

# Статистические характеристики городского цикла движения автобусов: измерение и анализ

А. В. Арбузов

*Высшая школа компьютерных технологий и информационных систем Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*

arbuzov\_av@spbstu.ru

А. В. Пашков

*Высшая школа компьютерных технологий и информационных систем Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*

pashkov.av@edu.spbstu.ru

К. К. Семенов

*Высшая школа компьютерных технологий и информационных систем Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*

semenov\_kk@spbstu.ru

В. А. Сушников

*Высшая школа компьютерных технологий и информационных систем Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого*

sushnikov\_va@spbstu.ru

**Аннотация.** Движение общественного транспорта по дорогам общего пользования в городской черте характеризуется определенными шаблонами и цикличностью. В настоящем докладе выполнен статистический анализ движения автобусного транспорта в г. Великий Новгород по результатам телеметрических измерений. Представлен анализ характеристик распределения параметров основного цикла движения, и распределения значений скорости перемещения. Сделаны статистически значимые выводы о возможностях повышения эффективности рекуперации для электробусов при движении последних в городской черте.

**Ключевые слова:** городской цикл движения, статистический анализ, электробусы, рекуперация

## I. ВВЕДЕНИЕ

Распространение применения электробусов в качестве общественного транспорта ставит задачу повышения эффективности их использования, которое напрямую определяется длительностью их хода от одного заряда аккумуляторной батареи [1, 2]. В условиях, когда увеличение емкости последней сопряжено с увеличением габаритных размеров, особое значение приобретают системы повышения эффективности движения за счет рекуперации электрической энергии [3, 4]. Для достижения максимума величины возвращаемой в аккумулятор энергии необходимо учитывать характеристики типового повторяющегося движения электротранспорта, поскольку без них нет возможности настроить систему рекуперации, обеспечивающую наибольшую эффективность в нужном диапазоне скоростей перемещения в пределах городской черты и при заданном типовом усредненном цикле движения [5].

Городской тип движения имеет важные особенности – цикличность с относительно коротким размером цикла, включающего в себя промежутки ускорения, равномерного движения и торможения [6]. В настоящей работе выполнено исследование статистических характеристики данного цикла с точки зрения возможностей рекуперации для городских электробусов.

## II. СОБРАННЫЙ МАССИВ ДАННЫХ

Был выполнен анализ собранных ранее авторами количественных сведений о перемещениях городского электротранспорта при осуществлении пассажирских перевозок в г. Великий Новгород (по соглашению с организатором перевозок АО «Автобусный парк»). Собранные данные представляли собой сведения в стандартном формате .csv, собранные и сохраненные штатными средствами измерения местоположения транспорта в ходе его движения (координаты положения, время выполнения измерения). Полученные записи представляли собой массив числовых сведений о координатах (широта и долгота) с неравномерной временной сеткой дискретизации. Измерение координат и выставление временных меток осуществляется при помощи GPS-трекеров, соответственно точностные характеристики записываемых сведений определяются условиями движения, захватом сигналов от достаточного количества спутников, наличием переотражений сигнала от строений вдоль траектории движения транспорта. В целях оптимизации объема данных, сохраняемых в память трекеров движения общественного транспорта, запись производится только в случае значимого изменения координат. Отсутствие повторных измерений приводит к невозможности оценки неопределенности получаемых координат и к необходимости введения коррекции получаемых результатов путем их соотнесения с картой. Поскольку городской наземный общественный транспорт, следующий по заданным маршрутам, перемещается только по дорогам общего пользования, то координаты его местоположения не должны выходить за пределы границ соответствующих трасс. Таким образом, основной метрологической процедурой, возможной к применению в указанных условиях является согласование данных [7] и сопряженное с ним удаление грубых промахов [8], которые были применены к собранным данным.

