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 «ассиметричные» 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:
- $\mathbf{E_1 = m \cdot V_1^2/(2K_И)}$ (1)
- Доступная для рекуперации энергия составит:
- $\mathbf{E_2 = K_И \cdot m \cdot V_1^2/2}$ (2)

  m – масса транспорта,

  $K_И$ – 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:
  $\mathbf{EF = E_2 / E_1}$
  (3)
- Для рабочего цикла движения городского транспорта, эффективность рекуперации при наличии накопителя можно представить в виде формулы:
  $\mathbf{EF = \varphi \cdot \eta \cdot K_И^2 \cdot V_2^2 / V_1^2}$
  (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:
  $\mathbf{E_{уд} \cdot m \cdot S = m \cdot V_1^2/(2K_И)}$, откуда $\mathbf{K_И = V_1^2/(2E_{уд} \cdot S)}$ (5)
  $E_{уд}$ – удельное энергопотребление транспорта,
  S – длина маршрута в цикле.

- Опыт эксплуатации российских троллейбусов по городскому маршруту (S ~350 м, V_1~ 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: $\mathbf{K_И = 0,65}$.
- Как правило, для троллейбусов $\mathbf{V_2/V_1 = 0,85}$
- Принимая **φ = 0,95 и η = 0,8**, эффективность рекуперации, равна:
  $\mathbf{EF} = \varphi \cdot \eta \cdot K_И^2 \cdot V_2^2 / V_1^2 = 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,65^2 \cdot 0,85^2 = \mathbf{0,23}$

Определение параметров накопителя энергии

- Расчетная энергия, необходимая для разгона автобуса с массой 18 т до скорости 55 км/ч, составит $m \cdot V_1^2/(2K_И)$ =18000 • $15{,}3^2/(2 \cdot 0{,}65)$ = 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 МДж - 0,75 МДж = 2,5 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 МДж/60 с = **42 кВт**.

- **Средняя мощность электродвигателя на разгоне** для обеспечения времени разгона 25 с должна составлять не менее 3,24 МДж/25 с = **130 кВт**.

- При мощности ДВС, затрачиваемой на тягу, 42 кВт получаем **среднюю мощность накопителя** для обеспечения разгона автобуса: 130 кВт - 42 кВт = **88 кВт.**

- Для того чтобы конденсатор мог поддерживать разгон автобуса в течение всего необходимого времени, отдаваемая **энергия накопителя** при разряде должна составлять не менее 25 с • 88 кВт = **2,2 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.

