

*Энергоэффективные решения для
транспортных машин*

capforce®

*Автомобиль должен перевозить пассажиров,
а не аккумуляторные батареи!*

1 Общая информация	2
1.1 Энергоэффективность и защита окружающей среды	2
1.2 Энергоотдача накопителей энергии	3
1.3 Комбинированные накопители	7
1.4 Продуктовая линейка Capforce	9
2 Накопительные ячейки	10
2.1 Конструктивные особенности ячеек	11
2.2 Ячейка с ламинированной оболочкой	12
2.3 Ячейка с ультранизким тепловым сопротивлением	14
3 Системы пуска ДВС	17
3.1 Энергоэффективность систем пуска	18
3.2 Характеристики пускового бустера	20
3.3 Номенклатура пусковых бустеров	23
3.4 Пусковая батарея Capforce	24
3.5 Сравнение батарей Capforce и AGM	26
4 Электрические силовые установки	29
4.1 Энергоэффективность силовых установок	30
4.2 Управление разгонно-тормозным бустером	33
4.3 Номенклатура разгонно-тормозных бустеров	38
4.4 Электродвигатели типа SRM	39
4.5 Варианты силовых установок	43
<hr/>	
Приложения	49
Перечень использованного программного обеспечения	51
Ссылки	51



Данный обзор содержит результаты исследований и разработок компании ООО «Смартер» в области электроэнергетики транспортных машин. Предлагаемые технические решения обеспечивают повышение энергоэффективности систем электроснабжения транспортных машин, снижение их веса и стоимости. В конечном итоге такой подход направлен на защиту окружающей среды.

1.1 Энергоэффективность и защита окружающей среды

В качестве примера рассмотрим традиционную систему электростартерного пуска двигателя внутреннего сгорания (ДВС) легкового автомобиля, где источником энергии является свинцовая аккумуляторная батарея емкостью около $60 \div 75 \text{ A} \cdot \text{h}$. Для прокрутки стартера на пусковых оборотах достаточно (в наиболее тяжелых зимних условиях) тока 450 А в течение двух секунд, что составляет $0,25 \text{ A} \cdot \text{h}$ — менее половины процента от ёмкости свинцовой батареи. Столь низкая энергоэффективность традиционной системы пуска ДВС обусловлена высоким внутренним сопротивлением свинцовой батареи при отрицательных температурах.

Если повысить энергоэффективность системы пуска, то ёмкость батареи будет определяться уже не требованиями к пуску, а требованиями по обеспечению автомобиля электроэнергией при неработающем ДВС, что составляет около $25 \div 30 \text{ A} \cdot \text{h}$. Следовательно, существует потенциальная возможность уменьшения автомобильных батарей в $2 \div 3$ раза.

В разделе 3 представлены технические решения, которые позволяют достигнуть указанного результата. Более половины производимого в мире свинца приходится на автомобильные батареи, — таким образом, **объемы производства и переработки одного из наиболее экологически опасных металлов могут быть кардинально сокращены!**

Другой пример — электромобили, эксплуатируемые в режиме городского такси. Их широкому коммерческому использованию препятствует высокий коэффициент простоя:

$$\text{DTR} = T_i / (T_m + T_i), \quad (1)$$

где T_i — время простоя, необходимое для зарядки аккумуляторной батареи, T_m — время движения электромобиля без подзарядки.

Для снижения коэффициента простоя производители стремятся уменьшить T_i путем увеличения зарядного тока, что сокращает срок службы батарей, а также увеличить T_m , что требует увеличения массы батарей. С экологической точки зрения такой подход не может считаться оптимальным, так как положительный эффект от исключения ДВС и сопутствующих вредных выбросов ослабляется ростом

производства и переработки опасных веществ для аккумуляторов и повышенным пылеобразованием из-за износа резины и дорожного покрытия, связанного с увеличением массы автомобиля.

Альтернативный подход заключается в том, чтобы не заряжать аккумуляторные батареи, а заменять их. В этом случае $T_i \rightarrow \min$, значит коэффициент простоя может быть существенно уменьшен. Для того, чтобы обеспечить возможность оперативной замены батарей необходимо уменьшить их массу, снизить напряжение до безопасного уровня, а также исключить необходимость жидкостного охлаждения батарей. Данный результат может быть достигнут путем повышения энергоэффективности силовой установки электромобиля, при этом **вред, причиняемый природе при производстве аккумуляторов, а также содержание в городском воздухе резиновой и асфальтовой пыли сократятся**. Такие технические решения представлены в разделе 4.

1.2 Энергоотдача накопителей энергии

Для описания свойств накопителей электрической энергии обычно используются разрядные характеристики — семейства кривых выходного напряжения в зависимости от времени (или от доли снимаемой емкости) при разряде постоянным током.

Примеры таких характеристик 1, 2, 3 показаны на рисунке 1: характеристики 1 литий-железо-фосфатного (LFP) аккумулятора взяты из руководства [1], характеристики 2 свинцово-кислотного аккумулятора — из книги [2, стр. 36], характеристики 3 конденсатора с двойным электрическим слоем (EDLC) получены экспериментально для ячейки Capforce C2.6K2.7V представленной в главе 2.2.

Если для оценки энергоэффективности систем с различными типами накопителей энергии используются указанные разрядные характеристики, то задача затрудняется тем, что эти характеристики разнородны и представляют собой трехмерные таблицы, неудобные для аналитического описания. Однако, несмотря на различную природу физико-химических процессов, протекающих в накопителях энергии различного типа, существуют общие закономерности, которые будут рассмотрены ниже. Предварительно введем некоторые **обозначения и определения**:

IS	Начальное состояние накопителя энергии, при котором он заряжен до предела.
E	Энергоемкость — количество энергии (kJ), которым обладает накопитель в состоянии IS.
SE	Удельная энергоемкость (kJ/kg) — энергоемкость накопителя массой 1 кг.
P_{\max}	Максимальная мощность (kW), которая может быть получена от накопителя энергии в состоянии IS.
	Разряд постоянной мощностью — эксперимент, в котором на выводах

накопителя поддерживается постоянная мощность P в течение максимально возможного времени T .

DoS Отказ в обслуживании — состояние накопителя энергии, при котором разряд постоянной мощностью далее невозможен.

T Длительность разряда – время, прошедшее при разряде постоянной мощностью с изменением состояния накопителя от IS до DoS

$P(T)$ Функция, описывающая границу зоны DoS.