Примеры сведений от GPS-приемников, сохраняемых в архивах перемещений городского транспорта, представлены ниже (для маршрутов №№ 830 и 844,

номера конкретных автобусов удалены в целях обезличивания). Навигационные данные представлены в соответствии со стандартом NMEA 0183 [9], каждая строка csv-файла имеет формат RMC-строки и содержит рекомендуемый минимум навигационных данных GPRMC указанного стандарта. Ниже в Листинге 1 представлен пример записей.

```
,GPRMC,status,latitude,latitude_direction,longitude,longitu
de_direction,speed,bearing,category
2023-02-14 21:00:18,$GPRMC,A,58.535286666666664,N,
31.303383333333333,E,0.0,124.0,830 Bus
2023-02-14 21:00:18,$GPRMC,A,58.535286666666664,N,
31.303383333333333,E,0.0,124.0,830 Bus
2023-02-14 21:00:48,$GPRMC,A,58.535286666666664,N,
31.303383333333333,E,0.0,124.0,830 Bus
2023-02-14 21:00:48,$GPRMC,A,58.535286666666664,N,
31.303383333333333,E,0.0,124.0,830 Bus
...
,GPRMC,status,latitude,latitude_direction,longitude,longitu
de_direction,speed,bearing,category
2023-02-14 21:00:11,$GPRMC,A,58.53524,N,31.30331,
E,0.0,132.0,844 Bus
2023-02-14 21:00:11,$GPRMC,A,58.53524,N,31.30331,
E,0.0,132.0,844 Bus
2023-02-14 21:00:41,$GPRMC,A,58.53524,N,31.30331,
E,0.0,132.0,844 Bus
2023-02-14 21:00:41,$GPRMC,A,58.53524,N,31.30331,
E,0.0,132.0,844 Bus
...
```

Листинг 1 – Примеры записи RMC-строк для анализируемых маршрутов

Строка заголовков указывает на минимально достаточный перечень сведений, содержащихся в сохраняемом архиве, о движении городского транспорта: «временная метка для сведений о расположении», «широта», «долгота». Остальные сведения носят либо производный характер и могут быть вычислены исходя из указанных данных, либо содержат вспомогательную информацию.

Перед выполнением анализа данных сведений о реальных профилях движения городского транспорта значения о широте и долготе были дополнены сведениями о высоте над уровнем моря (для определения ситуаций движения по наклонной поверхности) согласно модели геоида EGM2008 [10]. Для выполнения анализа о реальных профиля движения городского транспорта в г. Великий Новгород количественные сведения были визуализированы путем нанесения на карту города. Примеры подобных составленных траекторий движения представлены на рис. 1 (маршрут №830) и рис. 2 (маршрут №844) и соответствуют тем записям, фрагменты которых представлены в Листинге 1.

