



Конденсаторные модули ЭЛТОН в составе электропривода городского автобуса с гибридной силовой установкой

А.И. Варакин, И.Н. Варакин, К.Ю. Томащук
ЗАО «ЭЛТОН», Москва, Россия

E-mail: A.Varakin@esma-cap.com

Компания ЭЛТОН

- В настоящем докладе обсуждается опыт эксплуатации накопителя энергии на основе модулей электрохимических конденсаторов разработанных российской компанией «ЭЛТОН» в составе электропривода городского автобуса с гибридной силовой установкой.
- ЗАО «ЭЛТОН» представляет собой научно-исследовательский комплекс с опытным производством, расположен в городе Троицк Московской области и насчитывает около 70 сотрудников
- Электрохимические конденсаторы ЭЛТОН (ЭКЭ) с более известным на рынке брендом «ЭСМА» представляют собой так называемые «асимметричные» конденсаторы.
- ЭКЭ прошли большой объем испытаний в США и России. Более 12 лет применяются на грузовом и пассажирском транспорте для запуска двигателей, а также на опытных образцах электротранспорта и транспорта с гибридными силовыми установками.
- В 2010 году компания SAFT по лицензии открыла серийное производство конденсаторов ЭЛТОН в филиале в США (г. Вальдоста, Джорджия).
- В России освоен **мелкосерийный** выпуск ЭКЭ на специализированном предприятии (**около 10 тыс. конденсаторов/год**).
- В настоящее время ЭЛТОН активно занимается существенным удешевлением продукта, внедряя новую технологию производства электродных материалов.

Особенности электрохимических конденсаторов ЭЛТОН (ЭКЭ)



- В ЭКЭ поляризуемый электрод выполнен из активированного углеродного материала, а другой, являющийся неполяризуемым (фарадеевским) содержит в качестве активного материала гидроксид никеля, электролитом служит водный раствор щелочи.
- ЭКЭ наряду с электростатической энергией используют энергию электрохимических процессов.
- Такая конструкция позволила получить удельные характеристики ЭКЭ сопоставимые с характеристиками конденсаторов, в которых применяется органический электролит. Однако ЭКЭ обладают рядом важных преимуществ:
 - в отличие от конденсаторов с органическим электролитом величина внутреннего сопротивления ЭКЭ в процессе эксплуатации остается практически постоянной;
 - при эксплуатации системы ЭКЭ не требуют внешних устройств выравнивания конденсаторов по напряжению (во время работы происходит самобалансировка элементов по напряжению в составе модулей);
 - водный электролит обеспечивает более высокую безопасность в эксплуатации и устойчивость к значительным перегрузкам по напряжению и перезаряду.
- Эти преимущества дают возможность применить накопитель на основе ЭКЭ в гибридной силовой установке городского автобуса, При этом можно реализовать наиболее предпочтительную для городского транспорта схему: «последовательный гибрид».

Определение технических требований к компонентам гибридной силовой установки городского автобуса

- Обоснование применения ЭКЭ в составе большого городского автобуса (12 м, 18 т) с гибридным приводом потребовало определение технических требований к основным компонентам гибридной силовой установки:
 - накопителю энергии
 - ДВС
 - электродвигателю
 - Принципиальным является выбор компромиссного варианта между размером накопителя и мощностью ДВС. Применение мощного ДВС не позволит получить наилучшие показатели по экономичности и экологической составляющей, слишком малая мощность ДВС ограничит возможности транспорта
 - Для рабочего цикла движения для городского транспорта разгон/выбег/торможение/стоянка, при условии движения транспортного средства по замкнутому маршруту энергия, необходимая для разгона транспортного средства включает только кинетическую энергию разгона с учетом потерь:
 - $E_1 = m \cdot V_1^2 / (2K_{\text{и}})$ (1)
 - Доступная для рекуперации энергия составит:
 - $E_2 = K_{\text{и}} \cdot m \cdot V_1^2 / 2$ (2)
- m – масса транспорта,
 $K_{\text{и}}$ – суммарный коэффициент, учитывающий все потери при движении транспорта
 V_1 – скорость транспорта после разгона и V_2 – скорость транспорта после выбега.

