamics Society. 2010. P. 25—29.
26. Ghaffarzadegan N., Lyneis J., Richardson G. How Small System Dynamics Models Can Help the Public Policy Process // *System Dynamics Review*. 2010. Vol. 27. P. 22—44. doi: <https://doi.org/10.1002/sdr.442>.
27. Struben J., Sterman J.D. Transition Challenges for Alternative Fuel Vehicle and Transportation Systems // *Environment and Planning B: Planning and Design*. 2008. Vol. 35, № 6. P. 1070—1097.
28. Shepherd S.P. A review of system dynamics models applied in transportation // *Transportmetrica B: Transport Dynamics*. 2014. Vol. 2, № 2. P. 83—105. doi: <https://doi.org/10.1080/21680566.2014.916236>.
29. Shepherd S., Bonsall P., Harrison G. Factors affecting future demand for electric vehicles: A model based study // *Transport Policy*. 2012. Vol. 20. P. 62—74. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.12.006>.
30. Wolf I., Schröder T., Neumann J., de Haan G. Changing minds about electric cars: An empirically grounded agent-based modeling approach // *Technological Forecasting and Social Change*. 2015. Vol. 94. P. 269—285. doi: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2014.10.010>.
31. Pasaoglu G., Harrison G., Jones L. et al. A system dynamics based market agent model simulating future powertrain technology transition: Scenarios in the eu light duty vehicle road transport sector // *Technological Forecasting and Social Change*. 2016. Vol. 104. P. 133—146. doi: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.11.028>.
32. Benvenuti L., Ribeiro A., Uriona M. Long term diffusion dynamics of alternative fuel vehicles in Brazil // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 164, № 15. P. 1571—1585. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.051>.
33. Yu J., Yang P., Zhang K., Wang F., Miao L. Evaluating the Effect of Policies and the Development of Charging Infrastructure on Electric Vehicle Diffusion in China // *Sustainability*. 2018. Vol 10, № 10. P. 3394. doi: <https://doi.org/10.3390/su10103394>.
34. Meyer P.E., Winebrake J.J. Modeling technology diffusion of complementary goods: The case of hydrogen vehicles and refueling infrastructure // *Technovation*. 2009. Vol. 29. P. 77—91.
35. Reid S., Spence D. Methodology for evaluating existing infrastructure and facilitating the diffusion of PEVS // *Energy Policy*. 2016. Vol. 89. P. 1—10. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.11.008>.
36. Harrison G., Thiel C. An exploratory policy analysis of electric vehicle sales competition and sensitivity to infrastructure in Europe // *Technology Forecasting and Social Change*. 2017. № 114. P. 165—178. doi: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.08.007>.

Об авторах

Тимур Рустамович Гареев, кандидат экономических наук,
Сколковский институт науки и технологий, Россия.

E-mail: tgareev@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3920-5041>

Дмитрий Юрьевич Каталевский, кандидат экономических наук,
Российская академия народного хозяйства и государственной службы
при Президенте РФ, Россия; Сколковский институт науки и технологий, Россия.

E-mail: dkatalevsky@yahoo.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3920-5041>

DEVELOPMENT OF ELECTRIC ROAD TRANSPORT: SIMULATION MODELLING

D. Yu. Katalevsky^a

T. R. Gareev^b

^a Skolkovo Institute of Science and Technology
100 Novaya St, Skolkovo, 143025, Russia

^b Russian Presidential Academy of National Economy
and Public Administration (RANEPA)
82 Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russia

Received 19 February 2020

doi: 10.5922/2079-8555-2020-2-7

© Katalevsky, D. Yu., Gareev, T. R., 2020

Electric transport is rapidly gaining popularity across the world. It is an example of technological advancement that has multiple consequences for regional economies, both in terms of the adaptation of production, transport and energy systems and their spatial optimization. The experience of leading economic regions, including countries of the Baltic Sea region, shows that electric transport can potentially substitute traditional transport technologies. Based on an authentic model of system dynamics, the authors propose a new approach to simulation modelling of the dissemination of electric vehicles in a given region. The proposed model allows the authors to take into account the key systemic feedback loops between the pool of electric vehicles and the charging infrastructure. In the absence of data required for the econometric methods of demand forecasting, the proposed model can be used for the identification of policies stimulating the consumer demand for electric vehicles in regions and facilitating the development of the electric transport infrastructure. The proposed model has been tested using real and simulated data for the Kaliningrad region, which due to its specific geographical location, is a convenient test-bed for developing simulation models of a regional scale. The proposed simulation model was built via the AnyLogic software. The authors explored the capacity of the model, its assumptions, further development and application. The proposed approach to demand forecasting can be further applied for building hybrid models that include elements of agent modelling and spatial optimization.