$Q(T)$ Энергоотдача — количество энергии (кДж), выведенное из накопителя при разряде постоянной мощностью.

$SQ(T)$ Удельная энергоотдача (кДж/кг) — энергоотдача накопителя массой 1кг.

С учетом введенных определений на рис. 1 представлена обобщенная характеристика 4 разряда постоянной мощностью.

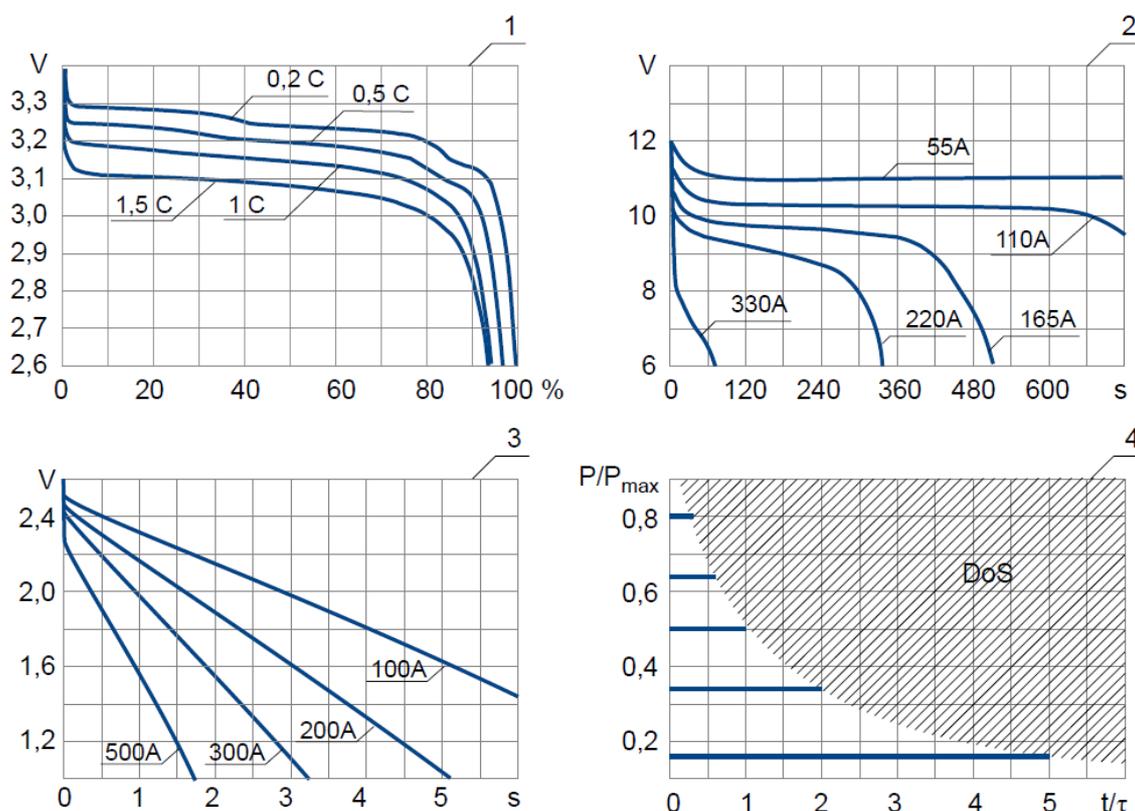


Рисунок 1. Разрядные характеристики: 1 - LFP аккумулятора; 2 - свинцовой аккумуляторной батареи 12V, 55A·h при -20°C ; 3 - EDLC ячейки Capforce C2.6K2.7V; 4 - обобщенная характеристика разряда постоянной мощностью.

Причины достижения состояния DoS могут быть различными:

- для LFP аккумулятора мощность разряда ограничена перегревом, длительность разряда в режиме потребления малой мощности определяется емкостью аккумулятора;
- в свинцовом аккумуляторе мощность разряда ограничена его внутренним

сопротивлением, длительность разряда в режиме потребления малой мощности определяется емкостью аккумулятора;

- в EDLC ячейке ограничение мощности наступает в результате снижения напряжения разомкнутой цепи.

Общие закономерности разряда постоянной мощностью для накопителей энергии различных типов проиллюстрированы на рис. 2.

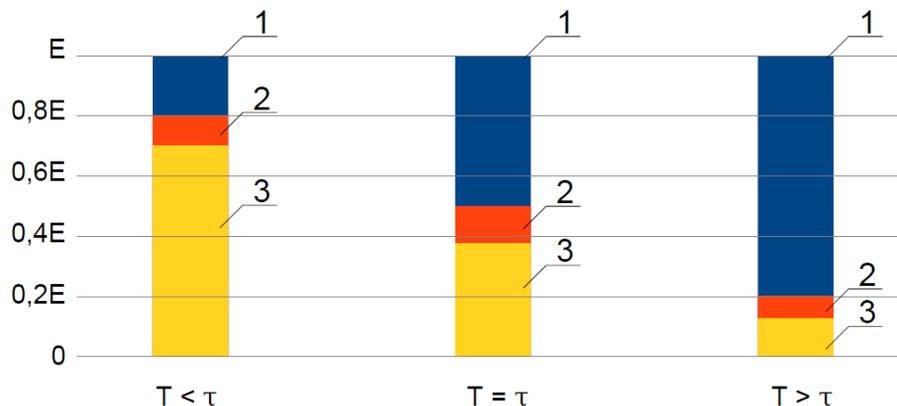


Рисунок 2. Распределение энергии накопителя : 1 - энергоотдача; 2 - тепловые потери; 3 - остаточная энергия.

В том случае когда разряд осуществляется мощностью, близкой к P_{\max} , состояние DoS достигается в течение сравнительно небольшого времени. При этом основная часть энергии накопителя остается неизрасходованной (остаточная энергия), энергоотдача накопителя незначительна, тепловые потери сопоставимы по величине с энергоотдачей.

При разряде малой мощностью состояние DoS достигается после того, как основная часть энергии накопителя будет выведена в нагрузку, то есть энергоотдача накопителя максимальна, остаточная энергия и тепловые потери минимальны.

Очевидно, что существует промежуточный вариант, при котором энергоотдача составляет 50% энергоемкости накопителя. Для этого случая обозначим длительность полуотдачи как τ .