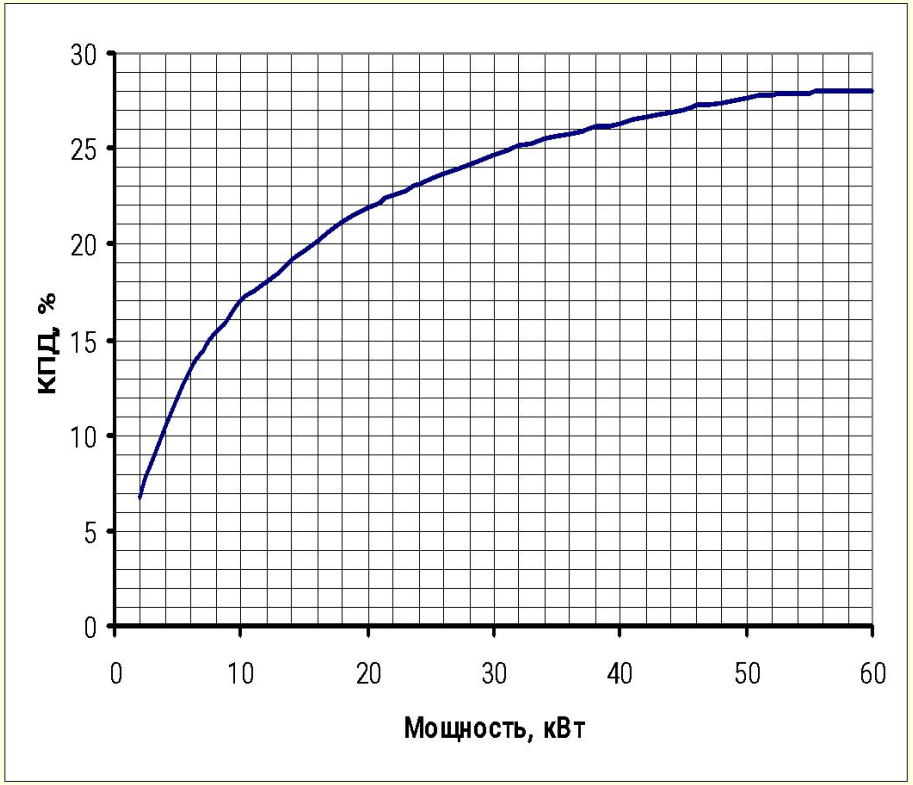
Определение оптимальной мощности ДВС

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 (Ed/Ec) 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 ^{0}С, которые предъявляют более высокие требования к надежности и безопасности транспортного средства.

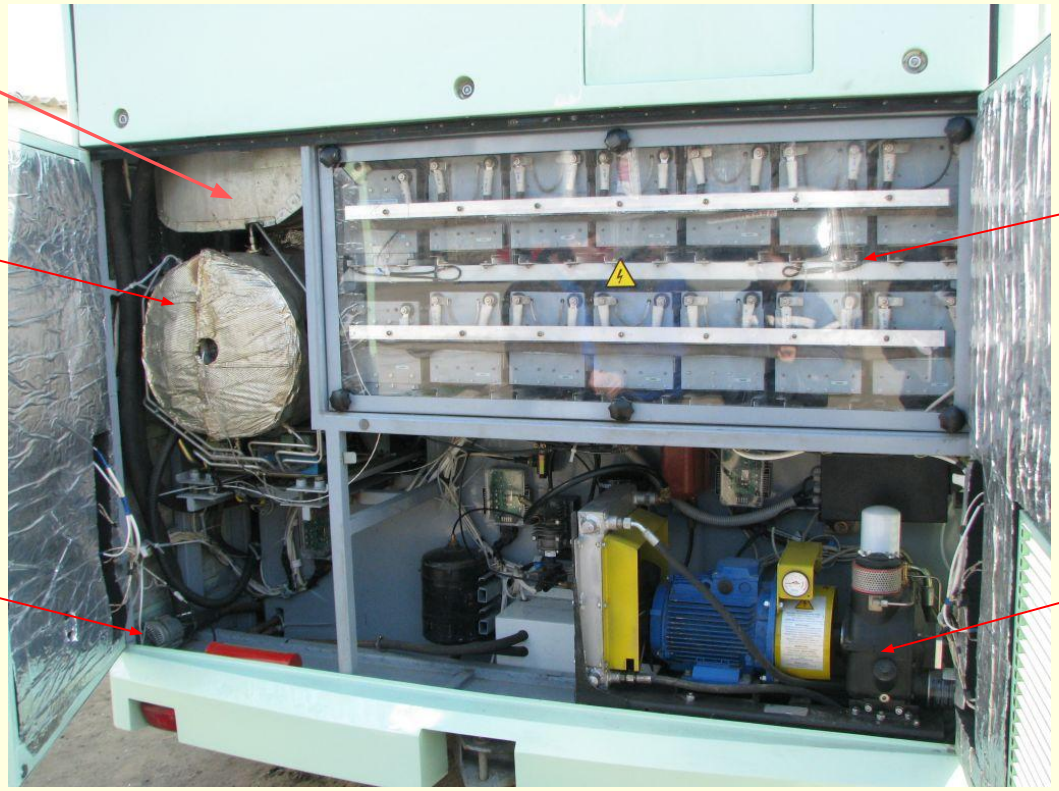
- Для экономии энергии и топлива на автобусе впервые реализована система отопления, использующая тепло выхлопных газов производимых микротурбиной, что очень актуально для России, где мощная система отопления необходима не менее 6-7 месяцев в году. Утилизация тепла выхлопных газов осуществляется помощью 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

