

УДК 621.43

А.Н. Тихомиров, В.В. Щербаков

**ВОПРОСЫ ВЫБОРА МОЩНОСТИ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ  
ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ТРАНСПОРТНОЙ ЭЛЕКТРОПЛАТФОРМЫ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрена экспериментальная и аналитическая оценка энергетических затрат на движение электрического транспортного средства различной энерговооруженности в условиях разных циклов движения. На основании этого сделан выбор мощности вспомогательной бортовой энергетической установки достаточной для полной или частичной компенсации данных затрат энергии.

*Ключевые слова:* электроплатформа, аккумуляторная батарея, мощность, вспомогательная энергоустановка.

Доля электромобилей сегодня примерно 0,5% от общего числа транспортных средств, и уже сейчас возникает противоречие между развитием электротранспорта и существующей энергетической инфраструктурой. В отличие от систем батарейных электромобилей, выработка электроэнергии – это зрелая технология, и законы передачи энергии останутся в значительной степени неизменными. Если использование электротранспорта следует рассматривать как меру снижения экологической нагрузки на крупные города, то именно в крупных центрах имеющиеся электросети работают на пределе, не позволяющем наращивать передаваемую электрическую мощность [1].

Выход из положения видится в генерации электроэнергии непосредственно на борту транспортного средства. Использование так называемых расширителей пробега (*range extender*) не противоречит общей концепции электроплатформы. Транспортное средство (ТС), которое может быть крупнотоннажным, способно въезжать в центры городов на электротяге, не загрязняя воздух и избегая платы за это.

Пробег на электроэнергии может быть невелик, примерно 50 км, но в большинстве случаев этого достаточно для выполнения транспортной работы. При удалении от центра вспомогательная энергоустановка включается для подзарядки батарей, и вопрос заключается только в ее эффективности и экологичности. Достигается компромисс между традиционными и инновационными технологиями.

Каков может быть источник вспомогательной энергии? В самом общем виде – это некая система преобразования химической энергии топлива (жидкого или газообразного) в электрическую энергию. Непосредственно генерация электроэнергии в большинстве случаев обеспечивается электродинамическим генератором тока. А вот промежуточным звеном преобразования химической энергии в механическую служит тепловой двигатель – традиционный поршневой двигатель внутреннего сгорания, газовая турбина или двигатель внешнего сгорания. Существует способ получения электрического тока из химической энергии топлива без промежуточных преобразований в тепловую и механическую энергию – топливные элементы. Их преимуществами, в сравнении с традиционными автономными источниками энергии, являются высокая эффективность использования топлива, меньшие показатели шума и вибрации, высокая маневренность во всем диапазоне нагрузок.

Для транспортного средства с непосредственной передачей энергии от двигателя на колеса мощность силовой установки выбирается из условий достижения заданной максимальной скорости и желаемой динамики разгона. Гибридные автомобили комплектуются ДВС пониженной мощности и при динамичных разгонах на короткое время рассчитывают на помощь электропривода и запасенную в аккумуляторах энергию. У электроплатформ, где вспомогательная энергосистема не может помочь движению, выходная мощность должна выбираться так, чтобы соответствовать средней мощности движения ТС за некий цикл.