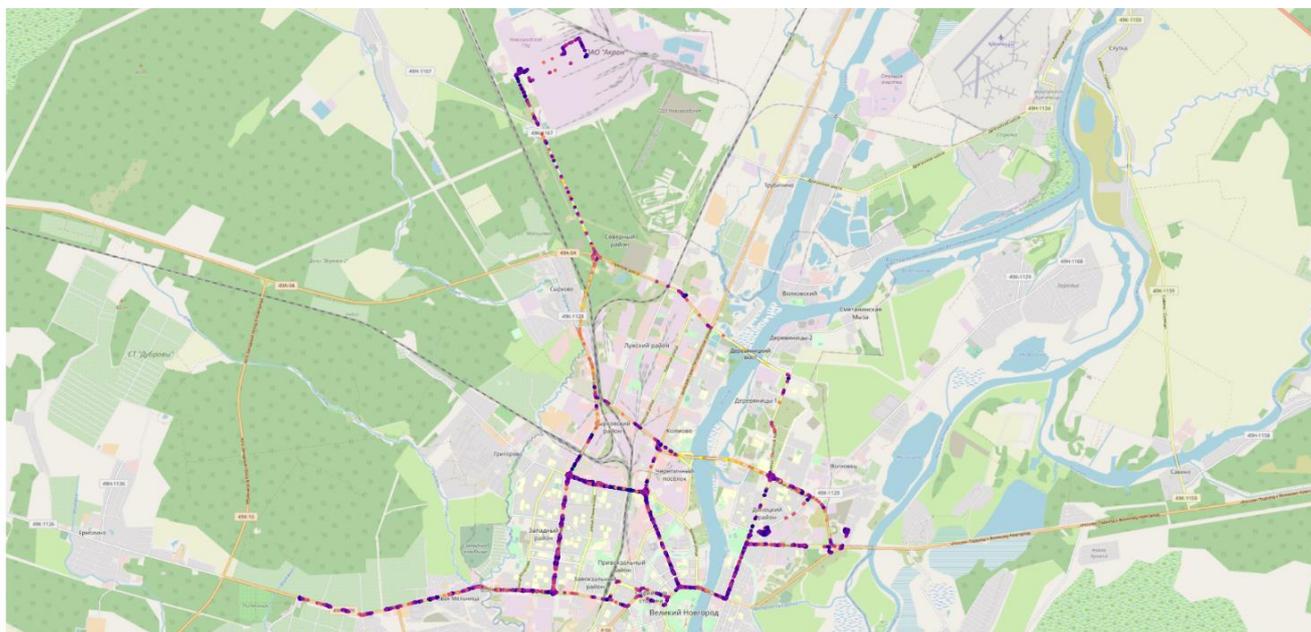


Рис. 1. Нанесение результатов измерений перемещений автобуса маршрута №830 в г. Великий Новгород на карту города: красные точки – движение по маршруту в прямом направлении, синие точки – в обратном

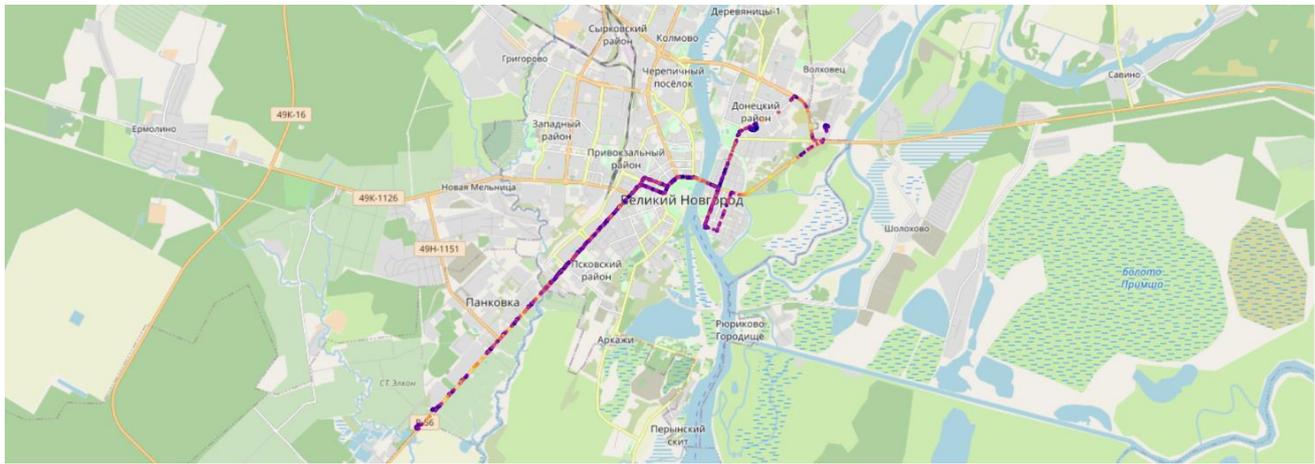


Рис. 2. Нанесение результатов измерений перемещений автобуса маршрута №844 в г. Великий Новгород на карту города: красные точки – движение по маршруту в прямом направлении, синие точки – в обратном

### III. АНАЛИЗ СОБРАННЫХ ДАННЫХ

Полученные и прошедшие предварительную обработку записи движения городского транспорта были преобразованы в атомарные записи городского цикла движения по следующему алгоритму.

1) На первом этапе осуществлялось разбиение профиля на атомарные блоки, в результате которого получалась последовательность блоков, каждый из которых мог быть в дальнейшем обработан отдельно. Каждый блок представлял собой цикл, начинавшийся с трогания транспортного средства из состояния отсутствия движения, продолжавшийся набором скорости, впоследствии переходившим в движение накатом и торможение, и завершавшийся остановкой транспортного средства.