Один из возможных вариантов аппроксимирующей функции, описывающей границу зоны DoS и удовлетворяющей указанным выше закономерностям:

$$P(T) = E/(T+\tau). \quad (2)$$

Соответствующая энергоотдача (в т. ч. удельная):

$$Q(T) = E \cdot T / (T + \tau). \quad (3)$$

$$SQ(T) = SE \cdot T / (T + \tau). \quad (4)$$

На рис 3 представлены графики (гладкие кривые) функций вида (4), построенные на основе экспериментов и расчетов (квадратные точки):

1. Гладкие кривые для EDLC ячейки имеют параметры $SE = 21 \text{ kJ/kg}$, $\tau = 1,8 \text{ s}$. Квадратные точки — результаты испытаний ячейки Capforce C2.6K2.7V, представленной в главе 2.2.

2. Гладкие кривые для LFP аккумулятора имеют параметры $SE = 400\text{kJ/kg}$, $\tau = 1000\text{s}$. Квадратные точки: для $T > 1000\text{s}$ — результаты оцифровки и обработки разрядных характеристик 1 на рис. 1; для $T < 1000\text{s}$ — расчетные данные для ячейки Capforce C440K3.2V, представленной в главе 2.3.

3. Гладкие кривые для свинцового аккумулятора имеют параметры $SE = 110\text{kJ/kg}$, $\tau = 550\text{s}$. Квадратные точки — результаты оцифровки и обработки разрядных характеристик 2 на рис. 1.

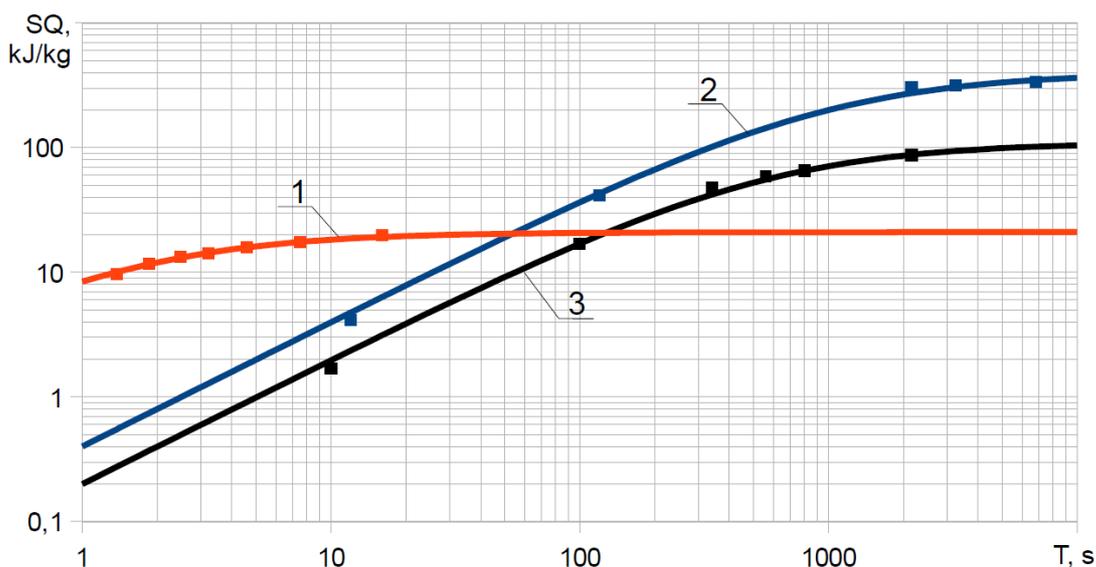


Рисунок 3. Удельная энергоотдача: 1 - EDLC ячейки; 2 - LFP аккумулятора с ультранизким тепловым сопротивлением; 3 - свинцового аккумулятора при -20°C .

Графики демонстрируют достаточно хорошее совпадение с экспериментальными и расчетными результатами, что позволяет использовать их в качестве инструмента анализа. Как видно из графиков, для питания потребителей электроэнергии, работающих в длительном режиме, предпочтительнее аккумуляторы, а в случае кратковременных и повторно-кратковременных режимов — EDLC ячейки.

Дополнительно к энергоотдаче (3) полезным инструментом анализа может оказаться энергорасход, являющийся суммой энергоотдачи и тепловых потерь:

$$Q^*(T) = E \cdot T / (T + \tau^*), \quad (5)$$

где $\tau^* < \tau$.

На рис 4 представлен пример соответствующих графиков энергоотдачи, энергорасхода и тепловых потерь.

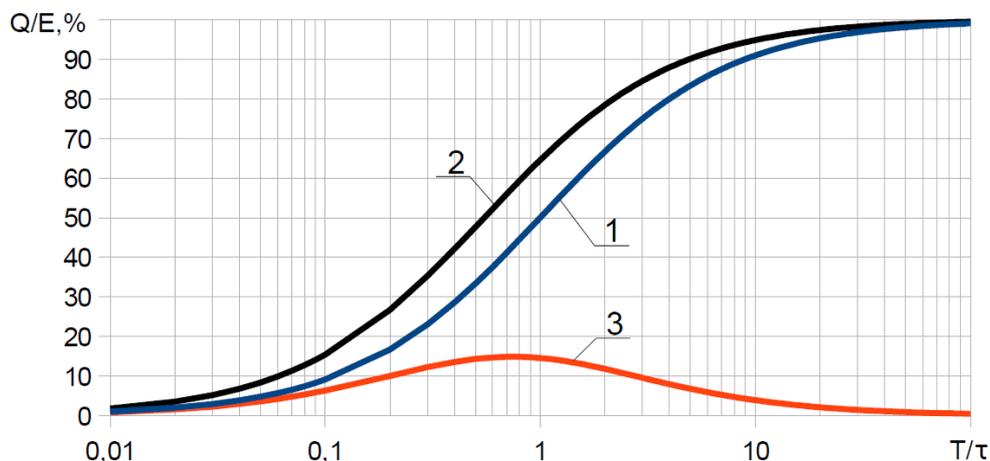


Рисунок 4. Общий вид характеристик накопителя при разряде постоянной мощностью:
1 - энергоемкость; 2 - энергорасход; 3 - тепловые потери

Резюме: Энергоемкость $Q(T)$, по сравнению с разрядными характеристиками, является более удобным и универсальным инструментом анализа. Отметим, что в общем случае энергоемкость при разряде постоянной мощностью может описываться аппроксимирующей функцией, отличающейся от вида (3).