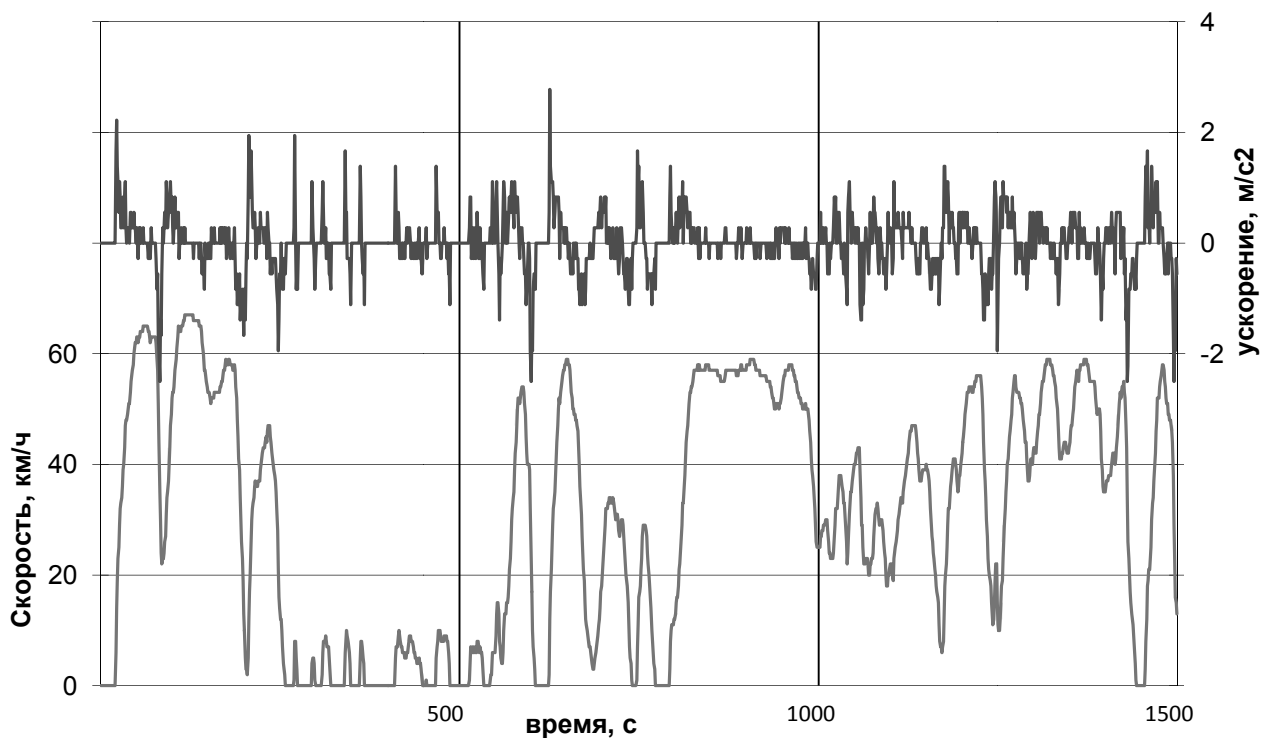


Рис. 1. Фрагмент записи движения ГАЗ А21R22 по городу

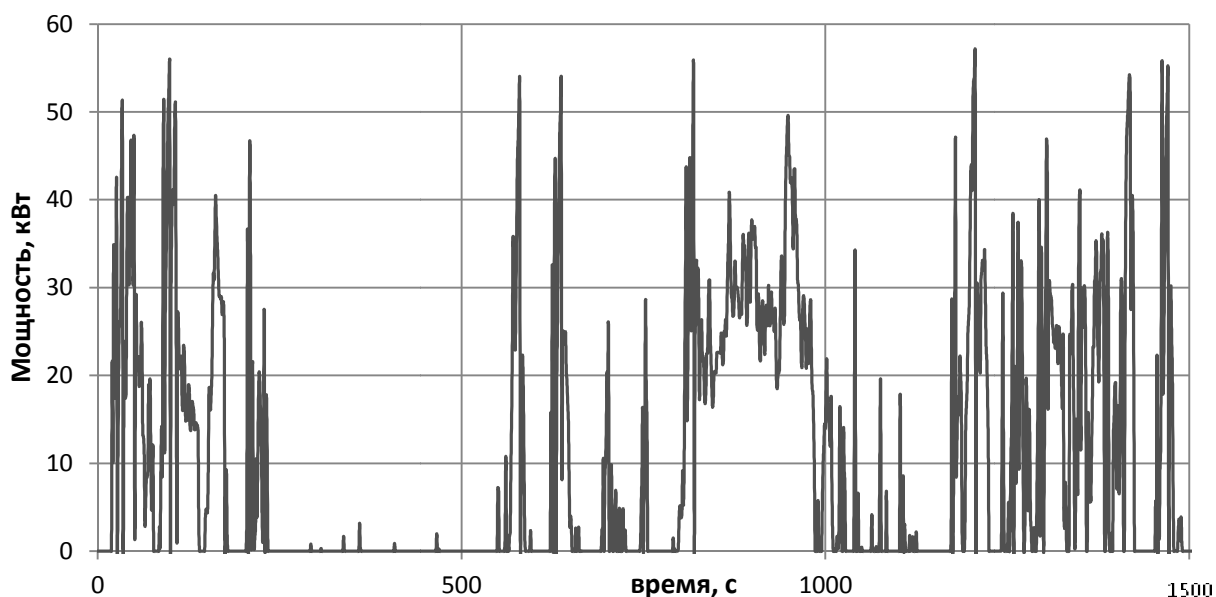


Рис. 2. Мощность, затраченная на движение ГАЗ А21R22 по городу (фрагмент)

Требовать от вспомогательной энергоустановки высоких мощностей нецелесообразно. Максимальная скорость и динамика ТС обеспечивается энергией, запасенной в батареях. К тому же в городской среде, где планируется основная эксплуатация электроплатформ, доля максимальных нагрузок чрезвычайно мала, а доля остановок и движения с малыми скоростями – велика.

