

УДК 338.47,338.45.01

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ В СЕКТОРЕ ДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА НА УРОВЕНЬ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ И СУТОЧНЫЙ ГРАФИК НАГРУЗКИ В ЕЭС РОССИИ

© 2023 г. Ф. В. Веселов¹, *, А. И. Соляник¹, Р. О. Аликин¹¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт энергетических исследований Российской академии наук (ИНЭИ РАН), Москва, Россия

*e-mail: erifedor@mail.ru

Поступила в редакцию 27.09.2022 г.

После доработки 24.10.2022 г.

Принята к публикации 31.10.2022 г.

В статье выполнена оценка влияния потенциальных масштабов развития электрификации в автотранспортном секторе России (переход на электротранспорт разного типа) на величину совокупного спроса на электроэнергию и мощность в стране. При достаточно скромных целевых параметрах развития электротранспорта до 2030 г., принятых в официальных документах, на более далекую перспективу масштабное замещение нефтетоплива электроэнергией даст существенный эффект снижения выбросов парниковых газов, но потребует и более интенсивного развития генерирующих и сетевых мощностей в электроэнергетике. Сценарный прогноз развития электротранспорта выполнен с выделением трех сегментов — легковой, грузовой и автобусный транспорт, что позволяет учесть характерные для каждого из них характеристики электропотребления. Еще одним важным результатом является оценка возможных масштабов влияния электротранспорта на конфигурацию типового суточного графика нагрузки. В работе рассмотрены различные режимы использования зарядной инфраструктуры электротранспорта, обеспечивающие разный уровень неравномерности внутрисуточного электропотребления. По результатам расчетов показано, что в зависимости от сценария развития электротранспорта, дополнительное годовое электропотребление в стране составит от 168 до 460 млрд кВт ч. При этом в зависимости от режима зарядки электромобилей дополнительная потребность в мощности составит от 26 до 74 млн кВт, а амплитуда колебаний почасовых нагрузок электротранспорта будет варьироваться от двухкратных до четырехкратных значений.

Ключевые слова: электрификация, электромобили, декарбонизация, электропотребление, электрическая нагрузка

DOI: 10.31857/S0002331023010077, **EDN:** LWJPZS

ВВЕДЕНИЕ

Декарбонизация глобальной экономики в настоящее время стала важнейшим приоритетом в долгосрочных стратегиях трансформации энергетики стран-участниц Парижского соглашения. Большинство развитых стран, начиная с 2000 г., а наиболее активно — в последние 15 лет, прикладывают значительные усилия по увеличению доли безуглеродных ресурсов в структуре потребления первичных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР).

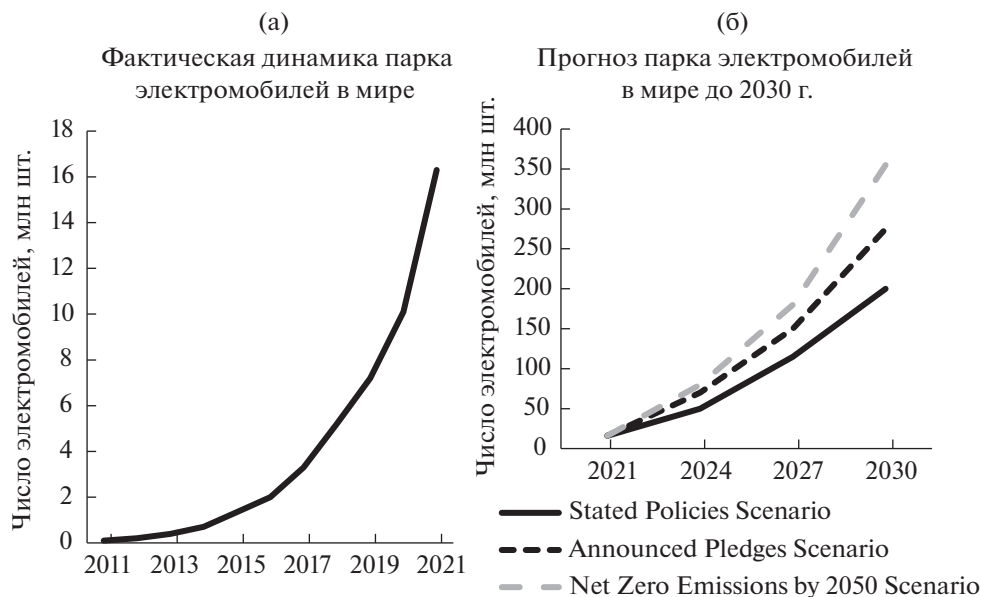


Рис. 1. Динамика глобального парка электромобилей в прошедшем (а) и следующем (б) десятилетиях, млн единиц (на основе данных МЭА [3]).

В настоящее время транспортный сектор является вторым по объему “загрязнителем” атмосферы после электроэнергетики и формирует около 20% мировых выбросов CO_2 , а именно 7 млрд т CO_2 [1] из общих 36.3 млрд т [2]. Это означает, что даже частичный перевод автомобильного парка с традиционных энергоносителей (бензина и дизельного топлива) на электроэнергию позволит существенно снизить углеродный след транспортного сектора (абстрагируясь от углеродного следа самой сетевой электроэнергии, который зависит от доли газовой и угольной генерации в электробалансе).

Сегмент электрифицированного автодорожного транспорта в последние годы демонстрирует феноменальные темпы развития. По данным ежегодного мониторинга Международного энергетического агентства (МЭА) [3], в 2021 г. совокупный мировой парк легковых электромобилей составил 16.5 млн единиц, демонстрируя экспоненциальный рост с 2014–2015 гг. (рис. 1). Более того прогнозы МЭА показывают дальнейший быстрый рост числа электромобилей в мире — в зависимости от сценария развития мировой энергетики их число к 2030 г. составит от 200 до 350 млн единиц.

В Евросоюзе развитие электрифицированного транспорта является одним из важнейших элементов так называемой программы “Green Deal” (“Зеленая сделка”), утвержденной в конце 2019 г. и нацеленной на достижение полной углеродной нейтральности Евросоюза к 2050 г. В качестве краткосрочной цели программой “Green Deal” предусматривается достижение численности парка электромобилей (включая гибриды) в ЕС на уровне 13 млн единиц уже к 2025 г., а к середине века — ввести полный запрет на продажи автомашин на традиционных видах топлива [4]. В ряде государств (Великобритания, Франция, страны Скандинавии) такой запрет планируется ввести еще раньше — уже с 2030–2040 гг.