2) Каждый атомарный блок подвергался оптимизации с целью определения величины потенциального ресурса для рекуперации и минимизации энергозатрат, связанных с движением транспортного средства.

Для этого использовались специально разработанные авторами программные средства, и экспериментальный стенд, воспроизводящий заданный профиль движения и способный измерять уровень рекуперации (рис. 3). Данный стенд представлял собой электромеханическую систему с тремя двигателями (которые моделировали электродвигатель электротранспортного средства, переменную управляемую нагрузку и рекуперативную подсистему), сопровождаемую измерительными каналами для получения эмпирических данных о происходящих процессах. Результаты измерений служили для оценки потенциально достижимого эффекта в экономии потребляемой электрической энергии. На рис. 4 представлен пример воспроизведенного атомарного блока профиля движения и результатов измерений сигналов силы тока и напряжения в электромеханической системе транспортного средства, перемещающегося согласно данному профилю движения в городских условиях.

3) После получения сведений об энергии, затраченной транспортным средством при движении

согласно атомарному блоку в городских условиях осуществлялась оценка минимально достижимых затрат энергии при движении по тому же самому атомарному блоку, но с другим (оптимальным) профилем движения при следующих условиях: сохранялась та же длина пройденного пути, величина скорости движения была ограничена сверху правилами транспортного движения, величина возможного ускорения при акселерации и торможении также была ограничена. Измеренные значения затраченной энергии позволяли судить о запасе для повышения энергоэффективности движения.

Пример полученного оптимального профиля движения для зарегистрированной архивной записи движения городского автобуса, содержится на рис. 5. Для представленного конкретного профиля достижимый выигрыш в энергоэффективности составил 23%.

Выполненный статистический анализ профилей движения городского транспорта показал следующее.

1) Распределение скоростей движения в городских условиях имеет вид: (40,2±0,1)% времени транспортное средство имеет скорость от 0 до 10 км/ч; (19,0±0,1)% времени – скорость от 10 до 20 км/ч; (21,8±0,1)% времени – скорость от 20 до 30 км/ч; (13,1±0,1)% времени – скорость от 30 до 40 км/ч; (3,2±0,1)% времени – скорость от 40 до 50 км/ч; (2,8±0,1)% времени – скорость от 50 до 60 км/ч.

2) Имеет место значительный запас для повышения энергоэффективности, не охваченный современными средствами рекуперации на городском электротранспорте с автономным ходом, поскольку последние малоспособны обеспечить возврат энергии при скоростях движения до 30 км/ч, на которых городской транспорт перемещается более половины времени движения.

3) Выполненный анализ профилей движения городских автобусов (с элементами физического моделирования) указывает на возможность увеличения рекуперированной энергии на (25±3)% на одном заряде аккумуляторных батарей на реальном цикле движения типового электробуса.