В качестве примера на рис. 1 приведен фрагмент записи параметров движения автомобиля ГАЗ А21R22, двигавшегося с полной массой 3500 кг в условиях крупного города, а на рис. 2 – мощности, отбираемой от двигателя в этих условиях. Производилась запись пара-

метров макропрофиля дороги (Racelogic VBOX3i 100Hz), данных с блока управления двигателя о расходе топлива (CAN), в контрольных точках ручным триггером ставились временные метки. Маршрут начинался и заканчивался в одной точке для исключения влияния перепада высот, которые составляли около 100 м. Общая длина заезда составила 42,5 км, средняя скорость движения – 26,3 км/ч, максимальное ускорение достигало 3 м/с<sup>2</sup>. Запись длилась 6090 с, но для удобства сравнения с расчетным циклом, приведенным далее, на рисунках представлены только фрагменты записи длительностью 1500 с.

Видно, что только на коротком участке движения в диапазоне от 820 до 980 с, где ТС преодолевало затяжной подъем, мощность сохранялась на уровне примерно 25...30 кВт. На всем остальном маршруте мощность была востребована импульсно и расходовалась, главным образом, на ускорение транспортного средства. Максимальная достигнутая мощность двигателя составила 60 кВт. Также наблюдалось 15 пиков мощности амплитудой 55 кВт. За полный цикл на движение было затрачено 67560 кДж, что соответствует средней мощности двигателя 11,1 кВт.

Для дизельного двигателя, которым оснащено данное ТС с механической ступенчатой трансмиссией, одна и та же мощность может быть достигнута на разных режимах работы. Эффективность одних режимов выше, других – ниже, а выбор объясняется только предпочтениями и темпераментом водителя. Это хорошо иллюстрирует рис. 3, где представлены все режимные точки, пройденные ДВС на маршруте.