В США, согласно указу Д. Байдена, к 2030 году до 50% новых легковых машин должны быть электрифицированными, гибридными или работать на водородных топлив-

ных элементах [5]. За счет их внедрения уровень эмиссии парниковых газов, приходящийся на единицу автопарка США, должен снизиться на 60% относительно 2020 г.

Стратегия развития электротранспорта в Китае, утвержденная министерством транспорта этой страны в 2019 г., предполагает мощную экспансию, в т.ч. и на мировой рынок. Плановый объем производства электромобилей (включая гибриды) на 2030 г. установлен в объеме 38 млн единиц. Предполагается, что к этому времени доля электротранспорта в суммарных годовых продажах автомашин достигнет 40%, что позволит на 50% снизить энергопотребление на долю ВВП страны [6].

Несмотря на то, что в России электромобили пока не получили широкого распространения (в отличие, например, от Китая и Европы), на законодательном уровне уже создан ряд инициатив в этой области (в частности, в 2021 г. была утверждена национальная Концепция развития производства и использования электрического автомобильного транспорта на перспективу до 2030 г. [7], в ряде городов страны запущены маршруты электробусов, строятся электрозарядные станции). Таким образом, возникает разумная потребность в анализе возможных последствий развития электрифицированного автомобильного транспорта в России — в части его воздействия на энергосистему страны (уровень электропотребления, спроса на мощность и профиль типового суточного графика нагрузки).

1. СЦЕНАРНЫЙ ПРОГНОЗ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ НА ГОДОВОЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ В ЕЭС РОССИИ ДО 2050 г.

На перспективу до 2030 г. показатели роста электрифицированного автотранспорта определены в Концепции развития производства и использования электрического автомобильного транспорта. В частности, предполагается достижение уровня годового производства электромобилей в 217 тыс. штук, а их накопленный парк (с учетом импортных машин) составит 1.4 млн штук. К сожалению, этот документ не содержит ни целевых показателей за пределами горизонта 2030 г., ни четких пропорций распределения парка электромобилей между разными сегментами транспорта — легковым, крупнопассажирским и грузовым. Такое деление очень важно, поскольку технико-экономические показатели принципиально различаются для каждого из сегментов.

В этой связи прогноз масштабов развития электротранспорта и его влияния на электропотребление после 2030 г. был выполнен сценарно, с детализацией по сегментам транспорта (легкового, грузового и крупнопассажирского). В каждом сегменте выделяется свой набор базовых факторов, определяющих совокупную численность его автопарка. Доля же электротранспорта в совокупном автопарке каждого сегмента задается в процентном выражении по состоянию на 2050 г. и отражает несколько сценариев электрификации (условно — активная, медленная или средняя по темпам).

В наиболее массовом сегменте рынка (легковой транспорт) базовой гипотезой является привязка динамики общего парка автомобилей к производству прогнозной численности населения страны на определенную дату и показателю обеспеченности автотранспортом на 1000 человек. Последний показатель достаточно распространен в международных сравнительных оценках как индикатор “насыщенности” авторынка в той или иной стране.

На рис. 2 представлены некоторые из публичных прогнозов численности населения России, выполненные в последние годы (Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2036 г. (Минэкономразвития РФ, ноябрь 2018) [8], прогноз Росстата (2020) [9], прогноз ООН (2019) [10]). Как показано на рис. 2, на уровне 2035 года диапазон прогнозов крайне широкий и составляет 18 млн человек.

Для целей данного исследования оптимистический сценарий численности населения был сформирован на основе оценки Росстата (средний и высокий сценарии) с корректировкой их на величину расхождения с фактической численностью в 2022 г.

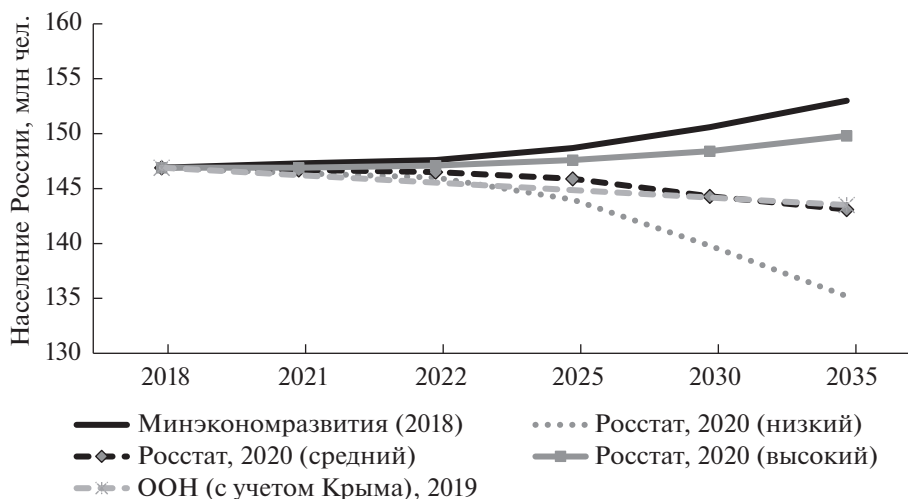


Рис. 2. Прогнозы численности населения России на перспективу до 2050 г.

(145.6 млн чел.). При сохранении тенденции к 2050 году это позволит достичь уровня 155.1 млн человек. Консервативная оценка опирается на прогноз ООН, сформированный до 2050 г. (138.2 млн чел.). Таким образом, на 2050 год диапазон неопределенности в численности населения составит 138–155 млн человек, что составляет чуть более 10% от уровня оптимистического прогноза.

Вторым ключевым параметром для прогнозирования общей численности автопарка является показатель обеспеченности населения страны автомобилями (т.н. коэффициент автомобилизации на 1000 человек). В России его ретроспективные значения можно определить на основе ежегодных отчетов “Автостата” о численности парка легковых автомобилей для каждого года [11] и деления этого значения на фактическое количество населения по данным Росстата. Динамика численности автопарка и выведенного на ее основе показателя коэффициента автомобилизации показана на рис. 3. Ретроспективный анализ свидетельствует о значительном торможении темпов роста этих показателей на отрезке 2014–2021 гг. после стремительного роста в нулевые годы. На перспективу до 2050 г. в работе принята гипотеза ИНП РАН [12] о достижении пикового уровня насыщения легковыми автомобилями в 378 авто на 1000 человек (с учетом потенциала совместного использования легковых автомобилей: такси, каршеринг и проч.).

Произведение двух показателей (численности населения страны и коэффициента обеспеченности автомобилями) позволяет спрогнозировать общую динамику автопарка легковых машин в России. В консервативном сценарии к 2050 г. он составит более 52 млн единиц, а в оптимистическом — почти 59 млн автомашин.

