

## ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ВНУТРИГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

**А.К. Шидловский**, акад. НАН Украины, **В.Б. Павлов**, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

*Рассмотрены вопросы расширения области применения электромобилей и снижения их стоимости за счет оптимизации бортового источника питания и ряда организационных мероприятий, способствующих увеличению эксплуатационного пробега электротранспортных средств внутригородского применения. Предложен метод увеличения эксплуатационного пробега гибридного транспортного средства в режиме нулевой эмиссии. Библ. 6, рис. 5, таблица.*

**Ключевые слова:** электромобиль, гибридное транспортное средство, нулевая эмиссия, полупроводниковые компоненты.

В настоящее время вопрос дальнейшего внедрения электромобильного транспорта считается решенным, а на повестке дня стоят проблемы снижения его себестоимости, развития инфраструктуры зарядных станций и утилизации аккумуляторных батарей (АБ).

Стоимость электромобиля (ЭМ) зависит от стоимости экипажной части, электродвигателя, силового и вспомогательного полупроводникового оборудования и в значительной степени от установленного бортового источника питания, в частности, аккумуляторной батареи. В то время как каждый из перечисленных компонентов соответствует 10...20 % общей стоимости, стоимость АБ в зависимости от установленной энергоемкости может достигать до 30...40 %. При этом необходимо учитывать «расходность» такого источника питания, т.е. срок службы АБ, который ограничен, и по мере ее деградации снижается эксплуатационная эффективность электромобиля, в то время как электродвигатель и полупроводниковые компоненты могут служить до полного износа экипажной части и более.

Далее рассмотрим вопросы расширения области применения электромобилей и снижения их стоимости за счет оптимизации бортового источника питания и ряда организационных мероприятий, способствующих увеличению эксплуатационного пробега электротранспортных средств внутригородского применения. Очевидно, что существенным решением проблемы снижения загрязнения воздуха в городах и сокращения потребления нефтепродуктов является внедрение «чисто» электрических транспортных средств, имеющих возможность передвигаться какое-то расстояние в режиме нулевой эмиссии *ZEV (Zero Emission Vehicle)*. Такие транспортные средства, если их диапазон *ZEV* примерно равен 30 км, по крайней мере, половину годового пробега могут осуществить в режиме «чистого» электромобиля [3]. На рис. 1 показана классификация транспортных средств (с различными значениями *ZEV*), имеющих возможность передвигаться на какое-то расстояние в режиме нулевой эмиссии.

Отметим, что электромобильные транспортные средства могут быть выполнены с различными значениями *ZEV*, начиная от 100 % и заканчивая единицами параметров от общего пробега машины, который ограничивается объемом топливного бака (гибридный вариант).

В жизнедеятельности городского хозяйства электромобили могут заменить автомобильный транспорт при мелкотоварных перевозках, в коммунальных ремонтных службах (газовые, водо- и энергоснабжение, телефонная связь, почтовые перевозки и т.п.), в санитарных и парковых зонах, в офисном обслуживании, экскурсионных перевозках, прокате электромобилей, передвижных торговых точках, такси, в частном транспорте.

Развитие общественного электротранспорта (трамваев, троллейбусов, электробусов и метрополитена) является одним из самых эффективных средств уменьшения загрязнения воздуха, выделения  $\text{CO}_2$  и снижения потребления органического топлива. Однако тенденция постоянного расширения городской черты и стремление населения жить за городом, в свою оче-