1.3 Комбинированные накопители

Автономные системы электроснабжения, применяемые на транспортных машинах, служат для питания разнообразных нагрузок и должны быть эффективны в широком диапазоне длительностей разряда/заряда. Эта задача решается путем комбинирования аккумуляторных батарей с суперконденсаторами (здесь и далее: «суперконденсатор» — это несколько последовательно соединенных EDLC ячеек).

Очевидно, что непосредственное (параллельное) соединение аккумуляторной батареи и суперконденсатора не даст желаемого результата из-за несовпадения окон рабочего напряжения. Схема комбинированного накопителя (рис. 5) должна содержать DC-DC преобразователь, который позволит (под управлением контроллера) суммировать и распределять потоки электрической энергии аккумуляторной батареи и суперконденсатора.

В системах Capforce DC-DC преобразователь и контроллер конструктивно объединены с суперконденсатором в общем модуле [3], далее именуемом «бустер».

Требования, предъявляемые к DC-DC преобразователю:

- **симметричность** — способность как повышать, так и понижать напряжение, и при этом проводить ток в обоих направлениях;
- **высокий КПД**.
- **адаптивность** — способность изменять режимы своей работы.

Указанным требованиям удовлетворяет четырехключевой преобразователь (рис. 6). Схема четырехключевого преобразователя обеспечивает регулирование

тока индуктора: $i \rightarrow \text{Ref}$, где Ref — уставка, которая задается контроллером как программно изменяемая функция от напряжений аккумуляторной батареи и суперконденсатора:

$$\text{Ref} = f(U_{\text{ab}}, U_{\text{sc}}). \quad (6)$$

Контроллер позволяет распределять потоки электрической энергии аккумуляторной батареи и суперконденсатора различными способами.

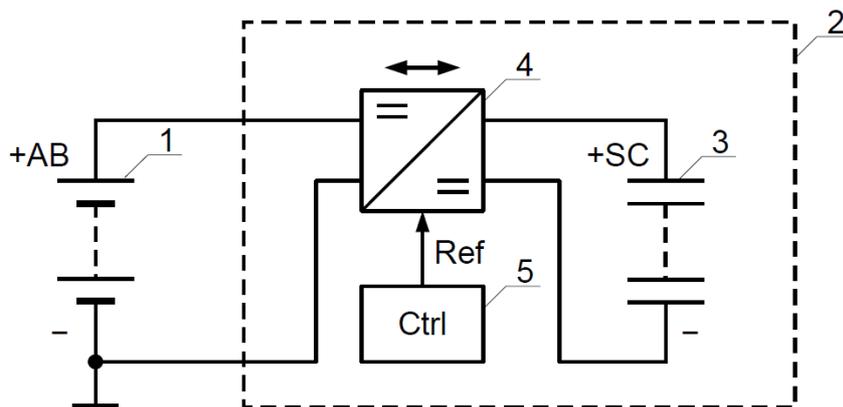


Рисунок 5 Структурная схема комбинированного накопителя энергии:

1 - аккумуляторная батарея; 2 - бустер; 3 - суперконденсатор; 4 - DC-DC преобразователь; 5 - контроллер.

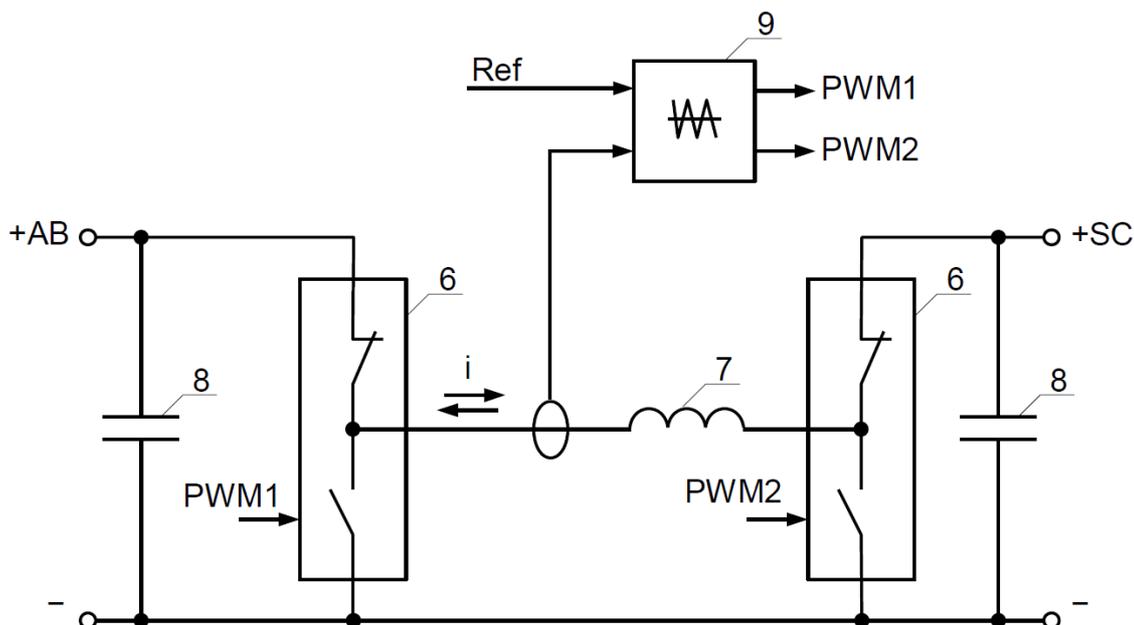


Рисунок 6. Структурная схема четырехключевого DC-DC преобразователя:

6 - MOSFET полумосты; 7 - индуктор; 8 - фильтрующие конденсаторы; 9 - импульсный регулятор тока.

Энергоотдача комбинированного накопителя энергии:

$$Q(T) = m_{ab} \cdot SE_{ab} \cdot T / (T + \tau_{ab}) + m_{sc} \cdot SE_{sc} \cdot T / (T + \tau_{sc}), \quad (7)$$

где m_{ab} , m_{sc} — массы, SE_{ab} , SE_{sc} — удельные энергоёмкости, τ_{ab} , τ_{sc} — длительности полуотдачи аккумуляторной батареи и суперконденсатора соответственно.

На рис. 18 (см. главу 3.4) проиллюстрирована энергоотдача комбинированного накопителя – пусковой батареи Capforce A640K12.8V, соответствующая формуле (7).