Ввиду высокой неопределенности будущих технико-экономических характеристик электромобилей (влияющих на их конкурентоспособность с традиционными, использующими нефтепродукты), а также масштабов стимулирования потребителей к отказу от двигателей внутреннего сгорания, доля рынка электромобилей по сценариям была задана параметрически. Для сегмента легковых электромобилей предполагается достижение к 2050 г. определенной доли авторынка — 30, 50 или 70% от совокупного автопарка. Последний показатель соответствует прогнозируемому МЭА уровню внедрения электромобилей, необходимому для достижения углеродной нетто-нейтральности к 2050 г. в целом по миру [13].

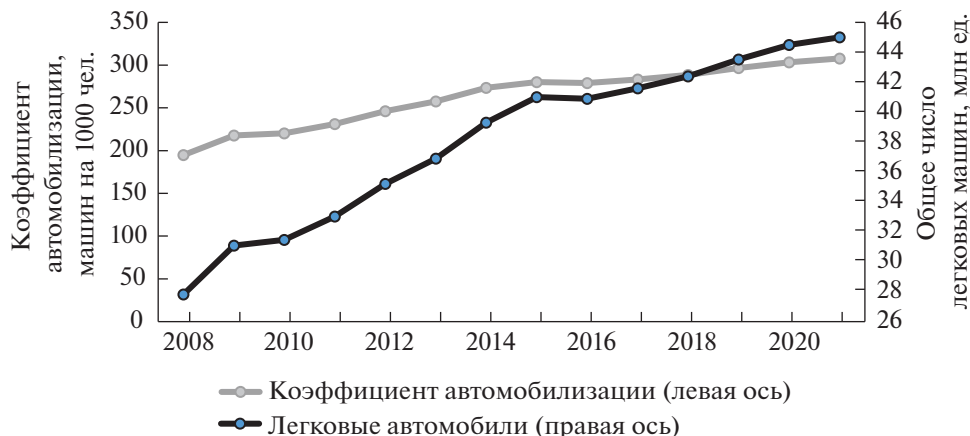


Рис. 3. Ретроспективная динамика коэффициента автомобилизации (количество легковых автомобилей на 1000 чел.) и общего парка легковых машин в России в 2008–2021 гг.

Оценка абсолютных величин автопарка легковых электромобилей в России для рассматриваемых демографических сценариев представлена в табл. 1. Показатель 2030 г. соответствует параметрам официально утвержденной Концепции развития электро-транспорта в России (при этом принято допущение, что легковые авто будут формировать 98% общего автопарка электротранспорта в это период). Показатели 2050 г. определены в долях от совокупного парка легковых машин. Для промежуточных лет прогнозного периода предполагается линейная траектория роста от уровня 2035 г. к уровню 2050 г.

Как видно из табл. 1, даже при 30%-й доле рынка число легковых электромобилей в стране вырастет до 15.6–17.6 млн единиц в зависимости от демографического сценария. При условии же массового внедрения легковых электромобилей (с достижением доли рынка на уровне среднемировой по прогнозам МЭА — 70%) их численность в стране составит 36.5–41 млн единиц.

Влияние масштабов развития легковых электромобилей на годовой объем электропотребления оценивается через усредненный показатель экономичности двигателя легкового электромобиля (в качестве типового объекта рассматривается одна из наиболее популярных на мировом рынке моделей — Nissan Leaf) и его типичный среднегодовой пробег. Расход электроэнергии автомобиля Nissan Leaf составляет около 19 кВт ч на 100 км пробега. Среднее значение пробега 1 российского автомобиля за год, по данным «Автостата», составляет около 17.5 тыс. км.

Как следствие, прирост потребления электроэнергии за счет развития электро-транспорта в легковом сегменте оценивается в величину от 52 до 136 млрд кВт ч на уровне 2050 г. (табл. 2). В целях сокращения числа вариантов для дальнейшего анализа были оставлены только 3 варианта из 6 первоначальных:

- 1) вариант 1 — 30%-я доля легковых электромобилей при консервативном демографическом прогнозе (минимальный уровень развития);
- 2) вариант 2 — 50%-я доля легковых электромобилей при консервативном демографическом прогнозе (средний уровень развития);
- 3) вариант 3 — 70%-я доля легковых электромобилей при оптимистическом демографическом прогнозе (максимальный уровень развития).

Таблица 1. Прогноз численности парка легковых электромобилей в России до 2050 г., млн ед.

	Годы						
	2022	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Численность парка легковых автомобилей							
в консервативном сценарии численности населения	44.8	44.2	44.9	45.3	47.5	49.8	52.1
в оптимистическом сценарии численности населения	44.8	45.0	47.3	49.8	52.7	55.6	58.6
В т.ч. парк электромобилей:							
в консервативном сценарии численности населения:							
Доля легковых электромобилей:							
30%	—	—	1.4	5.0	8.5	12.1	15.6
50%	—	—	1.4	7.6	13.7	19.9	26.0
70%	—	—	1.4	10.2	18.9	27.7	36.5
в оптимистическом сценарии численности населения:							
Доля легковых электромобилей:							
30%	—	—	1.4	5.4	9.5	13.5	17.6
50%	—	—	1.4	8.4	15.4	22.3	29.3
70%	—	—	1.4	11.3	21.2	31.1	41.0

Таблица 2. Оценка дополнительного объема электропотребления за счет развития легкового электротранспорта, млрд кВт ч

	Годы				
	2030	2035	2040	2045	2050
Консервативный сценарий численности населения					
Доля легковых электромобилей:					
30%	4.6	16.5	28.3	40.1	51.9
50%	4.6	25.1	45.6	66.0	86.5
70%	4.6	33.8	62.9	92.0	121.1
Оптимистический сценарий численности населения					
Доля легковых электромобилей:					
30%	4.6	18.1	31.5	45.0	58.4
50%	4.6	27.8	51.0	74.2	97.3
70%	4.6	37.6	70.5	103.4	136.3
Варианты, отобранные для дальнейшего анализа:					
Вариант 1	4.6	16.5	28.3	40.1	51.9
Вариант 2	4.6	25.1	45.6	66.0	86.5
Вариант 3	4.6	37.6	70.5	103.4	136.3

Вторым рассмотренным сегментом транспорта являются крупнопассажирские (автобусные) перевозки. Для прогноза динамики автобусного парка в стране была принята гипотеза о его корреляции с численностью населения в городах-миллионниках (поскольку именно на них приходится наибольшая часть автобусного парка страны). В 2022 г., по оценкам Росстата, доля населения городов-миллионников составила 24.5% совокупного населения страны (что составляет 35.7 млн человек). В нашем прогнозе предполагается сохранение (хотя и с постепенным замедлением темпов) тенденции роста доли населения городов-миллионников в процентном отношении (пример-