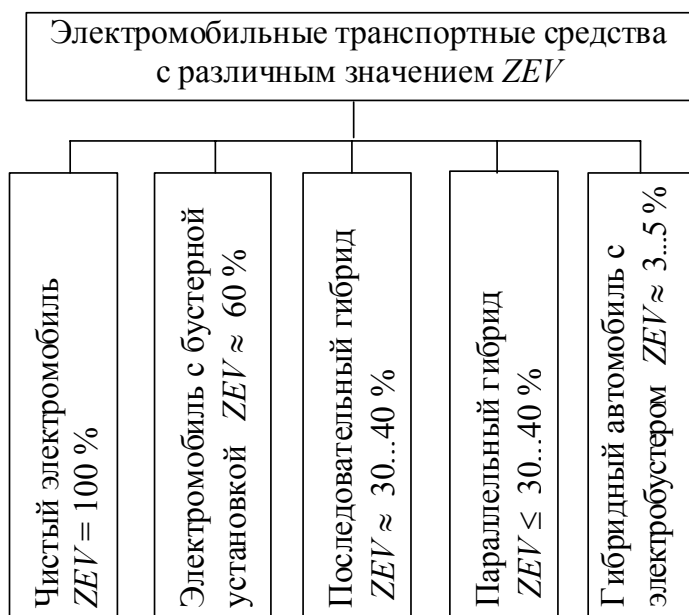


Рис. 1

*les Transports et leur Securite*, Франция), показали, что среднее расстояние, которое проезжает в будничные дни частное транспортное средство, составляет 18,7 км. Для более чем 95 % населения среднее расстояние, преодолеваемое за день, находится между 11,6 и 24,3 км. При этом в течение года длина таких поездок составляет примерно 30 % полного полезного расстояния, преодолеваемого автомобилем. Остальное расстояние – дальние деловые поездки, выезды выходного дня, каникулы и т.п.

Таким образом, как «чистое» так и гибридное транспортное средство (ТС) с автономией около 30 км может покрыть большинство городских поездок в режиме  $ZEV$ . Больше чем 50 % полного пробега гибридного ТС может быть покрыто при использовании для подзаряда АБ энергии, полученной из сети переменного тока.

Подобная ситуация вполне приемлема и к другим перечисленным выше электро-транспортным средствам внутригородских перевозок – относительно небольшие пробеги и соответственно более-менее длительные простои, что позволяет, с одной стороны, применять тяговую АБ относительно небольшой энергоёмкости (а значит, и массы) и стоимости, а с другой – осуществлять промежуточный подзаряд АБ при наличии соответствующей инфраструктуры. Электромобиль с автономией 200 км может удовлетворить потребности такси. Но автономия эта ограничит его использование главным образом городскими и пригородными районами.

Рассмотрим весовые и стоимостные показатели тяговых АБ (различных типов) в зависимости от длины автономного пробега электромобиля в режиме  $ZEV$ . На рис. 2 показаны графики удельного расхода энергии  $q_z$  в кВт-ч/км (прямая 1) и массы в кг/км для АБ свинцово-кислотных (Рв), никель-металл-гидридных (NMH) и литий-ионных (Li) соответственно в зависимости от полной массы электромобиля [4, 6]. Из графиков видно, что с увеличением массы электромобиля интенсивно возрастают удельный расход энергии и соответственно масса аккумуляторной батареи.

Проведем сравнительный анализ аналогичных показателей в зависимости от величины автономного пробега в режиме  $ZEV$ . На рис. 3 показаны графики изменения массы АБ для различных типов аккумуляторов из расчета  $ZEV=100$  км и электромобиля массой 2 т.

Сравнительный анализ приведен в таблице, где показаны весовые характеристики и примерная стоимость АБ (в %) из расчета пробега с нулевой эмиссией 100 км. Из приведенных графиков и таблицы видно, что, оптимизируя тяговую аккумуляторную батарею для наиболее применяемого среднего режима эксплуатации с  $ZEV=30$  км, можно снизить массу и

редь, ограничивают использование общественного транспорта или, по крайней мере, требуют комбинации общественного и индивидуального транспорта.

Эти факторы способствуют увеличению количества частных транспортных средств. При этом необходимо отметить, что частные автомобили потребляют до 60 % (например, во Франции) энергии, расходуемой всем транспортом, а количество частных автомобилей составляет 80 % внутригородского транспорта [5].