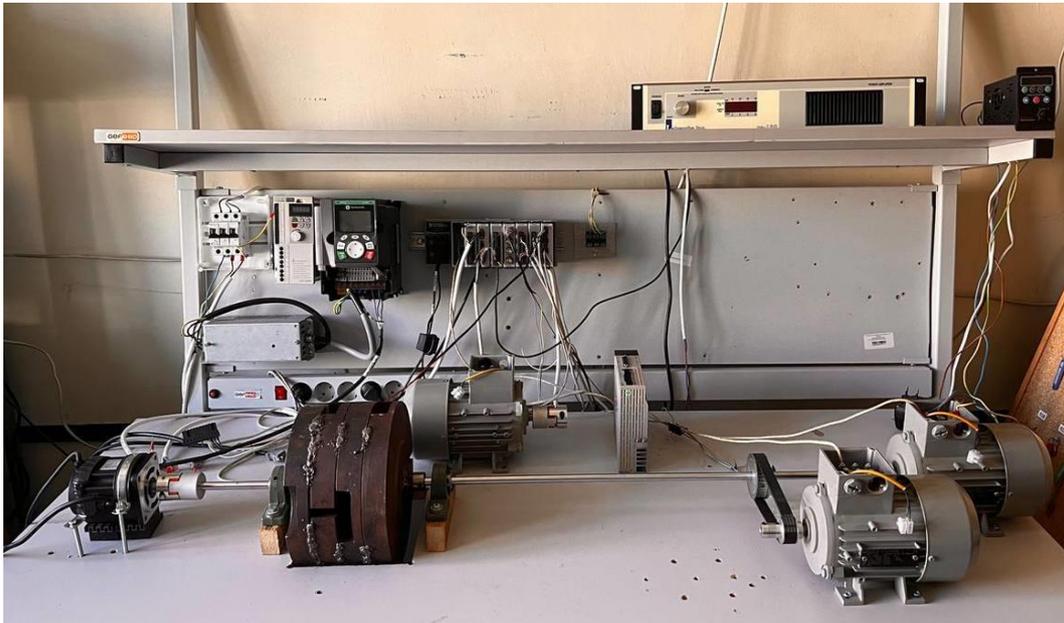


Рис. 3. Фотография экспериментального стенда для управления тяговым электродвигателем электротранспорта для эффективной рекуперации

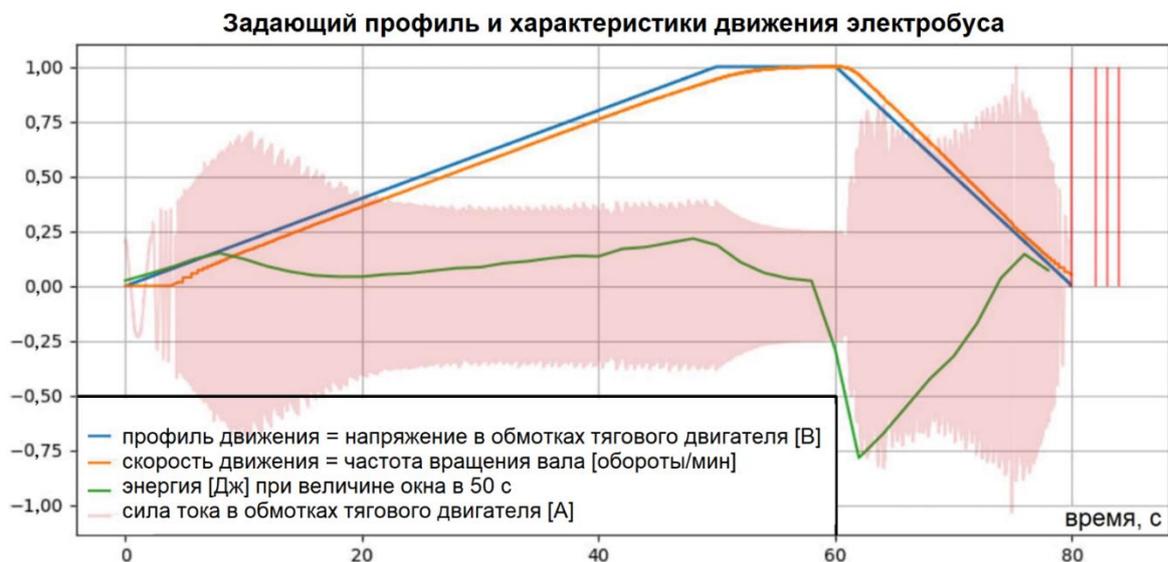


Рис. 4. Результаты воспроизведения атомарного блока профиля движения транспортного средства в городских условиях на экспериментальном стенде с целью определения ресурса для повышения энергоэффективности