Таблица 3. Оценка потенциала развития электробусов и их влияния на электропотребление в России

	Годы					
	2022	2030	2035	2040	2045	2050
Численность населения городов-миллионников, млн чел.	35.7	37.6	39.1	40.7	42.4	44.1
<i>в % от населения РФ</i>	24.5%	27%	29%	30%	31%	32%
Автобусный парк всего, млн ед.	0.412	0.434	0.451	0.470	0.489	0.509
Число электробусов (при той или иной доле рынка к 2050 г.), млн ед.						
30% (вариант 1)		0.05	0.076	0.101	0.127	0.153
50% (вариант 2)		0.05	0.101	0.152	0.203	0.254
70% (вариант 3)		0.05	0.127	0.203	0.280	0.356
Вклад электробусов в электропотребление (при раз- ной доле рынка), млрд кВт ч						
30% (вариант 1)		11.7	17.7	23.7	29.7	35.7
50% (вариант 2)		11.7	23.7	35.6	47.6	59.6
70% (вариант 3)		11.7	29.6	47.5	65.5	83.4

но на 1–2 п.п. за пятилетие). В итоге к 2050 г. доля населения этих агломераций достигнет 32% от совокупного населения России или 44.1 млн чел. При условии линейной зависимости от этого параметра число автобусов в России вырастет с 412 тыс. в 2022 г. (данные из отчета “Автостата”) до 509 тыс. к 2050 г. (табл. 3).

Для электробусов, также как и легковых электромобилей, рассматриваются те же доли от суммарного их автопарка – 30, 50 и 70%. С точки зрения показателя экономической эффективности – приведенной стоимости владения за весь жизненный цикл – электробусы пока существенно уступают классическим автобусам с дизельным двигателем [14]. Однако при прогнозировании следует учитывать, что рынок электробусов практически полностью формируется государственными и муниципальными заказами. Это позволяет, по существу, субсидировать их более высокую стоимость из бюджетных средств, обеспечивая высокие показатели роста их доли на рынке перевозок (penetration rate). Величина среднегодового пробега электробуса в работе принята равной 150 тыс. км в год (подразумевается активное использование электробусов на городских рейсовых маршрутах). С точки зрения эффективности использования энергии за эталон был принят удельный расход электроэнергии московских электробусов (156 кВт ч/100 км по данным [15]). Отметим, что в литературе встречаются как более оптимистичные, так и более консервативные оценки удельного расхода электроэнергии электробусами. В частности, в [16] приводится диапазон 165–185 кВт ч/100 км, однако данная оценка выполнена применительно к длинному (и, как следствие, более тяжелому) автобусу–“гармошке”. В итоге прирост электропотребления в этом сегменте оценивается в 36–83 млрд кВт ч на уровне 2050 г.

Наконец, в секторе грузоперевозок целесообразно выделить два вида транспорта, различающиеся по своим характеристикам электропотребления и длительности пробега: легкий коммерческий транспорт (грузовые микроавтобусы) и грузовики. Разумным допущением при прогнозе общей величины автопарка этих средств представляется привязка к динамике грузоперевозок; однако ни в Прогнозе социально-экономического развития России до 2036 г., ни в иных документах такой показатель не публикуется. В этой связи было принято решение оценивать динамику парка грузовиков и грузовых микроавтобусов путем экстраполяции сложившегося тренда за последние 12 лет (соответственно, 0.3 и 1.4% в среднем за год, по данным ежегодных отчетов “Автостата” [17]).

Учитывая гораздо более высокий расход электроэнергии на единицу пробега (около 145 кВт ч/100 км по усредненным оценкам из источников [18, 19]), а также частые поездки между городами, требующие оснащения междугородних шоссе большим количеством зарядных станций, разумно рассмотреть для грузовых видов транспорта иные, более низкие, показатели целевой доли рынка, нежели для легковых электромобилей или субсидируемых электробусов. Прогноз численности электромобилей в грузовом сегменте был выполнен исходя из долей рынка в 10, 20 и 30% для соответствующих сценариев (табл. 4). При этом к 2050 г. прирост электропотребления за счет электрификации грузовых автоперевозок составит от 22 до 66 млрд кВт ч. Отметим, что в рамках работы были выполнены также и оценки исходя из долей рынка, аналогичных легковому сегменту (30/50/70%), при этом расчеты показали гораздо более высокий прирост электропотребления (в частности, в сценарии 70% в секторе грузоперевозок формировалось бы почти 500 млрд кВт ч дополнительного электропотребления, что в 2.2 раза превышает объем расхода электроэнергии в легковом и пассажирском сегментах вместе взятых и равно половине годового производства электроэнергии в настоящее время).

На рис. 4 показан суммарный прирост электропотребления в транспортном секторе, возникающий при достижении целевых уровней электрификации в каждом из четырех сегментов рынка. К 2040 г. его объем составит 93–240 млрд кВт ч, а к 2050 г. — от 168 до 460 млрд кВт ч. При этом более одной трети электропотребления сектора будет приходиться на долю грузовиков, несмотря на их относительную малочисленность в общем автопарке. Более чем 15-миллионный парк легковых электромобилей будет формировать лишь около 30% электропотребления в силу относительно небольшого показателя среднего годового пробега и кратно более низкого удельного расхода электроэнергии на километраж. Электробусы и электрифицированный коммерческий транспорт обеспечат примерно по 13–18% совокупного электропотребления.

2. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ НА ХАРАКТЕР ТИПОВЫХ СУТОЧНЫХ ГРАФИКОВ В ЕЭС РОССИИ

Не менее важным для долгосрочного планирования сценариев развития ЕЭС России является влияние электротранспорта на профиль суточного графика нагрузки. Для количественного анализа дополнительной потребности в мощности и параметров суточной неравномерности потребления электроэнергии электротранспортом был проанализирован опыт западно- и североевропейских стран. Такой выбор обоснован двумя факторами: во-первых, страны Западной и Северной Европы уже достигли статистически значимого уровня внедрения электротранспорта (penetration rate), а во-вторых, они достаточно близки к России с точки зрения климатических условий и сопоставимы по уровню урбанизации.