Существенным аспектом оценки эффективных решений в проблеме внедрения электромобилей является вопрос фактического использования транспортных средств во внутригородских перевозках. Исследования, выполняемые *INRETS (Institut National de Recherche sur*

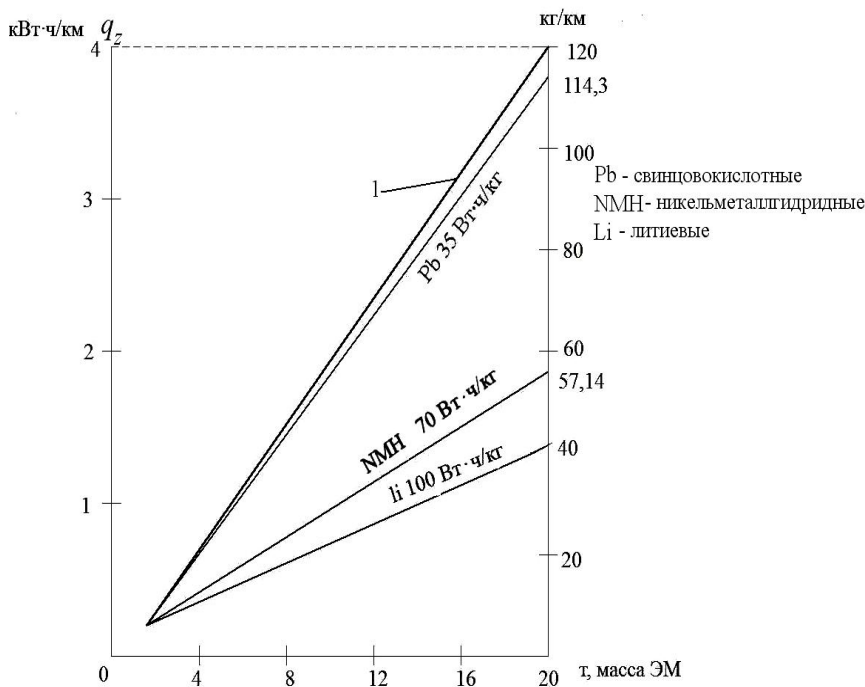


Рис. 2

но по сравнению со стоимостью АБ, т.е. отсутствует прямая зависимость между ростом их стоимости. В то же время небольшая масса АБ, что соответствует среднему значению  $ZEV=30$  км, обуславливает снижение требований к конструктивным характеристикам узлов и агрегатов трансмиссии и ходовой части по сравнению как с обычными автомобилями, так и с

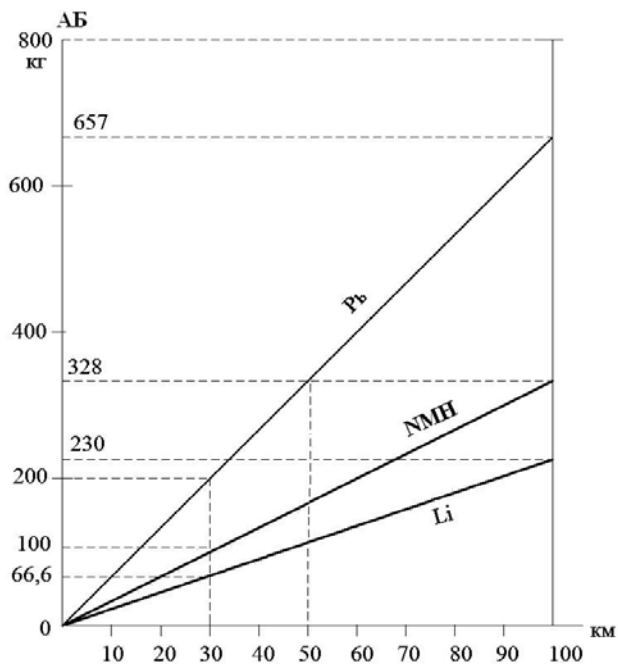


Рис. 3

стоимость тяговой АБ практически в три раза. Это позволяет повысить грузоподъемность ТС или увеличить автономный пробег за счет снижения массы электромотоцикла.

При этом необходимо отметить, что увеличение стоимости ЭМ (при увеличении массы АБ) происходит не только за счет роста цены на АБ, но и в результате установки более мощной тормозной и рулевой системы, усиления конструкции экипажной части, увеличения площади шин, увеличения мощности ходовой части и т.п. В результате этого цена ЭМ возрастает непропорционально

по сравнению со стоимостью АБ, т.е. отсутствует прямая зависимость между ростом их стоимости. В то же время небольшая масса АБ, что соответствует среднему значению  $ZEV=30$  км, обуславливает снижение требований к конструктивным характеристикам узлов и агрегатов трансмиссии и ходовой части по сравнению как с обычными автомобилями, так и с

ЭМ с большой АБ, что естественно снижает общую стоимость электромотоцикла.