Keywords:

simulation modelling, system dynamics, electric transport, electric vehicles, charging stations infrastructure, region, demand forecasting, demand stimulation, Bass model, AnyLogic

References

1. Handbook on Battery Energy Storage System. Asian Development Bank. 2018. <http://dx.doi.org/10.22617/TCS189791-2>.
2. Buekers, J., Van Holderbeke, M., Bierkens, J., Int Panis, L. 2014, Health and environmental benefits related to electric vehicle introduction in EU countries, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, no. 33, p. 26—38. doi: 10.1016/j.trd.2014.09.002.
3. Babic, J., Podobnik, V. 2016, A Review of Agent-Based Modelling of Electricity Markets in Future Energy Eco-Systems, *2016 International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)*, IEEE. doi: 10.1109/SpliTech.2016.7555922.
4. Gnann, T., Stephens, T., Lin, Z., Plotz, P., Liu, C., Brokate, J. 2018, What drives the market for plug-in electric vehicles? — A review of international PEV market diffusion models, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 93, p. 158—164. doi: 10.1016/j.rser.2018.03.055.

5. Wee, S., Coffman, M., La Croix, S. 2018, Do electric vehicle incentives matter? Evidence from the 50 U.S. states, *Research Policy*, vol. 47, no. 9, p. 1601—1610. doi: 10.1016/j.respol.2018.05.003.
6. Wolbertus, R., Kroesen, M., van den Hoed, R., Chorus, C. 2018, Policy effects on charging behaviour of electric vehicle owners and on purchase intentions of prospective owners: Natural and stated choice experiments, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, no. 62, p. 283—297. doi: 10.1016/j.trd.2018.03.012.
7. Yang, W., Xiang, Y., Lui, J., Gu, C. 2018, Agent-Based Modeling for Scale Evolution of Plug-In Electric Vehicles and Charging Demand, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 2, p. 1915—1925. doi: 10.1109/tpwrs.2017.2739113.
8. Zhuge, C., Wei, B., Dong, C., Shao, C., Shan, Y. 2019, Exploring the future electric vehicle market and its impacts with an agent-based spatial integrated framework: A case study of Beijing, China, *Journal of Cleaner Production*, no. 221, p. 730—737. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.262.
9. Borshchev, A. 2013 *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with Anylogic 6*, AnyLogic North America, 612 p.
10. Katalevsky, D. Yu., Solodov, V. V., Kravchenko, K. K. 2012, Consumer Behavior Modeling, *Iskusstvennyye obshchestva* [Artificial Societies], vol. 7, no. 1—4 (in Russ.).
11. Katalevsky, D. Yu. 2015, *Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya i sistemnogo analiza v upravlenii* [Fundamentals of simulation modeling and systems analysis in management], 2th. edition, revised and supplemented, Moscow, 496 p. (in Russ.).
12. Gareev, T. 2013, The Special Economic Zone in the Kaliningrad Region: Development Tool or Institutional Trap? *Baltic Journal of Economics*, vol. 13, no. 2, p. 113—130.
13. Javid, R., Nejat, A. 2017, A comprehensive model of regional electric vehicle adoption and penetration, *Transport Policy*, no. 54, p. 30—42. doi: 10.1016/j.tranpol.2016.11.003.
14. Hardman, S., Chandan, A., Tal, G., Turrentine, T. 2017, The effectiveness of financial purchase incentives for battery electric vehicles — A review of the evidence, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 80, p. 1100—1111. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.255.
15. Lee, H., Clark, A. 2018, *Charging the Future: Challenges and Opportunities for Electric Vehicle Adoption*, Working paper, Cambridge, Mass, Harvard Kennedy School, available at: https://projects.iq.harvard.edu/files/energyconsortium/files/rwp18-026_lee_1.pdf (accessed 15.01.2020).
16. Train, K. 2009, *Discrete Choice Methods with Simulation*, Second Edition, Cambridge University Press.
17. Wang, N., Tang, L., Pan, H. 2017, Effectiveness of policy incentives on electric vehicle acceptance in China: A discrete choice analysis, *Transportation Research Part A*, no. 105, p. 210—218. doi: 10.1016/j.tra.2017.08.009.
18. Green W. 2016, *Ekonometricheskii analiz. Kniga 2* [Econometric analysis. Book 2], Moscow (in Russ.).
19. Berry, S., Levinsohn, J., Pakes, A. 1995, Automobile Prices in Market Equilibrium, *Econometrica*, vol. 63, no. 4, p. 841—890.
20. Serman, J. 2000, *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, Boston, MA, Irwin/McGraw-Hill.
21. Lychkina, N. N. 2012, Innovative paradigms and technologies of simulation modeling and their application in management and information business systems and decision support systems, *Vestnik universiteta (Gosudarstvennyy universitet upravleniya)* [University Herald (State University of Management)], no. 20, C.136—145 (in Russ.).
22. Kavtaradze, D. N. 2014, Science and the art of managing complex systems, *Gosudarstvennoe upravlenie. Elektronnyi vestnik* [Public administration. Electronic messenger], no. 43, p. 266—297 (in Russ.).
23. Bass, F. 1969, A new product growth model for consumer durables, *Marketing Science*, no. 15, p. 215—227.
24. Bass, F. M. 1980, The relationship between diffusion rates, experience curves, and demand elasticities for consumer durable technological innovations, *The Journal of Business*, vol. 53, no. 3, p. S51-S67.
25. Pruyt, E. 2010, Using Small Models for Big Issues: Exploratory System Dynamics Modelling and Analysis for Insightful Crisis Management, *18th International Conference of the System Dynamics Society*, p. 25—29.