Расчет эффективности рекуперации



- Эффективность рекуперации можно представить как отношение энергии рекуперации к энергии, необходимой на разгон транспортного средства:

$$EF = E_2 / E_1 \quad (3)$$

- Для рабочего цикла движения городского транспорта, эффективность рекуперации при наличии накопителя можно представить в виде формулы:

$$EF = \varphi \cdot \eta \cdot K_{и}^2 \cdot V_2^2 / V_1^2 \quad (4)$$

η – КПД работы накопителя в цикле заряд-разряд,

φ – КПД работы DC/DC преобразователя.

- Учитывая, что в рассматриваемом цикле движения энергопотребление необходимо только на разгон транспортного средства, получаем:

$$E_{уд} \cdot m \cdot S = m \cdot V_1^2 / (2K_{и}), \text{ откуда } K_{и} = V_1^2 / (2E_{уд} \cdot S) \quad (5)$$

$E_{уд}$ – удельное энергопотребление транспорта,

S – длина маршрута в цикле.

- Опыт эксплуатации российских троллейбусов по городскому маршруту ($S \sim 350$ м, $V_1 \sim 45$ км/ч, время разгона 20-25 с, время цикла ~ 60 с) дает величину $E_{уд} = 85-100$ Втч/(т•км).
- Подставляя соответствующие величины в выражение (5) получим: $K_{и} = 0,65$.
- Как правило, для троллейбусов $V_2 / V_1 = 0,85$
- Принимая $\varphi = 0,95$ и $\eta = 0,8$, эффективность рекуперации, равна:

$$EF = \varphi \cdot \eta \cdot K_{и}^2 \cdot V_2^2 / V_1^2 = 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,65^2 \cdot 0,85^2 = 0,23$$

Определение параметров накопителя энергии



- Расчетная энергия, необходимая для разгона автобуса с массой 18 т до скорости 55 км/ч, составит $m \cdot V_1^2 / (2K_{\text{и}}) = 18000 \cdot 15,3^2 / (2 \cdot 0,65) = 3,24$ МДж.
- При эффективности рекуперации $EF = 0,23$ энергия, которая может быть сэкономлена в каждом рабочем цикле составит **0,75 МДж**.
- Необходимая энергия для осуществления цикла с учетом рекуперации составит:
 $3,24 \text{ МДж} - 0,75 \text{ МДж} = 2,5 \text{ МДж}$.
- Эту энергию ДВС должен поставлять на тягу за один цикл длительностью 60 с, значит **средняя мощность ДВС в цикле** должна быть равной $2,5 \text{ МДж} / 60 \text{ с} = 42 \text{ кВт}$.
- **Средняя мощность электродвигателя на разгоне** для обеспечения времени разгона 25 с должна составлять не менее $3,24 \text{ МДж} / 25 \text{ с} = 130 \text{ кВт}$.
- При мощности ДВС, затрачиваемой на тягу, 42 кВт получаем **среднюю мощность накопителя** для обеспечения разгона автобуса: $130 \text{ кВт} - 42 \text{ кВт} = 88 \text{ кВт}$.
- Для того чтобы конденсатор мог поддерживать разгон автобуса в течение всего необходимого времени, отдаваемая **энергия накопителя** при разряде должна составлять не менее $25 \text{ с} \cdot 88 \text{ кВт} = 2,2 \text{ МДж}$.
- При торможении накопитель может получить лишь 0,75 МДж. Необходимую энергию
- 2,2 МДж конденсатор может накапливать также в момент выбега и стоянки автобуса от ДВС.