Вторым серьезным аспектом внедрения ЭМ во внутригородской транспорт является возобновление энергии АБ, израсходованной в режиме  $ZEV$ , т.е. возможность увеличения пробега в режиме нулевой эмиссии.

Рассмотрим комплекс организационно-технических мероприятий, направленных на возобновление (или пополнение) энергии АБ во время эксплуатации. Анализируя проблему пробега ТС, следует различать межзарядный и эксплуатационный пробеги. Межзарядный пробег жестко связан с количеством энергии, запасенной в бортовом источнике питания ТС. Эксплуатационный пробег может быть увеличен по сравнению с межзарядным за счет организационно-технических мероприятий в зависимости от назначения ТС и режима его эксплуатации.

№ п/п	Тип АБ	Длина пробега в режиме $ZEV$ , км		
		100	50	30
1	<b>Pb</b> кг/стоимость, %	657/100	328/50,23	200/30,44
2	<b>NMH</b> кг/стоимость, %	328/100	166,7/50,82	100/30,48
3	<b>Li</b> кг/стоимость, %	230/100	116,1/50,48	66,6/28,95

Решить проблему увеличения межзарядного и эксплуатационного пробегов ТС можно несколькими путями: снижением потребления электроэнергии во время движения ТС за счет совершенствования компонентов электрооборудования и экипажной части; улучшением энергетических, и как следствие, массогабаритных показателей источников питания; промежуточным подзарядом аккумуляторной батареи; быстрым зарядом аккумуляторной батареи; быстрой заменой разряженной АБ на заряженную; применением комбинированных энергетических установок с дополнительными источниками энергии на основе органического топлива, солнечной энергии, топливных элементов и т.п.

Отметим также, что какой бы ни был межзарядный пробег ТС с установленной на нем АБ, всегда имеется возможность увеличить его эксплуатационный пробег, который зависит от назначения и режима движения машины. Так, возможность подзаряда АБ во время остановки ТС в течение одного часа позволяет повысить его пробег в 1,1...1,3 раза. Если таких простоев будет несколько за смену, то пробег может быть увеличен в 1,3...1,6 раза. Этот способ увеличения пробега применим для транспортных средств, совершающих мелкотоварные перевозки, а также для машин аварийных бригад энергетиков, электриков, сантехников и т.п.

Еще более радикально можно решить проблему эксплуатационного пробега ЭМ с помощью быстрого заряда АБ. При этом необходимо применять такие АБ, которые позволяют осуществить ускоренный заряд в течение 10...15 мин. В этом случае заряд АБ в ЭМ приравнивается к заправке топливом автомобиля и величина межзарядного пробега уходит на второй план. Однако для осуществления ускоренного заряда большого количества ТС требуется проведение организационно-технических мероприятий, включающих создание ряда зарядных станций с установкой специальных силовых полупроводниковых устройств и трансформаторных подстанций большой мощности, так как токи заряда при таком режиме превышают 1000 А. Такая эксплуатация автономных ТС не всегда возможна и целесообразна.

Одним из весьма существенных способов восстановления работоспособности ТС является метод замены разряженной АБ на полностью заряженную. Естественно, что такой метод предусматривает соответствующие конструктивные решения как самой экипажной части автомобиля, так и создание сервисных центров по обслуживанию, зарядке и мониторингу АБ.

Положительным моментом в этом случае являются возможность быстрого, в течение 3...5 мин (соизмеримо с заправкой топливом автомобиля), восстановления функции движения ТС в режиме *ZEV*, отсутствие необходимости операции зарядки АБ пользователем и обслуживание АБ высококвалифицированным персоналом.

При этом необходимо отметить возможность зарядки АБ в стационарных условиях, что позволяет использовать не только сеть переменного тока, но и альтернативные (возобновляемые) источники энергии (солнечную энергию и ветроагрегаты), что в последнее время все чаще применяется в энергетике.