Схемы рис. 5, 6 используются в изделиях Capforce (пусковая батарея, пусковые и разгонно-тормозные бустеры), представленных далее в разделах 3, 4.

1.4 Продуктовая линейка Capforce

Capforce – линейка взаимодополняющих друг друга продуктов, разработанная на базе единой методики и общих технических решений, характеризующаяся высокой степенью унификации. В её состав входят:

- накопительные ячейки (суперконденсаторные и аккумуляторные);
- построенные на основе накопительных ячеек аккумуляторные батареи и бустеры;
- электрические машины (двигатели).

Обозначения изделий Capforce:



В конце обозначения в скобках может указываться дополнительная информация.



2.1 Конструктивные особенности ячеек

Основу энергетических ресурсов в системах Capforce составляют накопительные ячейки. Ячейка (рис. 7) содержит электроды, каждый из которых представляет собой слой вещества, нанесенного на поверхность токоотвода и пропитанного раствором электролита. Каждый токоотвод выполнен в виде металлической фольги. Электроды разделены сепараторами. Концевые части токоотводов выступают за границы сепараторов и соединены с электрическими выводами ячейки. Электроды с сепараторами свернуты в рулон либо сложены в стопку и заключены в оболочку.

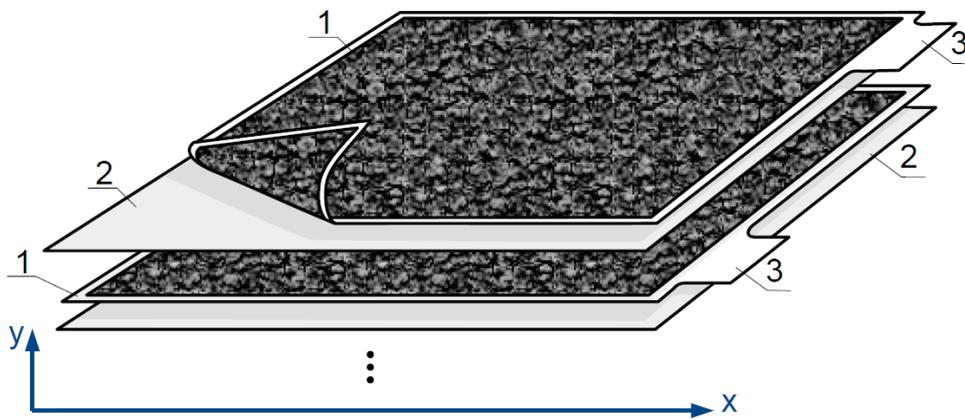


Рисунок 7. Накопительная ячейка:

1 - электроды; 2 - сепараторы; 3 - концевые части токоотводов.

Разряд при $T \gg \tau$, или $T \ll \tau$ не оказывает разрушающего влияния на ячейку, так как тепловые потери невелики (см. главу 1.2, рис. 4). Часто повторяющиеся циклы заряда/разряда при $T \approx \tau$ могут привести к перегреву ячейки, для предотвращения которого применяют принудительное охлаждение.

Ячейка в виде стопки или рулона из электродов и сепараторов обладает анизотропными свойствами — её теплопроводность в поперечном направлении (вдоль оси y на рис. 7) ниже чем в продольном (вдоль оси x на рис. 7). Для EDLC и LFP ячеек характерны следующие соотношения параметров:

$$D_s/D_f \approx 10, \quad (8)$$

$$K_f/K_s \approx 1000, \quad (9)$$

где D_f — толщина фольги, из которой изготовлены токоотводы, K_f — коэффициент теплопроводности фольги, D_s — расстояние между слоями фольги, K_s — усредненный коэффициент теплопроводности в промежутках между слоями фольги. Если внутри ячейки выделить прямоугольный объем с соотношением размеров:

$$\Delta x/\Delta y \approx 10, \quad (10)$$

то с учетом (8), (9) тепловое сопротивление между гранями этого объема в

продольном и поперечном направлениях будет приблизительно одинаковым. Соотношение (10) позволяет оценивать влияние формы ячейки на теплопередачу между её внутренними областями и оболочкой.

В ячейке цилиндрической формы электроды и сепараторы свернуты в рулон и преобладает продольный перенос тепла к основаниям цилиндра (так как обычно отношение высоты цилиндра к его диаметру намного меньше 10). Для контакта с теплоотводом в ячейках цилиндрической формы удобно использовать только одно из оснований, — площадь основания цилиндра занимает незначительную долю от общей площади поверхности оболочки, поэтому эффективный отвод тепла затруднен.

В системах Capforce предпочтение отдается ячейкам в форме плоской прямоугольной призмы, рассмотренным далее.

2.2 Ячейка с ламинированной оболочкой

В пусковых бустерах (глава 3.3) и разгонно-тормозных бустерах (глава 4.3) используются EDLC ячейки с ламинированной оболочкой (рис. 8).

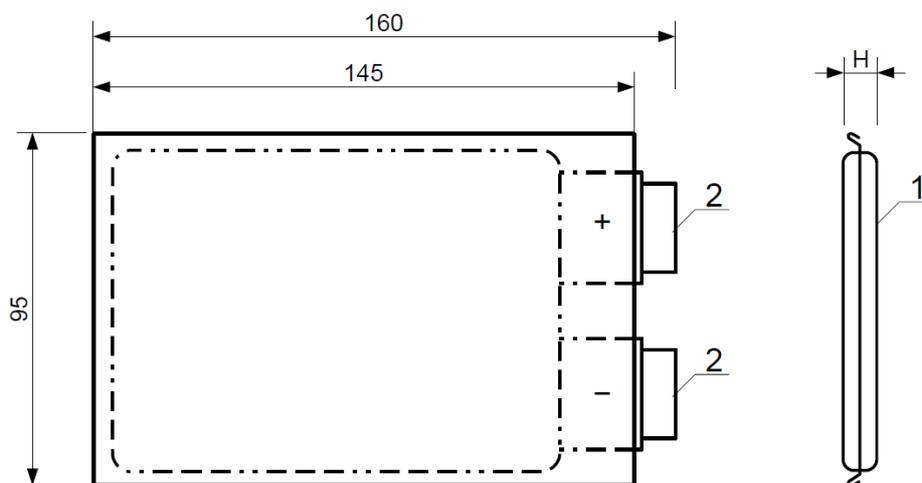


Рисунок 8. Внешний вид и размеры (мм) EDLC ячейки: 1 - ламинированная оболочка; 2 - электрические выводы.