Определение оптимальной мощности ДВС

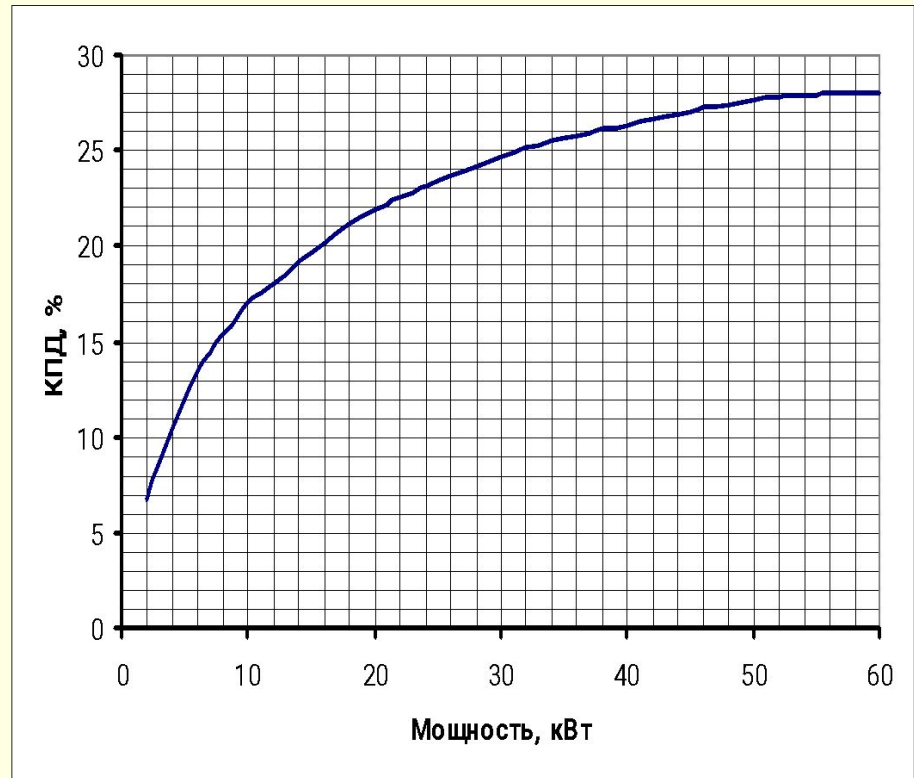
Как отмечено выше средняя мощность ДВС в цикле составляет 42 кВт.

С учетом постоянного расхода энергии на собственные нужды **достаточная мощность ДВС** составит **50-55 кВт**.

Оптимальная работа ДВС с минимальным расходом топлива может быть достигнута при работе в диапазоне 75-90 % максимальной мощности.

Мощность ДВС автобуса, работающего в оптимальном режиме должна лежать в пределах **55-70 кВт**.

Таким образом, установленная мощность ДВС может быть снижена по сравнению с традиционным автобусом в 2-3 раза.



Зависимость КПД микротурбогенератора Capstone от вырабатываемой мощности

Технические требования для компонентов гибридной силовой установки в составе городского автобуса (12 м, 18 т)

| | |
|---|-------------------------|
| Установленная мощность ДВС, кВт | 55-70 |
| Номинальная мощность электродвигателя, кВт | 120-140 |
| Максимальная мощность электродвигателя, кВт | 180-220 |
| Номинальная мощность накопителя, кВт | 90 |
| Энергия накопителя при номинальной мощности, МДж | Более 2,2 |
| Ресурс, цикл. | Более 1 000 000* |
| КПД (E_d/E_c) в цикле заряд/разряд (η), не менее | 0,8 |
| Срок службы, лет | 10** |
| Тип привода | Последовательный гибрид |

* за сутки городской автобус совершает не менее 400 рабочих циклов, поэтому за 10 лет ресурс накопителя должен быть не менее 1 млн. циклов

** нормативный срок службы автобусов – примерно 10 лет

Автобус с гибридным приводом Тролза-5250

- В крупнейшей российской компании по производству троллейбусов ТРОЛЗА (г. Энгельс, Саратовской области) разработана опытная модель автобуса с гибридным приводом на основе модернизации троллейбуса модели Тролза-5265 с низким полом
- Гибридная силовая установка автобуса состоит из
 - микротурбогенератора с управляемым выпрямителем и DC/DC конвертором,
 - накопителя энергии на основе ЭКЭ,
 - инвертора, предназначенного для управления тяговым асинхронным электродвигателем.
- Все используемые агрегаты тягового привода оснащены принудительным воздушным охлаждением, что обусловлено опытом эксплуатации городского транспорта в жестких климатических условиях России при температурах от -40 до +50 °С, которые предъявляют более высокие требования к надежности и безопасности транспортного средства.
- Для экономии энергии и топлива на автобусе впервые реализована система отопления, использующая тепло выхлопных газов производимых микротурбиной, что очень актуально для России, где мощная система отопления необходима не менее 6-7 месяцев в году. Утилизация тепла выхлопных газов осуществляется помощью газожидкостного теплообменника номинальной мощностью 35 кВт, теплоноситель которого поступает в салон автобуса по трубам к отопительным агрегатам, расположенным в салоне и кабине водителя.