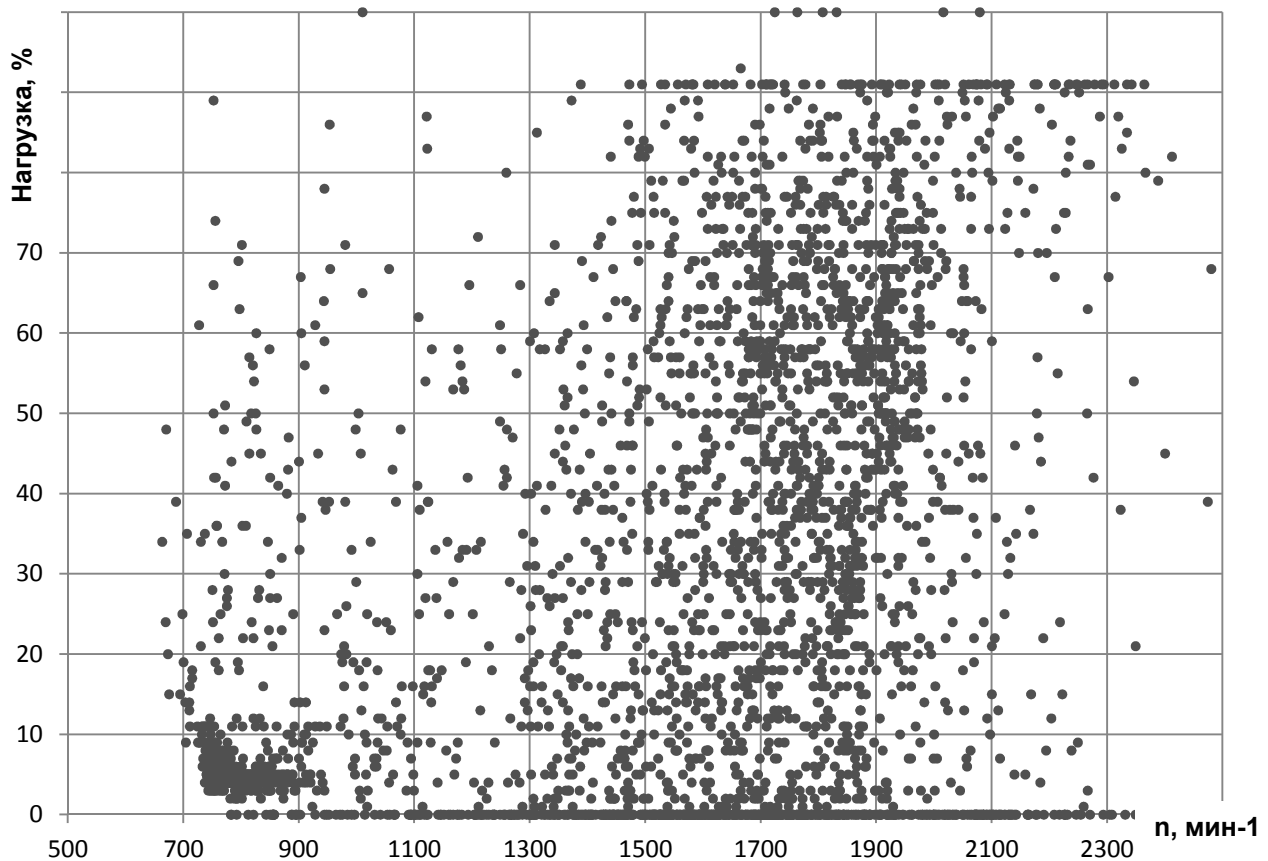


Рис. 3. Режимы работы двигателя ГАЗ А21R22 при движении по городу

Для исключения приверженности к определенным диапазонам, возможных различий в замерах от манеры управления транспортным средством, оценка энергетических затрат должна вестись по стандартным ездовым циклам. Каждый из них представляет собой известную зависимость скорости движения от времени. Наиболее распространенным является европейский ездовой цикл NEDC имитирующий движение как в городе (первая часть цикла)

так и за городом (вторая часть цикла). Однако созданный более полувека назад он стал совершенно не типичен для современных условий движения. В городской фазе цикла максимальная скорость составляет 50 км/ч, средняя скорость – около 18 км/ч, максимальное ускорение – около  $1 \text{ м/с}^2$ .

В качестве альтернативы Европейскому циклу экспертами стран ЕС, Японии и Индии разработана новая процедура испытаний WLTP (*Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures*) [2]. Основное назначение – оценка эксплуатационной топливной экономичности транспортного средства, в полной мере характеризуемой эмиссией  $\text{CO}_2$ . Процедура предполагает три возможных класса испытаний с соответствующими циклами испытаний WLTC, в зависимости от энерговооруженности автомобиля. В качестве критерия выбрано отношение номинальной мощности двигателя к снаряженной массе ТС – PWR.

Наибольшее число современных ТС с ДВС попадают в третий класс удельной мощностью  $\text{PWR} > 34 \text{ кВт/т}$ . Так, энерговооруженность автомобиля ГАЗ А21R22 с дизельным двигателем мощностью 96 кВт, рассмотренного в первом случае, составляла 48 кВт/т. В отличие от него, электроплатформы, особенно с учетом вспомогательной энергоустановки, имеют относительно большую снаряженную массу непропорционально мощности электропривода. Проведенный анализ 12 легких коммерческих грузовиков с электроприводом показал, что третья часть из них попадает только во второй класс с  $\text{PWR} < 34 \text{ кВт/т}$ . Более того, максимальная скорость у них не превышает 90 км/ч. Для таких ТС предусмотрен усеченный цикл WLTC класса 2 (рис. 4), который не содержит высокоскоростного участка ExtraHigh2.

Сравнивая реальный цикл движения в городе и цикл WLTC класса 2, можно отметить их значительное сходство. Это подтверждает правильность выбора процедуры WLTC для объективной оценки ТС в эксплуатации. Цикл WLTC менее динамичен, максимальное ускорение не превышает  $1 \text{ м/с}^2$ , при максимальной скорости 84 км/ч. Но пониженная динамика задана здесь, исходя из двукратной разницы в энерговооруженности ТС. В первом случае мы располагали  $\text{PWR} = 48 \text{ кВт/т}$ , во втором – только  $\text{PWR} = 22 \text{ кВт/т}$ .