Еще одним немаловажным фактором такого подхода является возможность снизить стоимость ТС, так как пользователь может приобрести ЭМ без аккумуляторной батареи, а оплачивать энергию и амортизацию АБ только во время ее эксплуатации, т.е. существенно снижается первичная стоимость автомобиля, что в ином случае достигается путем непростого компромисса между стоимостью и длиной межзарядного пробега машины.

Практически такого результата можно достичь путем применения прокатных электромобилей с небольшим (до 50 м) пробегом, соответственно небольшой АБ и умеренной стоимостью. Только в этом случае возможна не замена АБ, а смена электромобиля на сервисных пунктах, которые должны находиться в радиусе действия (пробега) прокатного ЭМ. Тогда пользователь пересаживается с одного “разряженного” ЭМ на другой “заряженный”, что также осуществляется за небольшой промежуток времени.

Еще одним способом повышения межзарядного пробега является применение бустерного устройства, которое состоит из двигателя внутреннего сгорания (ДВС), работающего на органическом топливе (бензин, дизельное топливо, биогаз и др.) и генератора. Это устройство небольшой мощности, энергии которого хватает только на штатный подзаряд АБ во время движения и стоянки ТС. При этом ДВС работает в оптимальном режиме. Постоянный подза-

ряд позволяет также улучшить режим работы АБ, т.е. поддерживать степень ее заряженности в пределах значений  $Q > 0,5$ , что улучшает разрядные характеристики АБ и позволяет увеличить пробег ТС в 1,8 раза [1, 2].

Мощность генератора и ДВС бустерного устройства определяется следующим образом. Считаем время работы ТС заданным при известной мощности тягового электродвигателя (ТЭД), тогда энергоемкость АБ определим выражением

$$G_{AB} = P_d \cdot t, \quad (1)$$

где  $P_d$  – мощность ТЭД;  $t$  – время работы ТС.

С учетом того, что бустерная установка функционирует на протяжении всего времени  $t$ , ее потенциальная энергия определяется формулой

$$G_B = P_G \cdot t, \quad (2)$$

где  $P_G$  – мощность генератора бустера.

Из соотношений (1) и (2) находим

$$t = \frac{G_{AB}}{P_d} = \frac{G_B}{P_G}. \quad (3)$$

Тогда из выражения (3) находим мощность генератора:  $P_G = P_d \frac{G_B}{G_{AB}} = P_d \cdot k_G$ ,

где  $k_G$  – коэффициент энергоемкости,  $k_G = \frac{G_B}{G_{AB}}$ .

Мощность ДВС определяется по формуле  $P_{ДВС} = \frac{P_G}{\eta_G}$ .

Практически  $k_G$  может изменяться от 0 до 1, т.е. в первом случае отсутствует бустерная установка, а во втором ее энергия обеспечивает функционирование ТС без аккумуляторной батареи, т.е. получается транспортное средство с электротрансмиссией.

Такое распределение энергоемкости наглядно видно на графике, представленном на

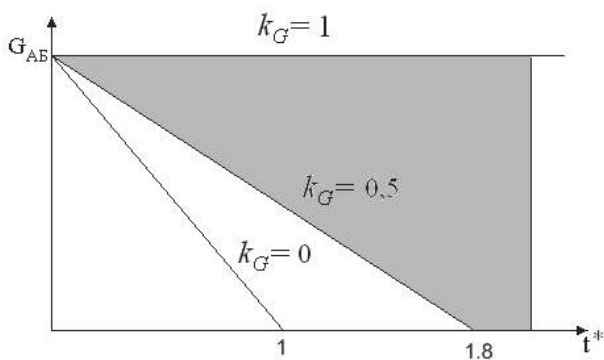


Рис. 4

рис. 4, где  $t^* = t/t_B$ ;  $t$  – текущее время;  $t_B$  – время работы ТС совместно с АБ и бустером. На рисунке показана зависимость времени работы ТС от коэффициента энергоемкости

Учитывая требования, предъявляемые к бустерным устройствам (небольшая мощность ДВС и генератора), целесообразно остановиться на  $k_G=0,5$ , т.е. увеличение пробега возможно почти в два раза, при  $k_G=1$  бустерное устройство переходит в разряд последовательного гибрида.