Энергоустановка с накопителем размещены в задней части автобуса

Газо-жидкостной теплообменник

Микротурбогенератор

Насос жидкостной системы отопления

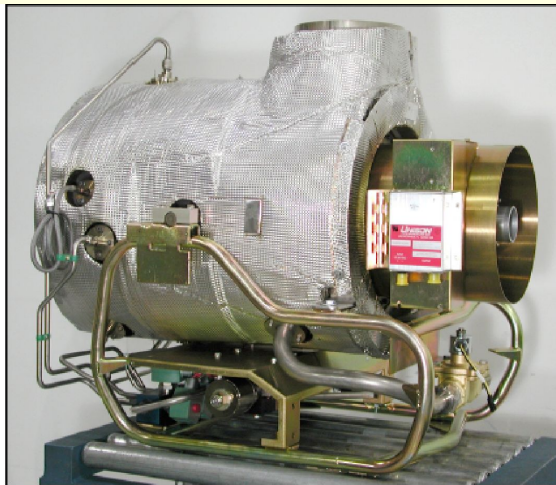


Накопитель энергии с воздушной системой охлаждения

Воздушный компрессор

Микротурбогенератор Capstone

- Микротурбогенератор Capstone мощностью 65 кВт обеспечивает энергией тягу и собственные нужды автобуса (воздушный компрессор, кондиционер салона и кабины, вентиляторы системы охлаждения, электропривод усилителя руля и т.д.).
- Применение микротурбогенератора позволяет использовать дизельное топливо, пропан, биотопливо, авиационный керосин.
- Микротурбогенератор обеспечивает соответствие перспективному европейскому стандарту Euro-6 без применения катализаторов и фильтров.
- На автобусах, запущенных в эксплуатацию, установлена система обеспечивающее питание на самом дешевом в России топливе сжатым метане (CNG).
- Газовые баллоны расположены на крыше автобуса.



Накопитель на основе ЭКЭ для гибридного привода городского автобуса Тролза-5250

| | |
|---|-------------------|
| Модель накопителя | 14×30ЭК404 |
| Напряжение, В | 630 |
| Емкость, Ф | 28,6 |
| Энергия в окне U-U/2, МДж | 4,2 |
| Объем, л | 420 |
| Масса, кг | 520 |
| Номинальная мощность, кВт | 90 |
| КПД (Ed/Es) в цикле заряд/разряд (η) | > 0,8 |
| Конденсаторный модуль | 30ЭК404 |
| Напряжение, В | 45 |
| Емкость, Ф | 400 |
| Внутреннее сопротивление, мОм | 12 |
| Масса, кг | 37 |
| Габаритный размер, мм | 560x219x245 |
| Рабочая температура, °С | -50/+60 |