Полученные данные показывают наличие ярко выраженного утреннего и вечернего пика нагрузок легкового электротранспорта в сочетании с весьма глубоким ночным “провалом”. Так, в работе немецких ученых из Института Карлсруэ [20] показано, что в рабочие дни утренний пик наступает в районе 8–9 часов утра и быстро сменяется дневным провалом нагрузки (рис. 5, верхний график). Вечерний пик более растянут — с 16 до 19 ч, причем в странах Скандинавии он смещен в сторону более ранних часов (по-видимому, в силу особенностей рабочего дня в этих странах¹). В остальных рассматриваемых в исследовании странах (Великобритания, Германия, Нидерланды, Швейцария) вечерний пик начинается с 17–18 ч. С 20 до 22 ч объем потребления лег-

¹ Так, например, в Дании практикуется сокращенный рабочий день, причем не только в пятницу, но и в некоторые другие рабочие дни. Разрешается покидать работу родителям, дети которых ходят в детский сад или начальные классы школы.

Таблица 4. Оценка потенциала развития электрифицированного грузового транспорта и его влияния на электропотребление в России

	Годы				
	2030	2035	2040	2045	2050
Грузовые автомобили, млн ед.	3.9	3.9	4.0	4.0	4.1
<i>Число электрифицированных грузовиков (при разной доле рынка), млн ед.</i>					
10% (вариант 1)	0.01	0.1	0.2	0.3	0.4
20% (вариант 2)	0.01	0.2	0.4	0.6	0.8
30% (вариант 3)	0.01	0.3	0.6	0.9	1.2
<i>Вклад грузовиков в электропотребление при разной доле рынка, млрд кВт ч</i>					
10% (вариант 1)	1.4	15.7	30.0	44.3	58.5
20% (вариант 2)	1.4	30.3	59.2	88.1	117.1
30% (вариант 3)	1.4	45.0	88.5	132.0	175.6
Легкий коммерческий транспорт (ЛКТ), млн ед.	4.7	5.0	5.4	5.7	6.1
<i>Число электрифицированного ЛКТ (при разной доле рынка), млн ед.</i>					
10% (вариант 1)	0.02	0.2	0.3	0.5	0.6
20% (вариант 2)	0.02	0.3	0.6	0.9	1.2
30% (вариант 3)	0.02	0.5	0.9	1.4	1.8
<i>Вклад ЛКТ в электропотребление при разной доле рынка, млрд кВт ч</i>					
10% (вариант 1)	0.7	5.9	11.1	16.3	21.5
20% (вариант 2)	0.7	11.3	21.9	32.4	43.0
30% (вариант 3)	0.7	16.7	32.6	48.6	64.5

ковых электромобилей резко снижается и остается на минимальных уровнях вплоть до раннего утра.

В выходные дни график потребления легковых электромобилей приобретает абсолютно иную конфигурацию (рис. 5, нижней график). Ночной провал графика сохраняется, однако при этом отсутствуют выраженные утренние и вечерние пики. В выходные дни потребление легковых электромобилей растет плавно, начиная с 8–9 ч утра, и к 12 ч достигает своеобразного “плато”, сохраняющегося вплоть до вечерних часов (18–19 ч). Таким образом, в период с 12 до 19 часов почасовое потребление электротранспорта держится на достаточно стабильном уровне, без резких пиков и провалов. При этом конфигурация графика несколько варьируется по странам. В Швейцарии и Германии нагрузки начинают расти еще с раннего утра и достигают “плато” уже к 10–11 часам (на 1–2 часа опережая график других европейских стран), а во второй половине дня почасовое потребление там начинает постепенно снижаться (тогда как в Великобритании и Дании оно сохраняется на стабильном уровне до вечерних часов). Вызывает определенные вопросы график потребления выходного дня в Нидерландах — рост там начинается после полудня, при этом поздним вечером потребление сильно превышает показатели всех остальных стран. К сожалению, авторы работы не дают пояснений причин столь сильного смещения графика нагрузки в Нидерландах.

Очень близким по конфигурации к рис. 4 оказался и график суточного потребления легковых электромобилей во Франции по данным [21] (первоисточником являются данные системного оператора французской энергосистемы — компании RTE). Единственная разница состоит в том, что утренний пик во Франции оказывается более низким, не столь сильно выраженным, как например, в Германии или Дании. Если в рассмотренных выше странах Северной и Западной Европы в некоторые утренние ча-

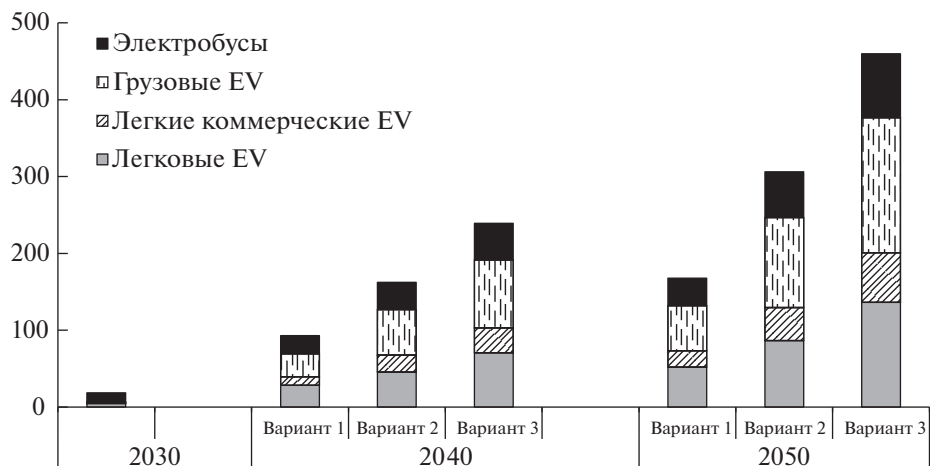


Рис. 4. Совокупный прирост электропотребления в транспортном секторе при разных масштабах его электрификации, млрд кВт ч.