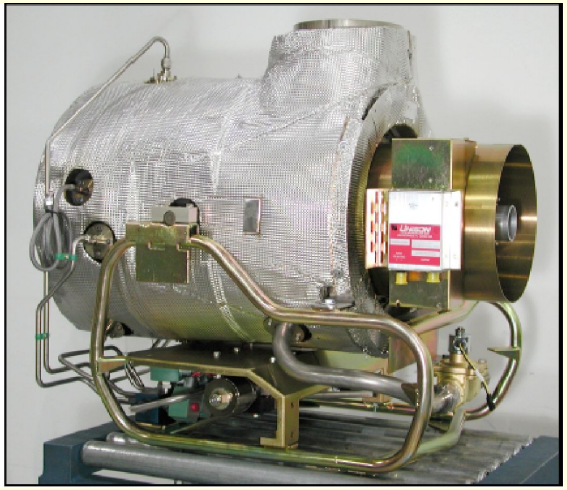


Накопитель энергии с воздушной системой охлаждения

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 Evro-6 без применения катализаторов и фильтров.
- На автобусах, запущенных в эксплуатацию, установлена система обеспечивающее питание на самом дешевом в России топливе сжатом метане (CNG).
- Газовые баллоны расположены на крыше автобуса.



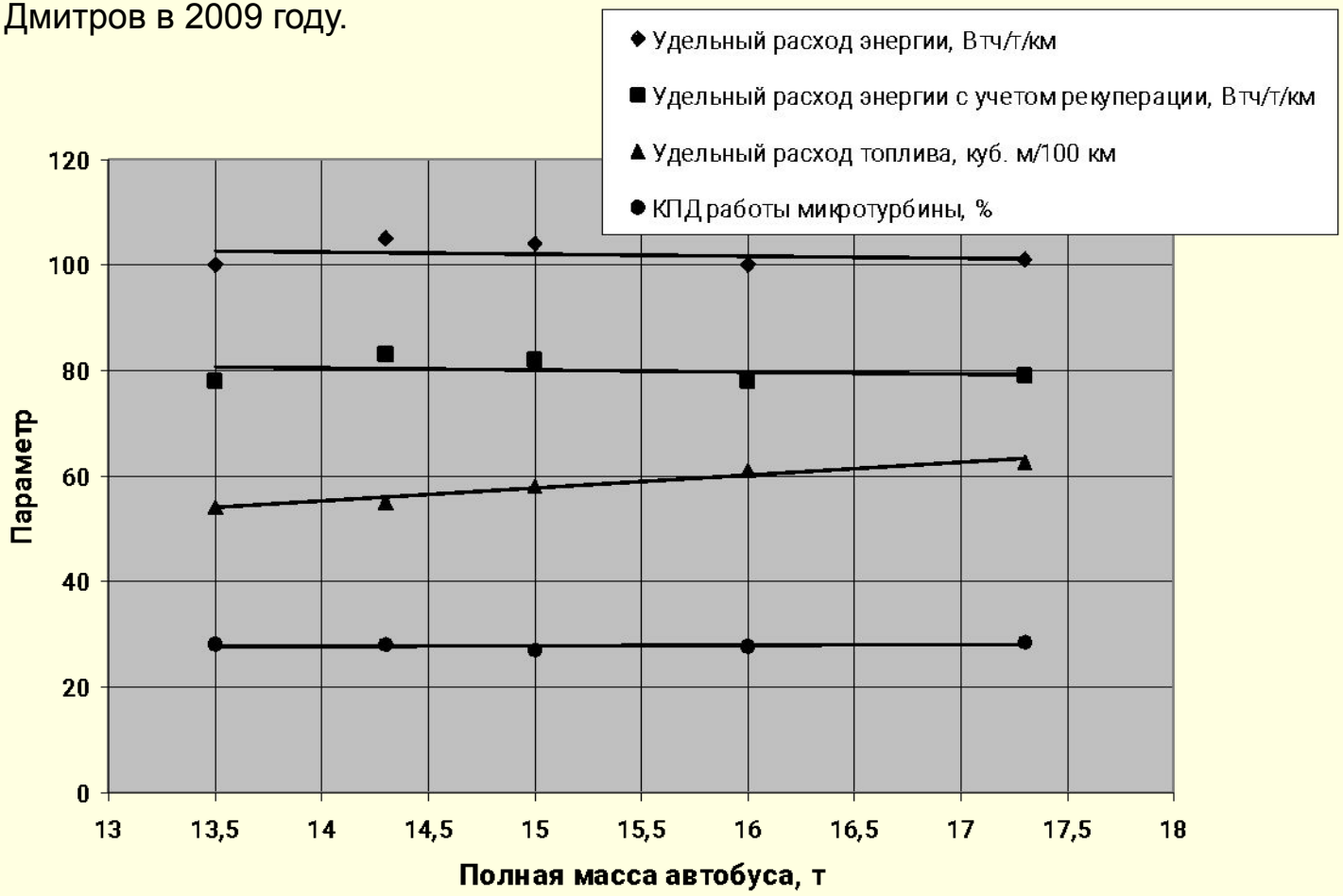
Накопитель на основе ЭКЭ для гибридного привода городского автобуса Тролза-5250