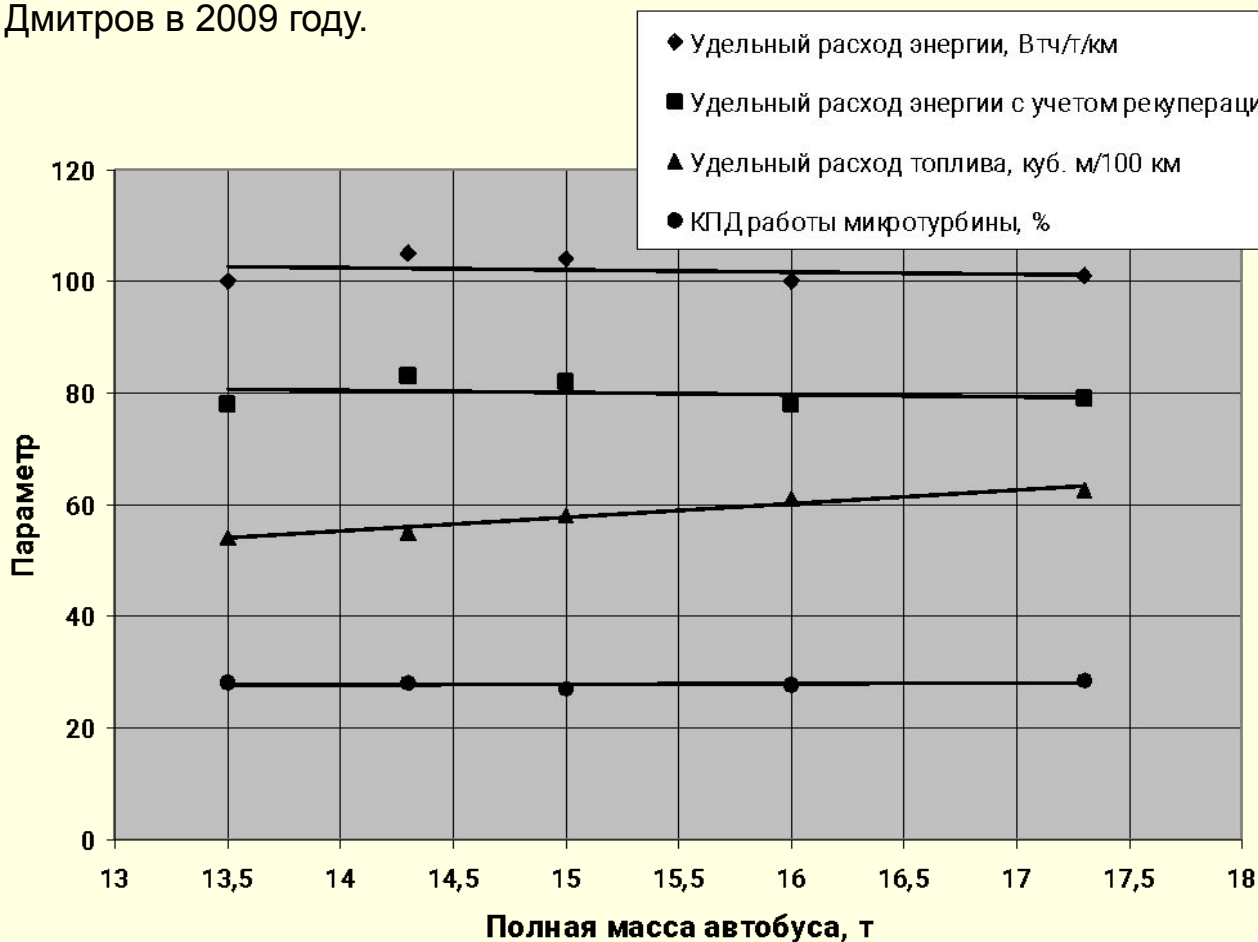


Воздушное централизованное охлаждение



Результаты тягово-энергетических испытаний автобуса Тролза-5250

- Автобус с гибридным приводом новой модели Trolza-5250 прошел тягово-энергетические испытания и сертификационные испытания на полигоне НИИЦИАМТ г. Дмитров в 2009 году.