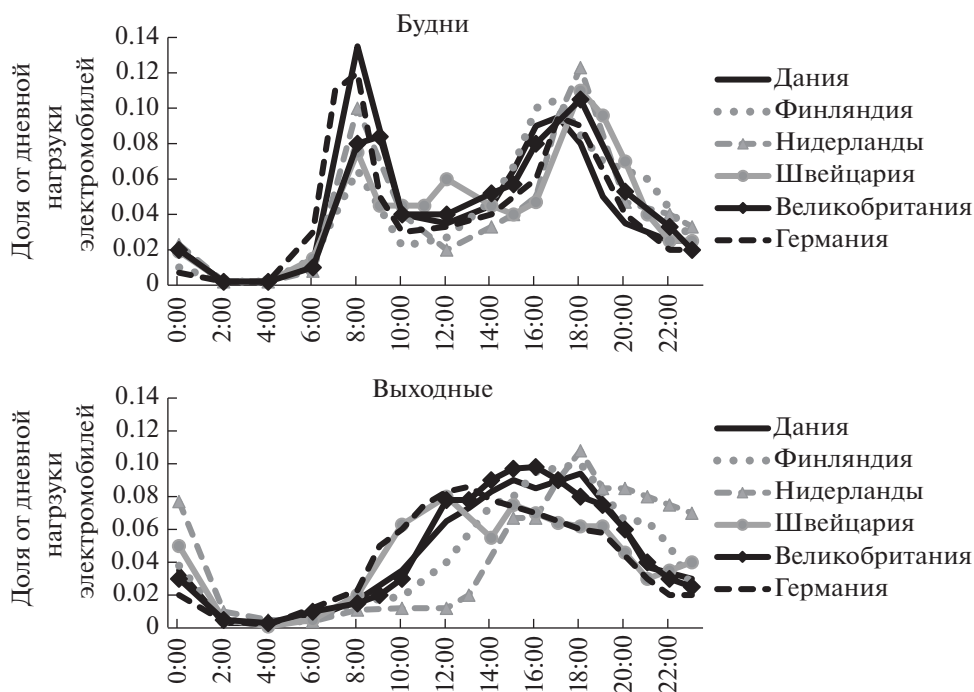


Рис. 5. Суточный график потребления энергии легковыми электромобилями в рабочий (верхний график) и выходной (нижний график) день, в долях от суммарного суточного потребления.

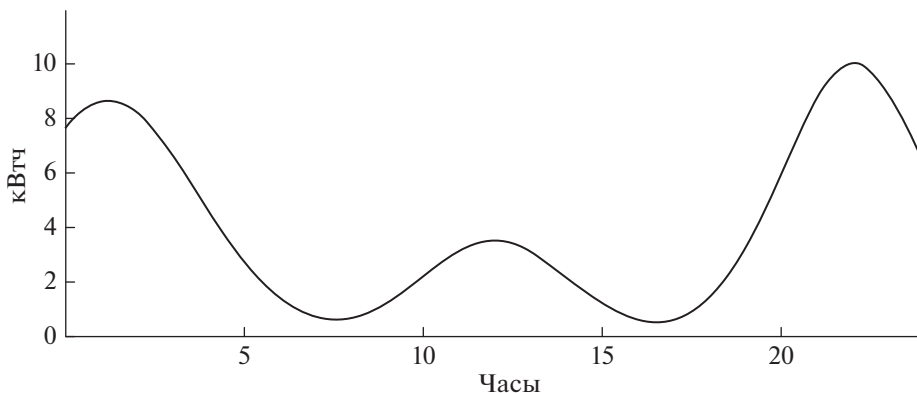


Рис. 6. Суточный график потребления электроэнергии для среднего электробуса в провинции Шандун, Китай, кВт ч.

сы потребление доходит до 9–12% суммарного за сутки, то во Франции по данным местного системного оператора оно не превышает 5% суточного. В вечерние же часы цифры оказались сопоставимыми — около 9% суточного потребления.

Электрифицированный грузовой транспорт, по данным статьи [22], характеризуется более ровным графиком потребления в дневные часы рабочих дней, чем легковые автомобили. При этом у грузовиков в выходные дни профиль суточной кривой примерно такой же, как и в рабочий день, хотя сами объемы ниже.

Суточный график потребления электробусов взят из работы [23], посвященной проблемам развития соответствующей зарядной инфраструктуры в провинции Шандун, Китай (рис. 6). Кривая суточного потребления электробусов выглядит иначе, чем для личного пассажирского транспорта. Основная зарядка осуществляется в ночные часы перед выходами автобусов на рейс. Кроме того, имеет место небольшой по амплитуде дневной пик, поскольку электробусам требуется дополнительная подзарядка внутри дня: емкость их аккумуляторов обычно недостаточна для многократного передвижения по заданному маршруту городской сети.

Проведенный анализ зарубежного опыта позволил сформировать два варианта суточных профилей нагрузки по каждому из трех сегментов транспорта (легковому, грузовому и автобусному) для представленных на рис. 4 вариантов прироста электропотребления за счет электрификации разных категорий автодорожного транспорта.

Первый вариант (далее — разуплотненный график) построен максимально приближенным к усредненному суточному профилю электропотребления соответствующего сегмента транспорта на основе проанализированной выборки зарубежных исследований. В данном варианте присутствуют ярко выраженные пики потребления в утренние и вечерние часы, а также ночной провал. Для электробусов пик спроса, напротив, приходится на ночные часы.

Второй вариант (далее — плотный график) построен в допущении о более равномерном характере использования зарядной инфраструктуры. В частности, предполагается активное использование возможностей т.н. медленной зарядки электромобилей (всех их видов, но в особенности — легковых) в ночные часы. Для этого частные жилые дома, а также общественные парковки и гаражные кооперативы должны быть оборудованы соответствующими зарядными установками. Кроме того, предполагается более равномерный характер использования общественной зарядной инфраструктуры (например, паркинги рядом с офисными центрами) в дневное время суток. Как

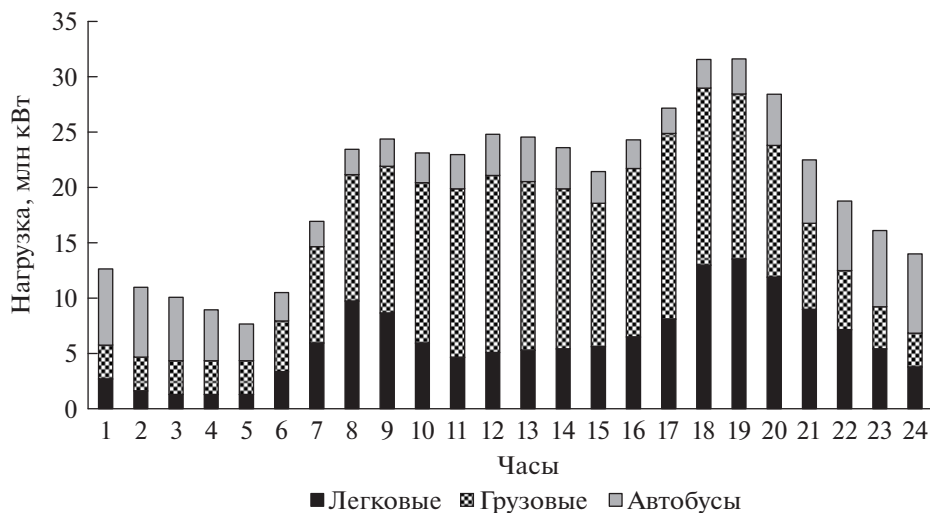


Рис. 7. График суточного потребления электротранспорта в 2050 г. (годовое потребление 168 млрд кВт ч, разуплотненный график), млн кВт².