Технические характеристики:

Категория размещения по стандарту [4]	5 (внутри РЭА).
Рабочая температура окружающего воздуха, °С:	
в исполнении У по стандарту [4]	-40÷+60,
в исполнении УХЛ по стандарту [4]	-60÷+60.
Гамма процентная наработка до отказа	1 000 000 циклов при $\gamma = 95\%$.
Остальные параметры соответствуют таблице 1.	

Таблица 1:

Модель	E, kJ	τ , s	U_r , V	I_{max} , A	I_{rms} , A	H, mm	m, g	C^* , F	ESR*, m Ω
C1.9K2.7V	1,9	1,8	2,7	400	62	7,5	95	520	1
C1.9K2.7V-A	1,9	2,8	2,7	360	50	7,5	95	520	1,7
C2.6K2.7V	2,6	1,8	2,7	600	75	9,5	120	710	0,7
C2.6K2.7V-A	2,6	2,8	2,7	540	57	9,5	120	710	1,2

Пояснения к таблице 1:

Cx.xKx.xV — климатическое исполнение У по стандарту [4].

Cx.xKx.xV-A — «арктическое» исполнение УХЛ по стандарту [4].

Энергоотдача в соответствии с формулой (3), не менее.

E, kJ — энергоемкость в формуле (3).

τ , s — длительность полуотдачи в формуле (3).

U_r , V — номинальное напряжение.

I_{max} , A — максимально допустимый ток (кратковременно, 2s).

I_{rms} , A — максимально допустимый среднеквадратичный ток (длительно, при температуре оболочки не выше 50°C).

H, mm — высота (см. рис. 8), не более.

m, g — масса, не более.

C^* , F — емкость (для справки).

ESR*, m Ω — внутреннее сопротивление постоянному току (для справки).

Сборка суперконденсатора из ячеек:

В суперконденсаторе ячейки одного типа сложены в стопку так, что разнополярные электрические выводы соседних ячеек располагаются напротив друг друга. Выводы сформованы и последовательно соединены ультразвуковой сваркой. Количество последовательно соединенных ячеек:

$$N_c = U_{\Sigma} / 2,6, \quad (11)$$

где U_{Σ} — максимально допустимое напряжение (V) суперконденсатора.

Каждая ячейка шунтирована выравнивающим резистором с допуском не хуже, чем 1%. Номиналы выравнивающих резисторов: не более 50 Ω для C1.9K2.7V, не более 40 Ω для C2.6K2.7V.

Суперконденсатор размещен в корпусе бустера и залит эластичным герметиком.

В пусковых бустерах теплопередача осуществляется через герметик и корпус бустера в окружающую среду.

В разгонно-тормозных бустерах, требующих принудительного охлаждения, между соседними ячейками суперконденсатора размещены алюминиевые теплоотводы толщиной 0,7мм. Теплоотводы прижаты к поверхности ламинированных оболочек и к трубопроводам системы жидкостного охлаждения (рис. 9).

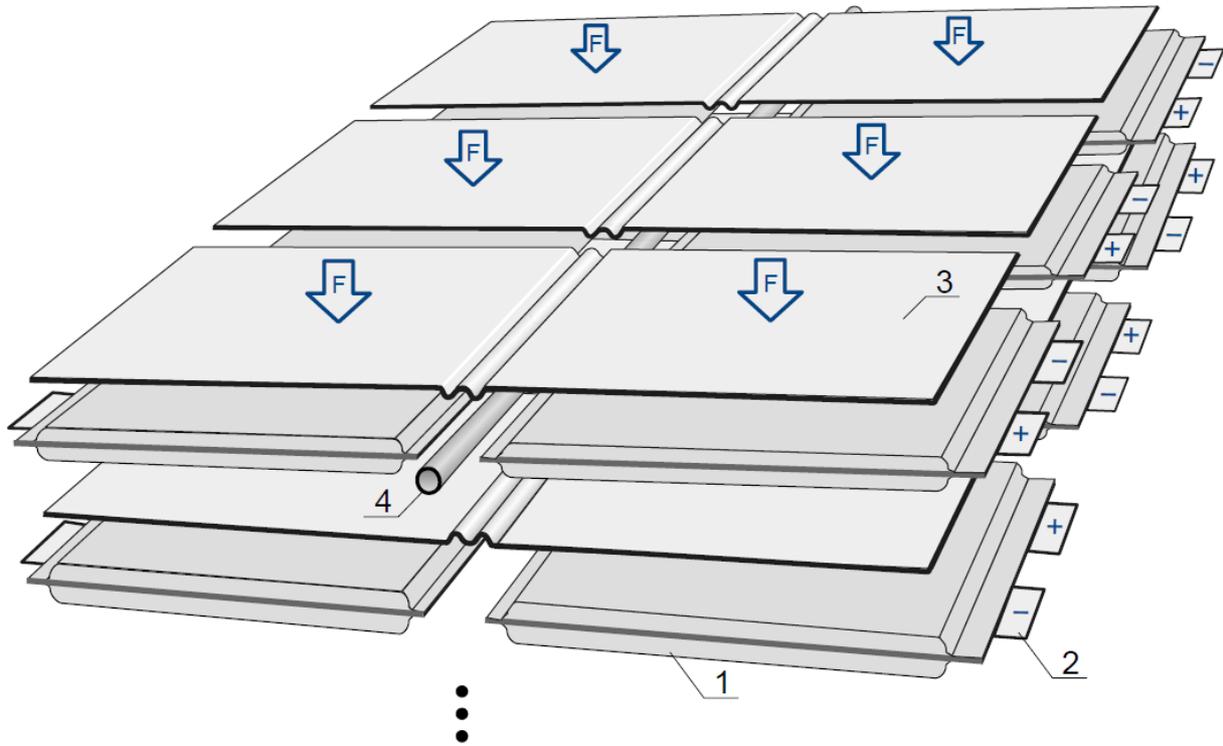


Рисунок 9. Компоновка EDLC ячеек в разгонно-тормозном бустере:
 1 - ячейки; 2 - электрические выводы ячеек (сварные соединения не показаны);
 3 - алюминиевые теплоотводы; 4 - трубопроводы жидкостного охлаждения.