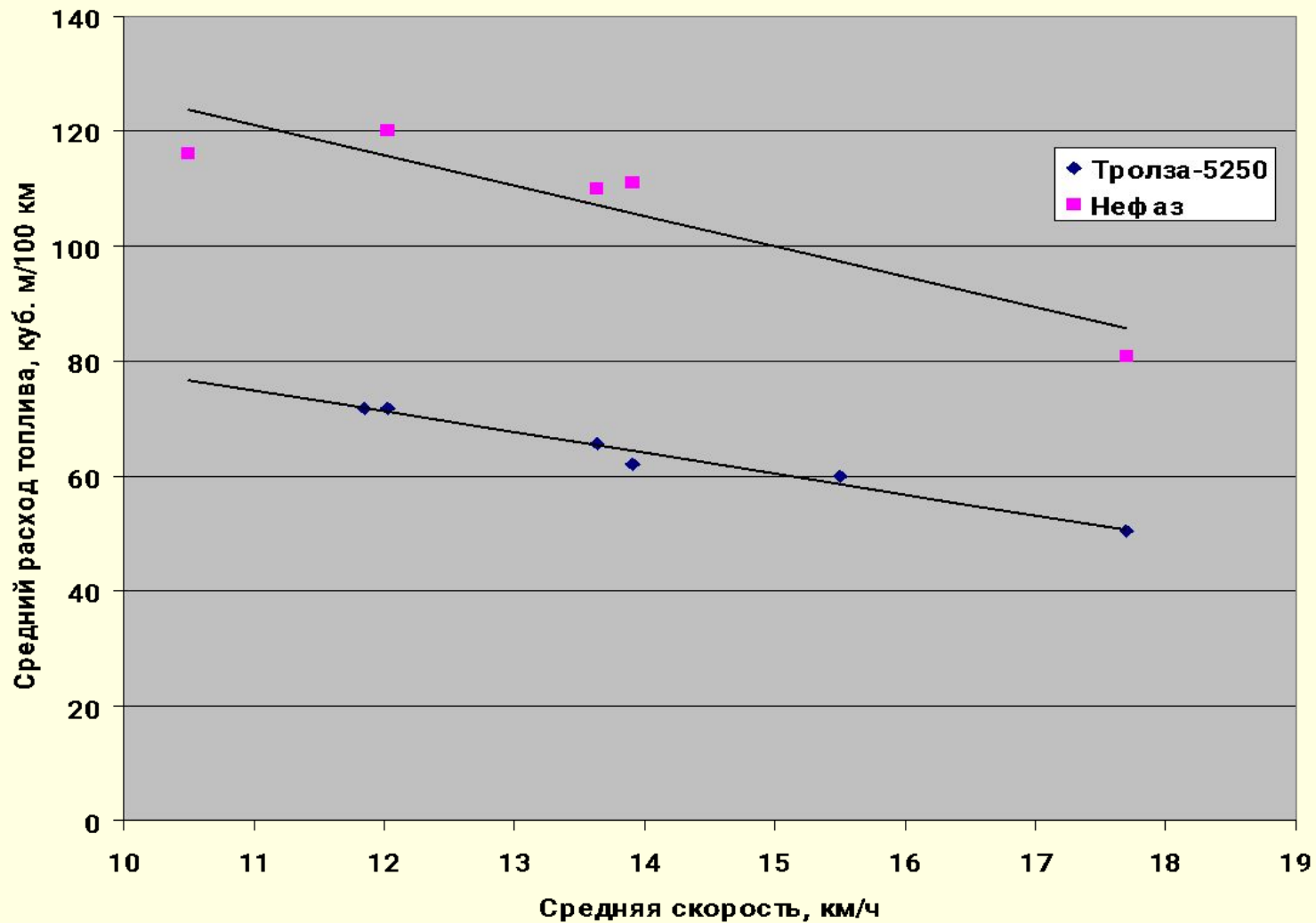


Эксплуатация автобусов Тролза-5250

- На данный момент четыре автобуса курсируют в центре города Краснодар, один автобус – в г. Москве.
- В Краснодаре автобусы проходят в сутки в среднем 150-160 км, среднее расстояние между остановками около 350 м. Средняя скорость движения по маршруту 13-16 км/ч, максимальная – 50 км/ч. На данный момент средний пробег автобусов превысил 35 тыс. км.