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/Ec) 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, ^{0}C	–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.

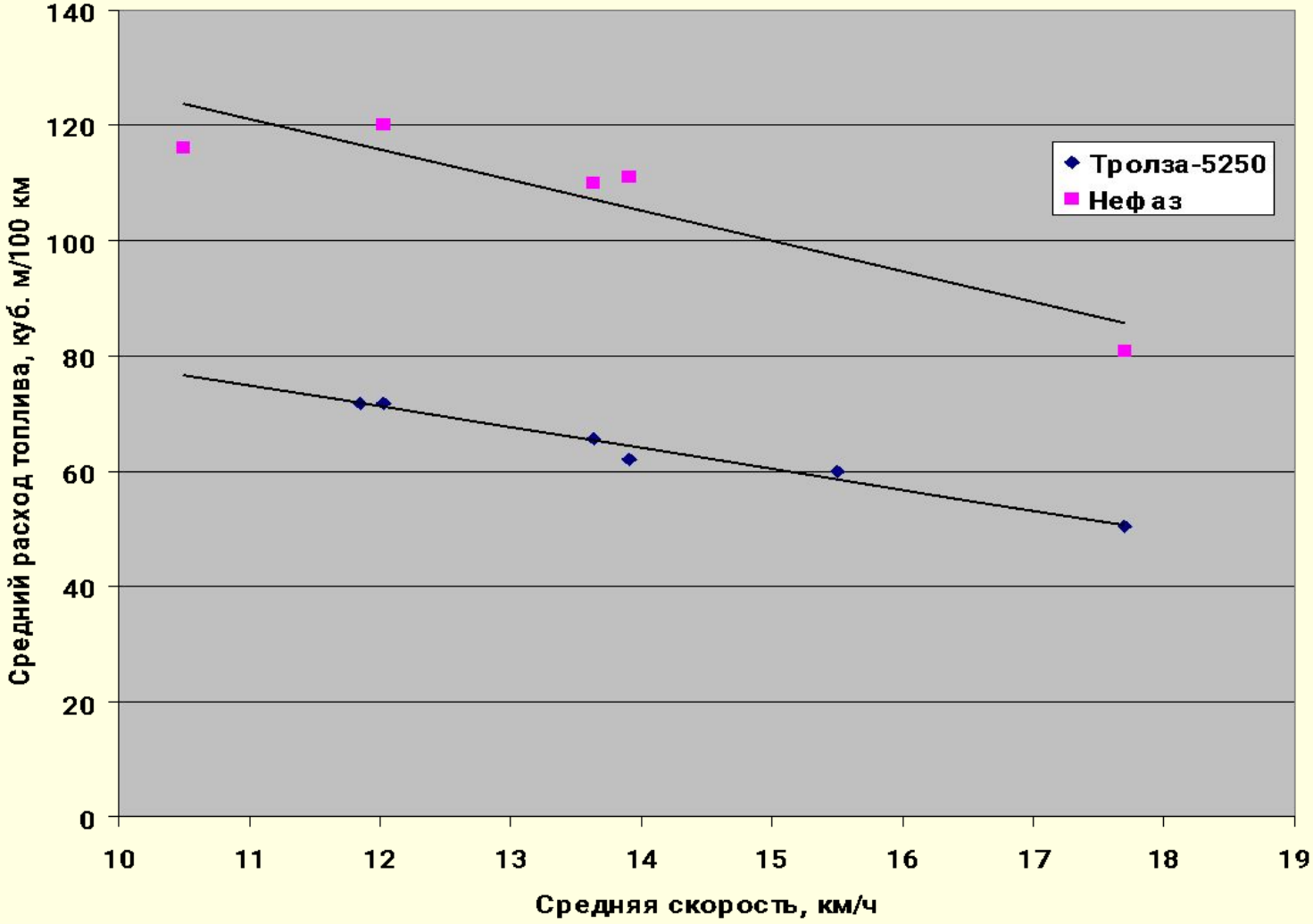


Эксплуатация автобусов Тролза-5250