Рассматриваемый метод увеличения эксплуатационного пробега ТС можно условно считать в режиме ZEV в случае, если топливом для ДВС будут служить биогаз, водород и др., т.е. выбросы вредных веществ в этом случае минимальны. Рассмотрим вопрос определения энергоемкости АБ и мощности генератора последовательного гибрида в зависимости от величины ZEV. Энергоемкость АБ определяется по формуле  $G_Z = q_Z s_Z$ , где  $q_Z$  – удельные затраты энергии ЭМ на 1 км пути, кВт-ч/км;  $s_Z$  – длина пробега ЭМ без эмиссии, км.

Время безэмиссионного пробега составляет  $t_Z = \frac{s_Z}{v_Z}$ , где  $v_Z$  – скорость движения ЭМ в режиме ZEV.

В то же время энергоемкость  $G_Z$  можно определить следующим образом:  $G_Z = P_{\text{нд}} t_Z$ , где  $P_{\text{нд}}$  – мощность тягового электродвигателя ЭМ в номинальном режиме (определяется по известным методикам [2]).

Отсюда  $G_Z = P_{\text{нд}} t_Z = q_Z s_Z$ . Тогда с учетом выражения (1) скорость ТС определяется по формуле  $v_Z = \frac{P_{\text{нд}}}{q_Z}$ .

Коэффициент  $K_Z$ , определяющий соотношение времени движения, т.е. в режиме *ZEV* ( $t_Z$ ) по сравнению с временем восстановления энергии АБ ( $t_6$ ) при движении ТС в гибридном (бустерном) режиме, определяется по формуле  $K_Z = \frac{t_Z}{t_6}$ .

Мощность генератора определяется двумя слагаемыми:

- первое слагаемое соответствует мощности, необходимой для питания тягового электродвигателя ( $P_{\text{нд}}$ );

- второе слагаемое определяет энергию, дополнительную составляющую мощности, расходуемую на восстановление энергоемкости АБ, израсходованной при движении ТС в режиме *ZEV*.

Таким образом, формула мощности генератора будет иметь вид

$$P_{\text{нг}} = P_{\text{нд}} + P_{\text{нд}} K_Z = P_{\text{нд}} (1 + K_Z)$$

Тогда, при  $K_Z = 1$ , т.е.  $t_Z = t_6$  мощность генератора будет равна  $P_{\text{нг}} = 2P_{\text{нд}}$ .

На рис. 5 представлен график изменения мощности генератора гибрида (бустера) в зависимости от коэффициента  $K_Z$ . Здесь  $P_{\text{д}}^* = \frac{P_{\text{д}}}{P_{\text{нд}}}$ ;  $P_{\text{г}}^* = \frac{P_{\text{г}}}{P_{\text{нг}}}$ .

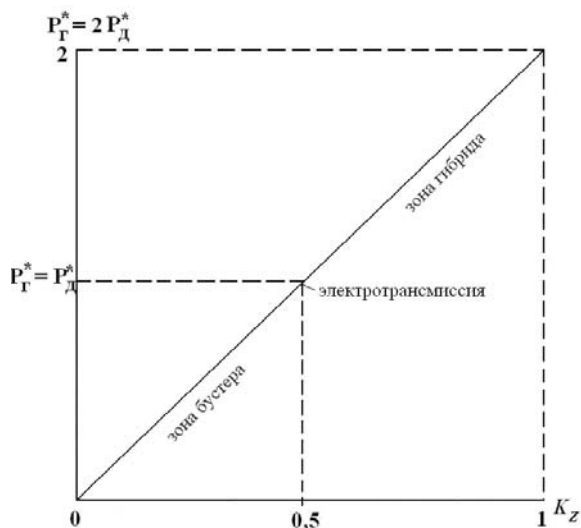


Рис. 5

Из рис. 5 видно, что при  $P_{\text{г}}^* < P_{\text{д}}^*$  транспортное средство работает в режиме бустера, при  $P_{\text{г}}^* = P_{\text{д}}^*$  – в режиме электротрансмиссии, а при  $P_{\text{г}}^* > P_{\text{д}}^*$  – транспортное средство переходит в режим гибрида.