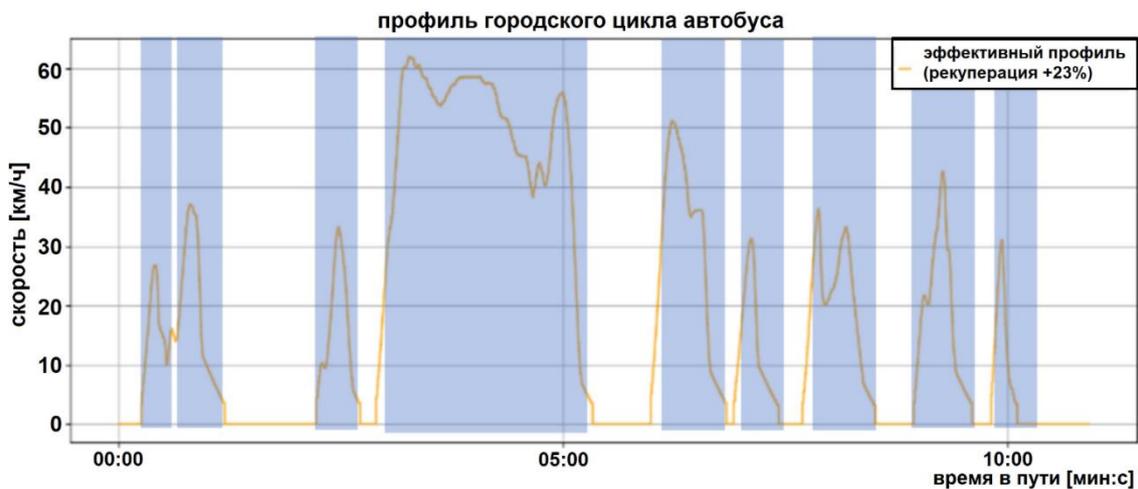


Рис. 5. Полученный эффективный профиль движения транспортного средства в городских условиях, позволяющий достичь минимума затрат энергии при том же пройденном пути (следует сравнивать с рис. 1)

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе на примере собранных данных о движении двух городских автобусных маршрутов показано, что движение общественного наземного городского транспорта по дорогам общего пользования отличается цикличностью с определенными характеристиками. Был выполнен статистический анализ движения автобусного транспорта в г. Великий Новгород, по результатам которого представлены сведения об основном цикле движения и о распределении скоростей перемещения. С применением специальной математической обработки полученных траекторий движения автобусов и экспериментального стенда для физического моделирования работы тягового двигателя электробуса показано, что запас по рекуперации для рассмотренного основного цикла движения составляет 23%, что указывает на перспективность построения систем управления рекуперации для городского цикла движения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Горожанкин С.А., Савенков Н.В., Соболев О.В., Моржухин А.М. Разработка мероприятий по увеличению запаса хода электробусов установкой системы терморегуляции на основе фазопереходных теплоаккумулирующих материалов // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21. №. 1. С. 62-73.
- [2] Y. Zhang, W. Yuan, R. Fu, C. Wang, "Design of an energy-saving driving strategy for electric buses," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 157693-157706, 2019.
- [3] P. Spichartz, P. Dost, C. Sourkounis, "Examination and measurement of range extension using different recuperation modes in electric vehicles," 2014 IEEE Industry Application Society Annual Meeting (pp. 1-9). IEEE, 2014.
- [4] G. Xu, W. Li, K. Xu, Z. Song, "An Intelligent Regenerative Braking Strategy for Electric Vehicles," *Energies*, vol. 4(9), p. 1461-1477, 2011.
- [5] Орел Е.О. Повышение энергетической эффективности систем тягового электропривода автономных транспортных средств: дис. ... канд. техн. наук. / Новосибирск, 2023.
- [6] Попов Н.С. Повышение энергетической эффективности системы тягового электропривода безрельсового транспортного средства: дис. ... канд. техн. наук. / Новосибирск, 2022.
- [7] V.A. Garanin, K.K. Semenov, "Increasing measurement accuracy by nonparametric data reconciliation," *Measurement*, vol. 238, paper 115235, 2024.
- [8] S. Narasimhan, C. Jordache, "Data reconciliation and gross error detection: An intelligent use of process data," Elsevier, 1999.
- [9] R. Langley, "NMEA 0183: A GPS receiver," *GPS world*, vol. 6(7), p. 54-57, 1995.
- [10] N.K. Pavlis, S.A. Holmes, S.C. Kenyon, J.K. Factor, "The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)." *Journal of geophysical research: solid earth*, vol. 117(B4), paper B04406, 2012.