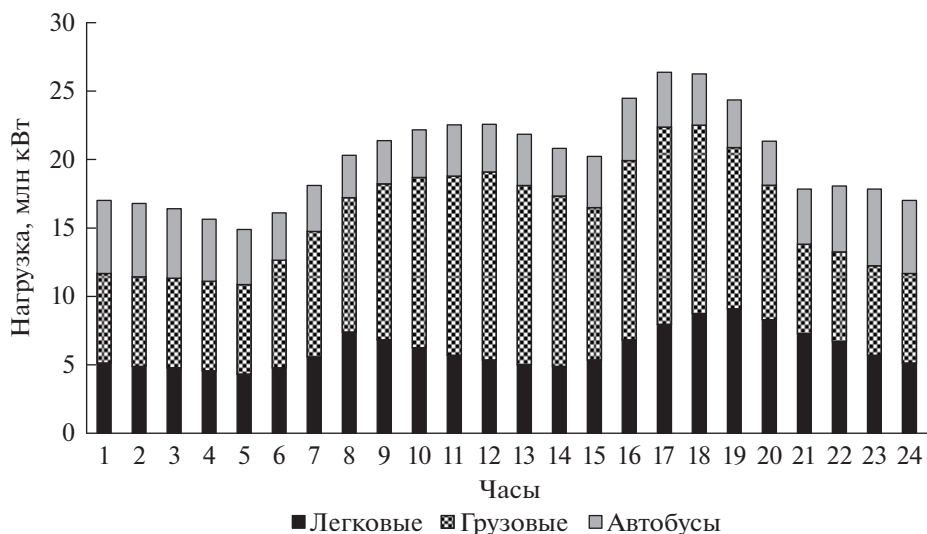


Рис. 8. График суточного потребления электротранспорта в 2050 г. (годовое потребление 168 млрд кВт ч, плотный график), млн кВт.

следствие, во втором варианте графики нагрузки всех видов транспорта оказываются гораздо более сглаженными, без резких утренних и вечерних пиков потребления.

Ниже, на рис. 7 и 8 представлен прогноз почасовых суточных нагрузок электротранспорта при разуплотненном и плотном графике зарядки для минимального варианта развития электротранспорта в 2050 г. (168 млрд кВт ч, см. рис. 4).

² Здесь и далее показатели грузовых машин включают в себя и микроавтобусы.

Таблица 5. Изменение суточных максимума и минимума потребления электромобилей в 2050 г. при разных масштабах их развития, млн кВт

		Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Разуплотненный график				
Суточный максимум	млн кВт	31.6	57.9	88.1
Суточный минимум	млн кВт	7.7	13.8	20.3
Разница	млн кВт	23.9	44.1	67.8
То же в % от максимума		75.7%	76.2%	77.0%
Плотный график				
Суточный максимум	млн кВт	26.4	48.8	73.5
Суточный минимум	млн кВт	14.9	27.0	40.4
Разница	млн кВт	11.5	21.8	33.1
То же в % от максимума		43.6%	44.7%	45.1%

В варианте с разуплотненным графиком пик потребления рабочего дня приходится на 18–19 ч вечера и составляет порядка 31.5 ГВт. В дневное время нагрузка составляет 21–25 ГВт, сохраняясь на стабильном уровне с 8 ч утра и до вечернего максимума. В ночные часы происходит постепенное падение почасового потребления до уровня 8–9 ГВт к 4–5 ч утра. Таким образом, внутрисуточный перепад почасовой нагрузки достаточно сильный и достигает 22 ГВт.

В варианте с плотным графиком вечерний максимум рабочего дня приходится на 17–18 часов и составляет 26 ГВт. При этом в дневные часы нагрузки варьируются в узком диапазоне 20–22 ГВт (что сопоставимо с показателями разуплотненного графика), в ночные же часы потребление существенно выше – 15–17 ГВт. Внутрисуточный перепад нагрузок сокращается в 2 раза – до уровня 11 ГВт, что снижает требования к уровню развития новой маневренной генерации и накопителей в энергосистеме по сравнению с вариантом разуплотненного графика.

В вариантах с более высоким годовым электропотреблением конфигурация графиков 7 и 8 меняется – растет внутрисуточный перепад почасовых нагрузок. Повышение суточного минимума и максимума нагрузок электротранспорта по вариантам показано в табл. 5. При разуплотненном режиме зарядки рост пикового часового потребления может достичь 58 млн кВт в варианте 2 и почти 90 млн кВт – в варианте 3. При этом суточные минимумы растут с заметным отставанием, что приводит к значительному увеличению внутрисуточной амплитуды колебаний нагрузки – до 44 млн кВт в варианте 2 и до 68 млн кВт – в варианте 3.

При плотном режиме зарядки создаваемые электромобилями пиковые и минимальные суточные нагрузки растут гораздо более “синхронно”. Так, в варианте 3 суточный максимум вырастет на 73 млн кВт, а минимум – на 40 млн кВт. Таким образом, внутрисуточный перепад нагрузок составит 33 млн кВт, что ровно вдвое меньше по сравнению с вариантом разуплотненного режима зарядки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показывает, что электромобили являются достаточно мощным фактором, влияющим на будущие объемы электропотребления и спроса на мощность в ЕЭС России. В зависимости от доли электротранспорта в совокупном автопарке страны, а также общих темпов роста самого автопарка, количество легковых электромобилей в России к 2050 г. может составить 15–50 млн единиц; количество электрифицированных грузовиков и автобусов может достигать нескольких сотен тысяч. При этом годовой объем спроса на электроэнергию со стороны электротранспорта составит 168 млрд кВт ч по нижней границе будущего парка электромобилей и до

460 млрд кВт ч — по его верхней границе. Таким образом, электротранспорт к середине века может добавить порядка 15–42% к текущему электропотреблению ЕЭС России (1090 млрд кВт ч в 2021 г.).

В структуре спроса до 40% будут занимать грузовые машины и микроавтобусы — несмотря на их гораздо меньшую численность по сравнению с легковыми электромобилями, большой пробег грузовиков и очень высокий удельный расход электроэнергии на километраж пробега обуславливают достаточно большой вклад грузовиков в суммарное электропотребление транспорта. Еще 30% общего потребления транспорта приходится на долю легковых электромобилей, примерно по 15% — на долю микроавтобусов и крупных пассажирских автобусов.