Однако на практике, учитывая возможность движения ЭМ не всегда с номинальной нагрузкой тягового электродвигателя (режимы наката, движения под уклон) и наличия режима рекуперации, позволяющего частично восстанавливать энергию АБ, мощность генератора чаще всего не превышает 1,2...1,5 мощности электродвигателя и  $K_Z$  находится в пределах  $0 \leq K_Z \leq 0,5$ .

Исходя из изложенного, можно сделать следующие выводы:

1. Технический уровень современных электрических транспортных средств и сервисного оборудования позволяет практически полностью исключить автомобильный транспорт во внутригородских перевозках как частного, так и коммунального применения, что дает возможность значительно улучшить экологию города.
2. Во внутригородских перевозках электрические транспортные средства в зависимости от назначения и режима эксплуатации могут иметь различные по времени и пробегу интервалы безэмиссионного движения (*ZEV*).
3. Применение АБ с энергоемкостью, соответствующей режиму *ZEV* (т.е. энергоемкость «разумной достаточности»), позволяет значительно снизить стоимость транспортного средства.

4. Ряд организационно-технических мероприятий дает возможность увеличить эксплуатационный пробег электромобильных транспортных средств, что позволяет повысить эффективность применения такого транспорта во внутригородских перевозках.

1. Павлов В.Б., Попов А.В. Электротранспорт с автономными источниками питания (актуальность, состояние, перспектива) // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2007. – № 1 (16). – С. 57–65.
2. Павлов В.Б., Попов А.В., Павленко В.Є., Тугаєнко Ю.П., Третьяк М.В. Міський електромобіль в Україні //Техн. електродинаміка. – Темат. вип. – 2011. – С. 127–131.
3. Коммерческие автомобили. – 2011. – № 5. – С. 38 – [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.autocentre.ua/news/Komavto/39421.html>. – Загл. с экрана.
4. Bolger John G. The significance of inductive roadway power systems to dual mode transit “Hybrid Dual Mode and Track. Syst. Elec Veh Dev Group 4th Int Conf., London, Sept., 1981”. Stevenage. 1981, ISBN 0906048656, 167-171 (англ.).
5. Ronald Doctors. A systems approach to battery powered vehicles. – GMI Ins, Santa Barbara, CA 93105. – Режим доступа: <http://www.west.net/~rondoc/evs.html>. – Загл. с экрана.
6. Stavarache Paul. Experimentari privind introducerea electronicii in actionarea vehiculelor electrice de transport uzinal, Mincinopschi Gheorghe. ”Electrotehn., electron. Si autom. Electro tehn.”, 1986, 34, № 8, 317–320. (рус., рез. рус., нем., англ., фр.).

УДК 621.314

**А.К. Шидловський**, акад. НАН України, **В.Б. Павлов**, докт. техн. наук.  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

#### **Особенности створення та експлуатації внутрішньоміського електромобільного транспорту**

*Розглянуто питання розширення сфери застосування електромобілей та зниження їх вартості за рахунок оптимізації бортового джерела живлення і низки організаційних заходів, що сприяють збільшенню експлуатаційного пробігу електротранспортних засобів внутрішньоміського застосування. Запропоновано метод збільшення експлуатаційного пробігу гібридного транспортного засобу в режимі нульової емісії. Бібл. 6, рис. 5, таблиця.*

**Ключові слова:** електромобіль, гібридний транспортний засіб, нульова емісія, напівпровідникові компоненти.

**A.K. Shydlovskiy, V.B. Pavlov**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

#### **Features of creation and operation of intracity electromobile transport**

*Questions of expansion of application area of electromobility and decrease in their cost due to optimisation of the on-board power source and of some the organizational measures promoting increase of operational running of electromobility of intracity application are considered. The method of increase in operational running of a transport hybrid electromobile in a mode of zero emission is offered. References 6, figures 5, table.*

**Key words:** electromobile, hybrid vehicle, zero emission, semi-conductor components.

Надійшла 16.04.2014

Received 16.04.2014