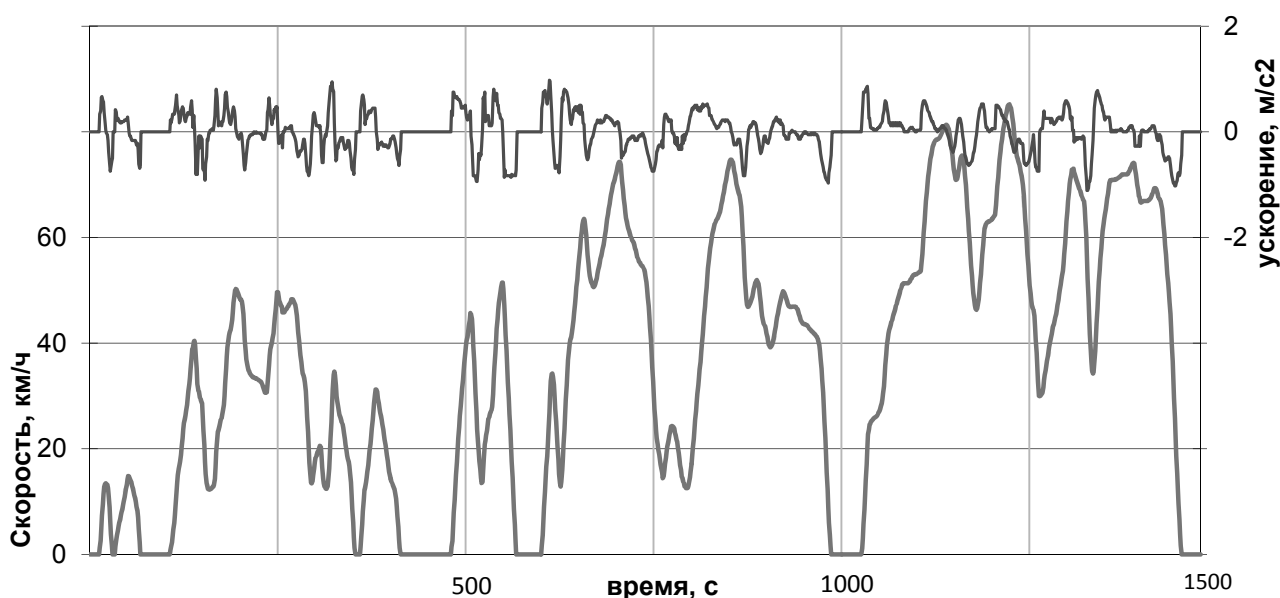


Рис. 4. Цикл испытаний WLTC класс 2 для ТС с максимальной скоростью менее 90 км/ч

Приведем расчетные характеристики цикла WLTC для полной массы автомобиля 3500 кг. Имитация динамометра выполнена по ГОСТ Р 41.83-2004. Общая длительность цикла 1477 с. За полный цикл на движение транспортного средства следует затратить 6864 кДж, что соответствует средней мощности двигателя 4,65 кВт.

Различие в средней мощности движения по циклам (4,65 кВт против 11,1 кВт), хорошо согласуется с различием в требуемой динамичности используемых циклов ( $1 \text{ м/с}^2$  против

3 м/с<sup>2</sup>) и позволяет сделать выбор мощности вспомогательной энергоустановки достаточной для обслуживания электроплатформы.

Так, для электроплатформы снаряженной массой около 2500 кг и мощностью электропривода 55 кВт (PWR=22 кВт/т) достаточной окажется мощность вспомогательной энергоустановки на уровне 5 кВт. Транспортное средство, вероятно, не сможет удержаться в современном городском транспортном потоке. Однако агрегат заряда такой мощности при непрерывном включении позволит полностью компенсировать затраты электроэнергии на движение. До исчерпания запаса топлива на борту электроплатформа сможет сохранять мобильность, не подключаясь к розетке. Однако ТС перестает быть электрическим в полном смысле. Но в тоже время емкость и масса тяговых батарей могут быть существенно снижены, освободив место для полезной нагрузки.