26. Ghaffarzadegan, N., Lyneis, J., Richardson, G. 2010, How Small System Dynamics Models Can Help the Public Policy Process, *System Dynamics Review*, no. 27, p. 22—44. doi: 10.1002/sdr.442.
27. Struben, J., Sterman, J.D. 2008, Transition Challenges for Alternative Fuel Vehicle and Transportation Systems, *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 35, no. 6, p. 1070—1097.
28. Shepherd, S.P. 2014, A review of system dynamics models applied in transportation, *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, Vol. 2, no. 2, p. 83—105. doi: 10.1080/21680566.2014.916236.
29. Shepherd, S., Bonsall, P., Harrison, G. 2012, Factors affecting future demand for electric vehicles: A model based study, *Transport Policy*, no. 20, p. 62—74. doi: 10.1016/j.tranpol.2011.12.006.
30. Wolf, I., Schröder, T., Neumann, J., de Haan, G. 2015, Changing minds about electric cars: An empirically grounded agent-based modeling approach, *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 94, p. 269—285. doi: 10.1016/j.techfore.2014.10.010.
31. Pasaoglu, G., Harrison, G., Jones, L., Hill, A., Beaudet, A., Thiel, C. 2016, A system dynamics based market agent model simulating future powertrain technology transition: Scenarios in the eu light duty vehicle road transport sector, *Technological Forecasting and Social Change*, no. 104, p. 133—146. doi: 1016/j.techfore.2015.11.028.
32. Benvenutti, L., Ribeiro, A., Uriona, M. 2017, Long term diffusion dynamics of alternative fuel vehicles in Brazil, *Journal of Cleaner Production*, vol. 164, no. 15, p. 1571—1585. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.051.
33. Yu, J., Yang, P., Zhang, K., Wang, F., Miao, L. 2018, Evaluating the Effect of Policies and the Development of Charging Infrastructure on Electric Vehicle Diffusion in China, *Sustainability*, vol 10, no. 10, p. 3394. doi: 10.3390/su10103394.
34. Meyer, P.E., Winebrake, J.J. 2009, Modeling technology diffusion of complementary goods: The case of hydrogen vehicles and refueling infrastructure, *Technovation*, no. 29, p. 77—91.
35. Reid, S., Spence, D. 2016, Methodology for evaluating existing infrastructure and facilitating the diffusion of PEVS, *Energy Policy*, no. 89, p. 1—10. doi: 1016/j.enpol.2015.11.008.
36. Harrison, G., Thiel, C. 2017, An exploratory policy analysis of electric vehicle sales competition and sensitivity to infrastructure in Europe, *Technology Forecasting and Social Change*, no. 114, p. 165—178. doi: 10.1016/j.techfore.2016.08.007.

The authors

Dr Timur R. Gareev, Skolkovo Institute of Science and Technology, Russia.

E-mail: tgareev@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3920-5041>

Dr Dmitry Yu. Katalevsky, The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (RANEPA), Russia; Skolkovo Institute of Science and Technology, Russia.

E-mail: dkatalevsky@yahoo.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3920-5041>