Еще более сильное влияние электромобили окажут на конфигурацию суточных графиков нагрузки. Если в выходные дни суточная неравномерность в характере заряда электротранспорта будет не столь выраженной, то в будние дни колебания будут значительными. Особенно это проявляется в случае с разуплотненным режимом зарядки электромобилей: разница между суточным минимумом и максимумом будет варьироваться от 25 млн кВт при минимальном развитии электромобилей до 68 млн кВт при максимальном варианте их развития. Таким образом, электромобили к середине века могут стать очень существенным фактором, требующим повышения потребности в маневренных возможностях производственной структуры в ЕЭС России. При более равномерном режиме зарядки электромобилей (что может быть достигнуто, например, при введении динамического, т.е. зависящего от реально складывающейся балансовой ситуации в энергосистеме, ценообразования на стоимость электроэнергии из сети) величина внутрисуточного перепада нагрузки заметно снизится.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-30013 от 17.03.2021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEA. Tracking transport report 2021. — URL: <https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2021> (дата обращения: 09.09.2022)
2. IEA. Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2021 Global emissions rebound sharply to highest ever level. — URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2> (дата обращения: 09.09.2022)
3. IEA. Global EV Outlook 2022. April 2022. — URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ad8fb04c-4f75-42fc-973a-6e54c8a4449a/GlobalElectricVehicleOutlook2022.pdf> (дата обращения: 09.09.2022)
4. European Commission. The Green Deal, December 2019. [Электронный ресурс]. — URL: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF (дата обращения: 20.05.2022)
5. Официальный пресс-релиз Президента США, 5 августа 2021. [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/08/05/fact-sheet-president-biden-announces-steps-to-drive-american-leadership-forward-on-clean-cars-and-trucks/> (дата обращения: 20.05.2022)
6. Агентство NOW gmbh. Factsheet: Battery electric mobility in China. Status October 2020. [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/11/Factsheet-China-Battery-EN.pdf> (дата обращения: 20.05.2022)
7. Концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года (утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 23 августа 2021 г. № 2290-р)
8. Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2036 года. Разработан Министерством экономического развития Российской Федерации, дата опубликования 28 ноября 2018 г. — URL: https://www.economy.gov.ru/material/directions/makroec/prognozy_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya/prognoz_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya_rossiyskoy_federacii_na_period_do_2036_goda.html
9. Официальный сайт Росстата, раздел “Демография”, подраздел “Демографический прогноз до 2036 г.” (для открытия файла требуется программа MS Excel). — URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/12781>
10. Новостной сайт РБК. ООН оценила демографические перспективы хуже Росстата. — URL: <https://www.rbc.ru/economics/24/06/2019/5d0b43749a794718129aa169>

11. Информационно-аналитический портал “Автостат”. Годовой отчет “Структура и прогноз парка легковых автомобилей в России”. — URL: <https://www.autostat.ru/research/product/397/>
12. ИНИП РАН. Потенциальные возможности роста российской экономики: анализ и прогноз. Июль 2022 г. — URL: <https://ecfor.ru/wp-content/uploads/2022/07/potentialnye-vozmozhnosti-rosta-rossijskoj-ekonomiki-analiz-i-prognoz.pdf>
13. IEA. Global EV Outlook 2022. — URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>
14. Зиновьев С. Кто заменит электробус? // За рулем, 15 февраля 2022. — URL: <https://www.zr.ru/content/articles/933331-kto-zamenit-ehlektrobus/>
15. Журнал “За рулем”, интервью с исполнительным директором ФГУП “НАМИ”. — URL: <https://www.zr.ru/content/articles/933443-mosgortrans/>
16. Информационно-деловой портал автобусной техники “SustainableBus.com”. — URL: <https://www.sustainable-bus.com/news/electric-bus-range-focus-on-electricity-consumption-a-sum-up/>
17. Информационно-аналитический портал “Автостат”. Годовой отчет «Структура и прогноз парка грузовых и коммерческих автомобилей в России». — URL: <https://www.autostat.ru/research/product/443/>
18. Argonne National Laboratory. Comprehensive Total Cost of Ownership Quantification for Vehicles with Different Size Classes and Powertrains. Report # ANL/ESD-21/4, April 2021.
19. Ассоциация производителей электротранспорта и инфраструктуры “Transport environment” [электронный ресурс] — URL: https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/20180725_T&E_Battery_Electric_Trucks_EU_FINAL.pdf
20. Babrowski S., Heinrichs H., Jochem P., Fichtner W. Load shift potential of electric vehicles in Europe // Journal of Power Sources, Vol. 255 (2014), p. 283–293.
21. Assoumou E., Marmorat J.-P., Houel J., Roy V. Load curve impact of large electric vehicles fleet in the Paris Ile-de-France region. [Research Report] Working Paper 2015-04-18, Chaire Modélisation prospective au service du développement durable. 2015, pp. 40 Les Cahiers de la Chaire.
22. Taljegard M., Göransson L., Odenberger M., Johnsson F. Spacial and dynamic energy demand of the E39 highway — Implications on electrification options // Applied Energy, Vol. 195 (2017). P. 681–692.
23. Wu Kuihua, Niu Xinsheng, Wang Jian, Wu Kuizhong, Jia Shanjie. Electric Vehicle Load Characteristic Analysis and Impact of Regional Power Grid / Proc. of 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT-2012). Beijing, 2012.

Impact of Electrification in the Road Transport Sector on the Level of Electricity Consumption and Daily Load Curve in the UES of Russia

F. V. Veselov^{a, *}, A. I. Solyanik^a, and R. O. Alikin^a

^aEnergy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: erifedor@mail.ru

The article assesses the impact of potential motor transport sector electrification on the value of the aggregate demand for electricity and capacity in the UES of Russia. Despite official documents suppose quite modest quantitative targets for the electric transport until 2030, in the longer term, a large-scale replacement of oil fuel with electricity will have a significant effect on reducing greenhouse gas emissions, but will also require a more intensive development of generating and network capacities in the electric power industry. The scenario forecast for the development of electric transport is made with the allocation of three segments – cars, trucks and buses, which allows taking into account the characteristics of electricity consumption characteristic of each of them. Another important result is an assessment of the possible extent of the influence of electric transport on the configuration of a typical daily load curve. The paper considers various modes of using infrastructure for electric transport charging, which result in different daily load curves. It is shown that, depending on the scales of electric transport development, their annual electricity consumption in the country will lay in the diapason from 168 to 460 TWh. At the same time, depending on the charging mode of electric vehicles, the additional power demand will vary from 26 to 74 million kW, and the amplitude of fluctuations in the hourly loads of electric vehicles will vary from two to four times.

Keywords: electrification, electric vehicles, decarbonization, electricity demand, load curve