Компоновка (рис. 9) достаточно проста в реализации и не требует существенного увеличения объема бустеров. Плоская конфигурация ячеек 1 ($\Delta x/\Delta y > 10$) обеспечивает эффективный перенос тепла в поперечном направлении (к теплоотводам 3).

2.3 Ячейка с ультранизким тепловым сопротивлением*

**Примечание: представленное в этой главе техническое решение проверено путем компьютерного моделирования; прототип и результаты натурных испытаний на момент написания данного обзора отсутствуют.*

Накопительная ячейка со встроенным каналом для теплоносителя [5] обладает ультранизким тепловым сопротивлением.

На рис. 10 представлена такая ячейка. Плоский рулон 1 из электродов и сепараторов пропитан электролитом и изолирован от внешней среды оболочкой, которая образована электроизоляционной рамкой 4 и электропроводящими пластинами 3. Последние являются корпусными деталями, электрическими терминалами и средством теплообмена с электроизоляционной рамкой 4.

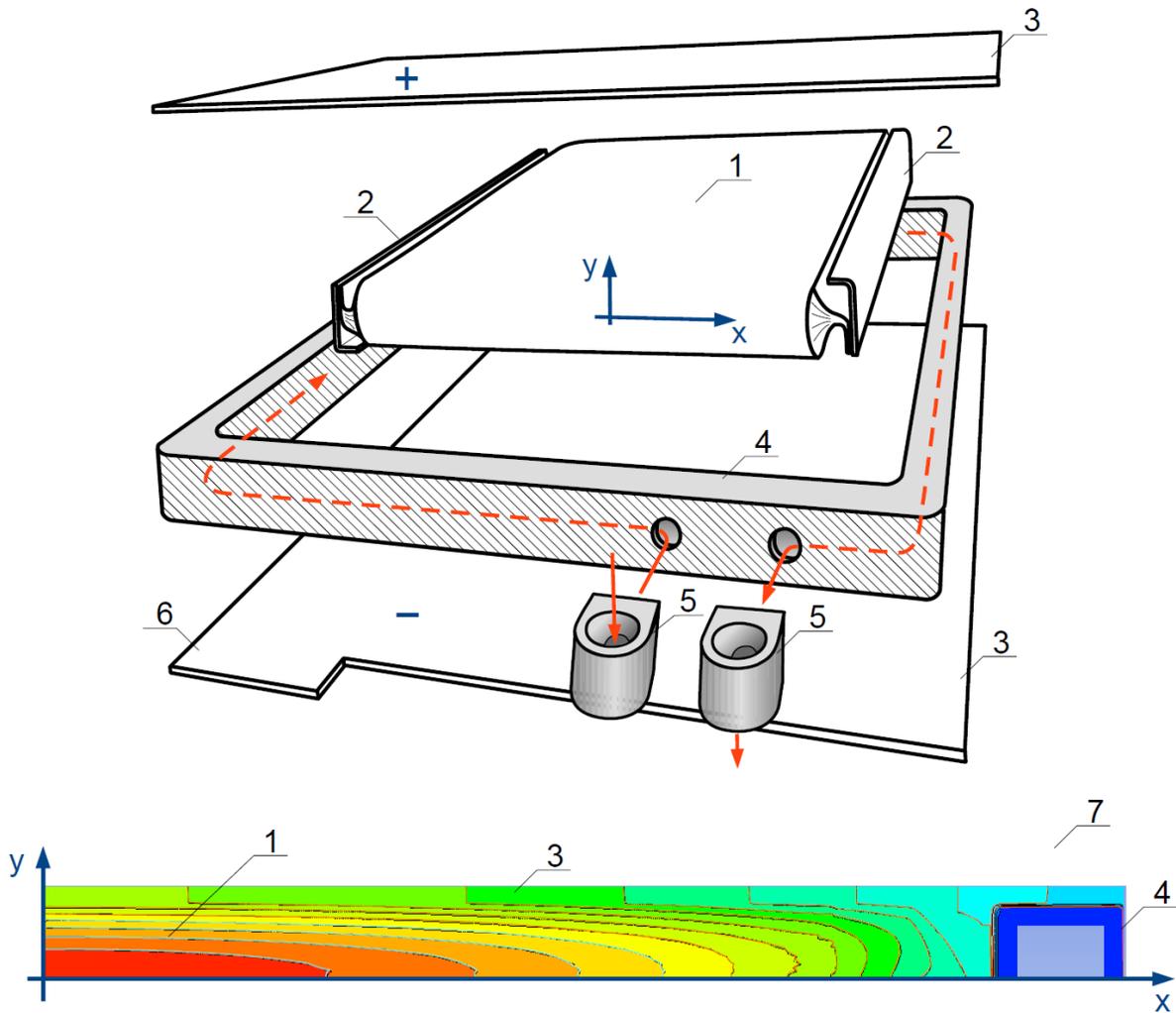


Рисунок 10. Накопительная ячейка с ультранизким тепловым сопротивлением:
 1 - свернутые в плоский рулон электроды с сепараторами; 2 - переходные шины;
 3 - электропроводящие пластины; 4 - электроизоляционная рамка с каналом для теплоносителя;
 5 - коллекторные отводы; 6 - выступ для балансировочных элементов;
 7 - картина температурного поля (пересечение осей x , y находится в центре ячейки).

Разнополярные концевые части токоотводов выведены на противоположные стороны рулона 1 и соединены через переходные шины 2 с положительной и отрицательной электропроводящими пластинами 3. Электроизоляционная рамка 4 представляет собой алюминиевую трубку прямоугольного сечения, покрытую снаружи слоем диэлектрика и приклеенную к пластинам 3. Трубка содержит отверстия для подачи и отвода теплоносителя (охлаждающей жидкости) через коллекторные отводы 5. Размеры рулона 1 соответствуют формуле (10), что обеспечивают одинаково эффективный перенос тепла как в продольном, так и в поперечном направлениях и позволяет на 20÷30% повысить допустимый среднеквадратичный ток ячейки.

На том же рисунке показано установившееся температурное поле (изотермы нанесены с интервалом в 1°C) при выделении равномерно распределенной по рабочему объему ячейки $V_c = 300\text{cm}^3$ тепловой мощности $P_{\theta} = 60\text{W}$.

LFP ячейка C440K3.2V

Ячейка C440K3.2V предназначена для создания аккумуляторных батарей с высокой удельной мощностью и ускоренной зарядкой.