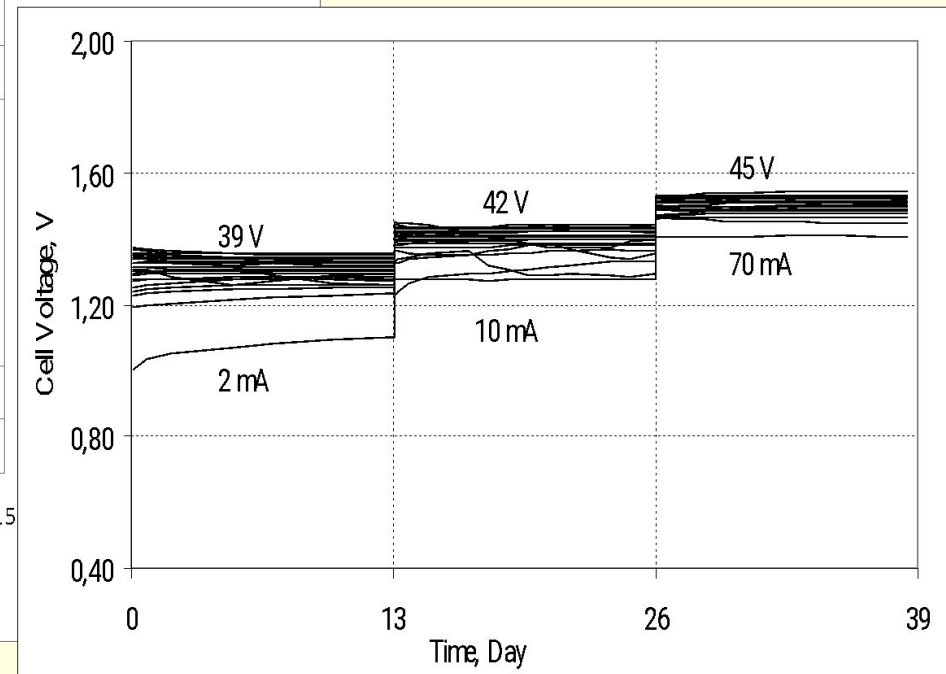
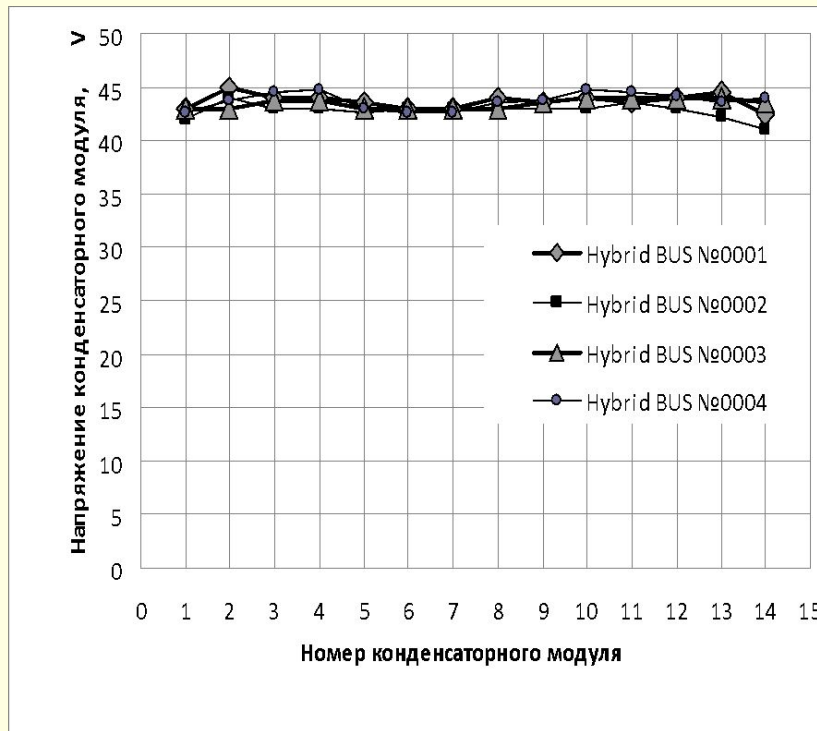
Зависимость расхода топлива от средней скорости при эксплуатации гибридного и обычного газовых автобусов на одном и том же маршруте в г. Краснодаре



Характеристики автобуса с гибридным приводом Тролза-5250

| | |
|---|--------|
| Длина, м | 12 |
| Полная масса, т | 18 |
| Пассажировместимость, чел. | 100 |
| Номинальная мощность тягового электродвигателя, кВт | 125 |
| Максимальная мощность тягового электродвигателя, кВт | 200 |
| Номинальная мощность турбины, кВт | 65 |
| Энергия КН в окне напряжений $U-U/2$, МДж | 4,2 |
| Габаритный объем, л | 420 |
| Масса, кг | 520 |
| Максимальная скорость, км/ч | 70 |
| Время разгона до скорости 50 км/ч, с | 25 |
| Средняя эффективность рекуперации | 0,23 |
| Средний удельный расход энергии, Втч/(т*км) | 80-84 |
| Расход топлива на маршруте в г. Краснодаре, м ³ /100 км | 50-70 |
| Максимальный пробег за счет энергии накопителя (неработающий ДВС), км | До 1,5 |

Разброс напряжений модулей 30ЭК404 в автобусах после ~ 35 тыс. км пробега, 8 месяцев эксплуатации (~90-100 тыс. цикл.)