- 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.

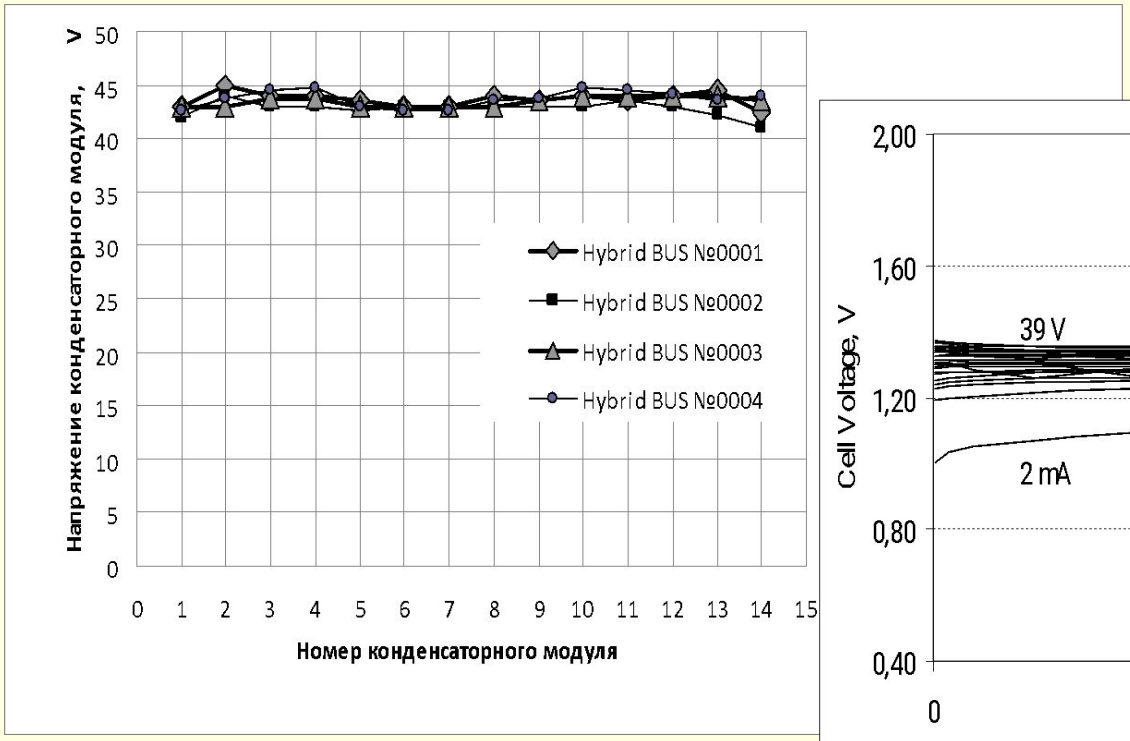
Зависимость расхода топлива от средней скорости при эксплуатации гибридного и обычного газовых автобусов на одном и том же маршруте в г. Краснодаре