Электромобили сегодня ориентированы на запас хода на одной зарядке в 100...200 км. Подобный выбор основан на рациональном использовании рабочего времени ТС и его водителя, на статистическом анализе развозного парка легких коммерческих автомобилей. Энергоемкость лучших литий-ионных аккумуляторов сегодня около 250 Вт\*ч/кг, а энергопотребление электромобилей с полной массой около 3500 кг составляет примерно 300 Вт\*ч/км [3]. Следовательно, на борту должна находиться аккумуляторная станция массой около 200 кг.

Использование вспомогательной энергоустановки легко сохраняет заданный суточный пробег, позволяет исключить холостые пробеги до заправочной станции и обратно. Пробег на электротяге может быть сокращен до 50 км, что может оказаться достаточным для обслуживания «зеленых» зон в центрах мегаполисов. Соответственно снижается втрое масса аккумуляторов. Не следует забывать о совокупной стоимости установленных батарей и, соответственно, электроплатформы в целом. Цена на батареи для электромобилей за последние годы снизилась почти в пять раз, однако стоимость аккумуляторов продолжает оставаться одним из сдерживающих факторов распространения электротранспорта.

В случае несоответствия реальных условий движения расчетным (выезд на загородные трассы, агрессивное вождение, стремление двигаться вместе с потоком) принятая мощность вспомогательной энергоустановки уже не сможет полностью покрывать энергозатраты непосредственно за время движения. При средней мощности движения 11 кВт, как в первом примере, даже непрерывная работа вспомогательной энергоустановки покроет только половину затраченной электроэнергии. Полное исчерпание энергии батарей приведет к необходимости либо снизить затраты (максимальную скорость или динамику ТС) и сохранить при этом возможность движения, либо полностью остановиться для зарядки батарей. В любом случае следует помнить, что это все-таки электроплатформа и в подобной ситуации следует отправиться на ближайшую электрическую заправочную станцию.

Пока программы по субсидированию частных заправочных станций и развития государственной сети заправочных станций не реализованы, для электромобилей следует сохранить резервные пути развития. Они должны заключаться в поддержке чистых технологий электротранспорта технологиями зарядки батарей на борту транспортного средства с помощью проверенных технических средств. В качестве таких средств выступают вспомогательные системы генерации электроэнергии на базе тепловых двигателей или топливных элементов. Применение таких систем позволит снизить количество аккумуляторных батарей на борту электроплатформы или заменить их более дешевыми и доступными для российских условий, но меньшей емкости.

Относительно мощности вспомогательной энергоустановки, расчет движения по циклу WLTC показал, что средняя мощность, затрачиваемая на движение, не превышает 5 кВт для ТС второго класса энерговооруженности. Если данный уровень обеспечит полную независимость от зарядных станций, то для более нагруженных условий эксплуатации мощность вспомогательной энергоустановки на уровне 5 кВт будет, как это и задумано, покрывать энергозатраты на движение частично. Для уровня энерговооруженности ТС около 48 кВт/т

непрерывное включение вспомогательной энергоустановки может компенсировать половину затраченной на движение энергии либо всю энергию, но с перерывами в движении ТС на 50% времени.

### Библиографический список

1. CBCNews [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Электрон.дан. Режим доступа: <http://www.cbc.ca/news/canada/toronto/ontario-hopes-revised-condo-act-ev-friendly-1.4155747>, свободный.
2. Europeancommission [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Электрон.дан. Режим доступа: <https://circabc.europa.eu/sd/a/b40f73ed-314f-442f-b04a-48e8b4b6dae7/WLTP-2012-008%20Draft%20Annex%20Cycle%20as%20of%2018.05.2012.pdf>, свободный.
3. Battery University [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Электрон.дан. Режим доступа: <http://www.batteryuniversity.com>, свободный.

*Дата поступления  
в редакцию 26.03.2018*

**A.N. Tikhomirov, V.V. Scherbakov**

## **THE ISSUE OF SELECTING POWER OF AUXILIARY POWER SYSTEM OF TRANSPORT ELECTRIC PLATFORM**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

The article presents the results of an experimental and theoretical study of the energy consumption of a vehicle under different conditions. The purpose was to determine the power of the auxiliary range extender on board of the transport electric platform. Motion is considered both in the real road driving in a large city, and movement along an specific driving cycle. The high adequacy of the results obtained with the use of the new driving cycle WLTC. It is shown that for satisfactory compensation of electric power consumption of a vehicle moving in urban traffic with a curb weight 2500 kg, a 5 kW auxiliary power plant is sufficient.

*Key words:* electrical platform, battery, power, auxiliary power system.