Механизм выравнивания напряжения конденсаторных элементов в составе модуля

Другие реализованные проекты применения ЭКЭ на транспорте в составе привода с гибридной силовой установкой

Гибридный грузовик-фургон
Ohio, USA, 2003



Гибридный автобус Goshen Coach
EuroShuttle - *HBD*[™] Ohio, USA, 2004



Опытный автобус «Олимп» 5298-01-62 с
гибридным приводом («Транс-Альфа» г. Вологда,
Россия, 2007)

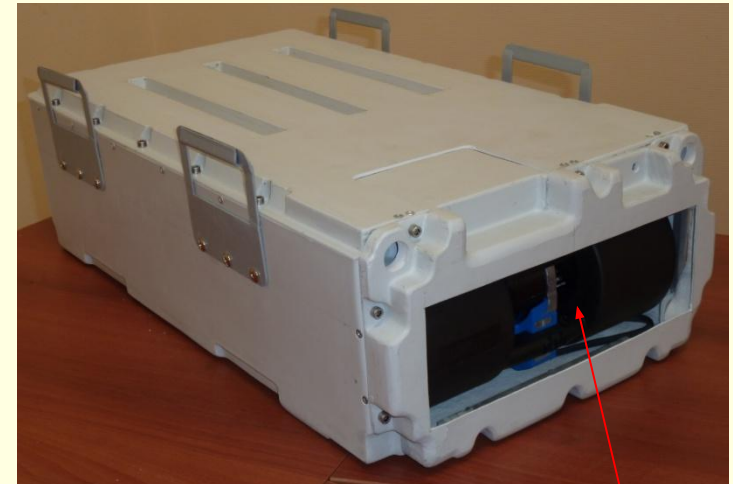


Гибридный автобус-троллейбус, 2007, г Майкоп,
Разработка МЭИ (г. Москва)



Конденсаторный модуль 60ЭК405

| | |
|-------------------------|---------------------------------------|
| Рабочее напряжение, В | 90 |
| Емкость, Ф | 200 |
| R_{in} , МОм | 30 |
| Масса, кг | 75 |
| Габаритный размер, мм | 774×423×223 |
| Материал корпуса | Пластмасса |
| Рабочая температура, °С | -50/+60 |
| Охлаждение | Воздушное автономное, вентилятор 24 В |



Накопленный опыт эксплуатации конденсаторных модулей на различных транспортных средствах с гибридным приводом позволил ЭЛТОН провести разработку новой модели конденсаторного модуля типа 60ЭК400 с напряжением 90 В, предназначенного для работы в составе приводов гибридных и электрических транспортных средств, который отвечает всем нормам безопасности, оснащенных автономной системой охлаждения и диагностики.

Выводы

- Результаты эксплуатации подтвердили расчетные параметры автобуса.
- **Средняя эффективность рекуперации** – более **20 %** от энергии, затрачиваемой на разгон.
- **Средний удельный расход энергии** автобуса в городском режиме ~ **80 Втч/(т*км)**.
- **Расход топлива** гибридного автобуса (с накопителем **4,2 МДж** и микротурбиной **65 кВт**) составил **50-70 м³/100 км** и сократился в среднем **на 38-40 %** по сравнению с расходом топлива стандартного газового автобуса с двигателем мощностью 180 кВт и эксплуатирующегося на том же маршруте в г. Краснодаре.
- Экономия топлива обеспечивается не только снижением энергопотребления за счет рекуперации (~20 %), но и за счет работы микротурбины в оптимальном режиме (работа с максимальным КПД и обеспечение работы двигателя с мягкими переходами без реверсивных режимов).
- **Пробег автобуса за счет энергии накопителя** (неработающий ДВС) ~ **1,5 км**.
- Предпочтительным вариантом разработки нового автобуса с гибридным приводом выглядит модернизация троллейбуса, которая требует минимального переоборудования (установка накопителя и микротурбогенератора), тяговые электродвигатели другое оборудование остается прежним.
- Важным обстоятельством является то, что адаптация обслуживающего персонала к новому виду техники в троллейбусных парках, имеющего опыт работы с оборудованием высокого напряжения, пройдет значительно проще, нежели в автобусных парках.
- Эксплуатация накопителя на базе ЭКЭ в составе гибридной силовой установки подтвердила отсутствие разбаланса конденсаторов по напряжению без применения внешнего электронного балансирующего устройства.
- Накопленный опыт эксплуатации конденсаторных модулей на различных транспортных средствах с гибридным приводом позволил ЭЛТОН провести разработку новой модели конденсаторного модуля с напряжением 90 В.