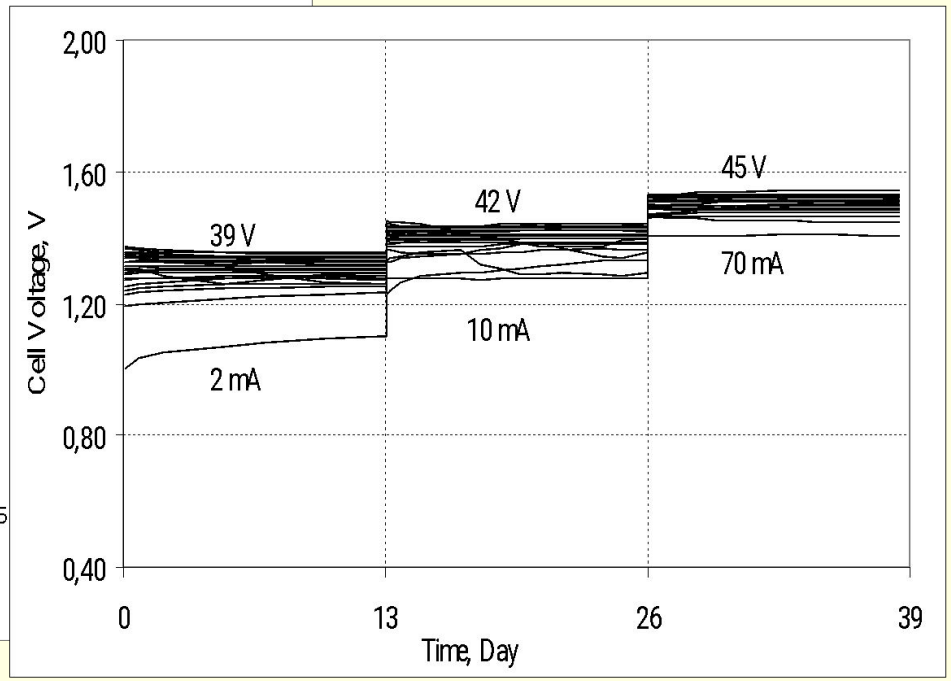


Характеристики автобуса с гибридным приводом Тролза-5250

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

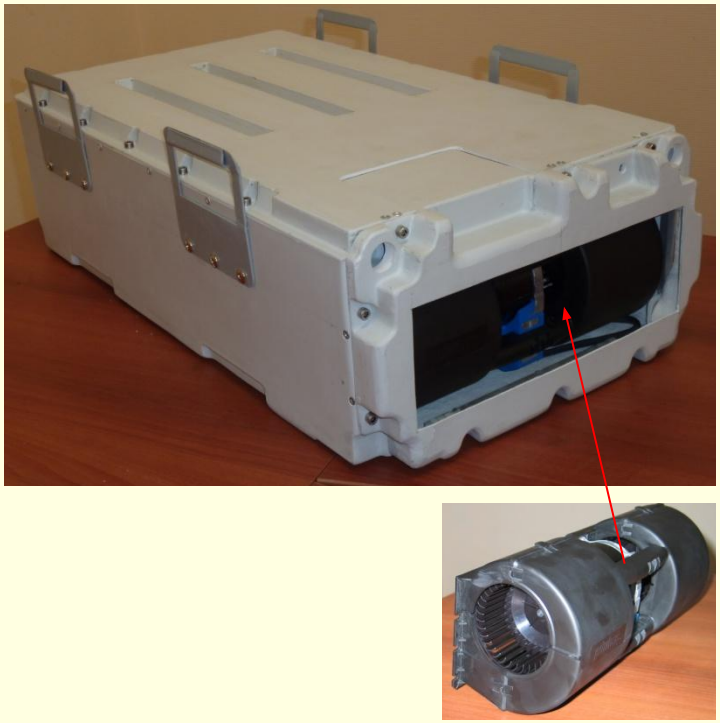
Гибридный автобус Goshen Coach EuroShuttle - *HBD*™ Ohio, USA, 2004

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, ^{0}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 м^3/100 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 балансировочного 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.