В батарее (рис. 11) ячейки собраны в стопку и прижаты друг к другу пластинами 8. При этом ячейки соединены последовательно, выравнивание напряжения ячеек обеспечивается балансировочными элементами 9. Каналы для циркуляции теплоносителя объединены в общую сеть через коллекторные отводы 5, в стыках между которыми установлены уплотнительные кольца (на рисунке не показаны).

Характеристики ячейки:

Размеры (L x W x H), мм	250 x 150 x 15.
Масса, kg	1,1.
Номинальное напряжение, V	3,2.
Внутреннее сопротивление постоянному току, mΩ	3,0.
Энергоотдача, kJ	$440 \cdot T / (T + 1000)$.
Тепловое сопротивление $^{\circ}\text{C/W}$	0,35.

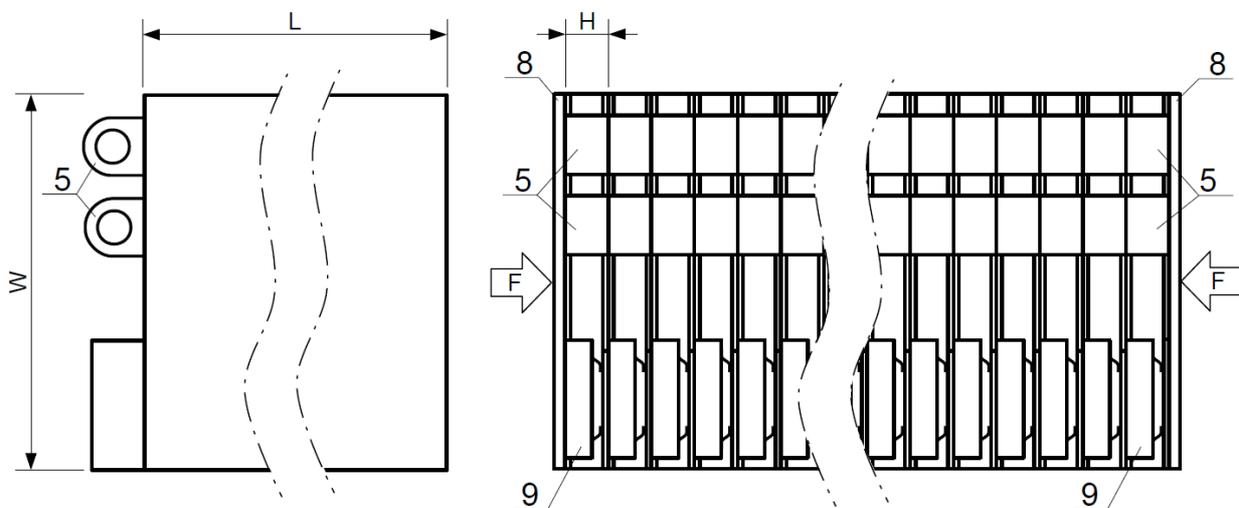


Рисунок 11. Внешний вид и размеры LFP ячеек, собранных в батарею:

5 - коллекторные отводы; 8 - прижимные пластины; 9 - балансировочные элементы.

Ультранизкое тепловое сопротивление обеспечивает при токе 136A (4C) температурный перепад менее 20°C между теплоносителем и наиболее нагретой областью в центре LFP ячейки (в том числе 12°C внутри рабочего объема ячейки).



3.1 Энергоэффективность систем пуска

Система электростартерного пуска ДВС была изобретена более 100 лет назад и с тех пор не претерпела существенных изменений — она по-прежнему обладает рекордно низким КПД, а входящая в её состав свинцовая аккумуляторная батарея часто упоминается в перечне возможных неисправностей автомобиля.

Проведем анализ энергозатрат при пуске ДВС электростартером. Можно выделить три фазы простого (одноступенчатого) пуска:

- **разгон** — приблизительно 1/2 оборота коленчатого вала с переходом стартера из состояния покоя к прокрутке;
- **прокрутка** — от 1/2 до 20 оборотов коленчатого вала, при этом частота вращения изменяется незначительно;
- **воспламенение** — 1/2 оборота коленчатого вала с резким увеличением частоты вращения и выходом на режим устойчивой работы ДВС на холостом ходу.

Во время прокрутки подготавливаются условия для воспламенения:

- при высокой частоте вращения теплопередача в холодные стенки цилиндров и пропуск газов через неплотности в поршневых кольцах незначительны, температура и давление топливо-воздушной смеси в конце такта сжатия достаточны для воспламенения — прокрутка занимает минимальное время;
- после длительной стоянки уменьшается количество смазки на трущихся поверхностях и при низкой частоте вращения возникает пропуск газов через неплотности в поршневых кольцах — прокрутка способствует разогреву и смазыванию трущихся поверхностей, иногда могут возникать единичные вспышки, условия для воспламенения наступают постепенно.

Таким образом, возникновение условий для воспламенения зависит от длительности прокрутки и частоты вращения коленчатого вала, что отражается при помощи пусковых характеристик — функций $t_{cr}(n)$, где t_{cr} — длительность прокрутки (s) до воспламенения, n — частота вращения коленчатого вала (rpm).

При прокрутке стартер преодолевает сопротивление вращению. Момент сопротивления складывается в основном из момента сил трения в кинематических парах двигателя, пульсирующего момента газовых сил и динамического момента, обусловленного инерцией вращающихся масс (для оценки энергозатрат достаточно иметь представление о среднем моменте сопротивления на интервале времени, соответствующем прокрутке). Средний момент сопротивления растёт с понижением температуры двигателя, поэтому при температуре воздуха ниже -20°C , как правило, используют подогреватели охлаждающей жидкости, то есть, прокрутка ДВС при -20°C требует максимальных затрат энергии.

Дальнейший анализ будем проводить для температуры -20°C . В качестве исходных данных [2, стр. 128, 129], [6, табл. 5] воспользуемся графиками, представленными на рис. 12:

- прямая 1, отражающая зависимость момента сопротивления от частоты вращения коленчатого вала ДВС;
- пусковая характеристика (квадратные точки) дизельного двигателя КамАЗ-740.

Пусковую характеристику 2, приблизительно соответствующую исходным данным, зададим формулой:

$$t_{cr} = 60 \cdot N_0 / (n - n_0), \quad (12)$$

где t_{cr} — длительность прокрутки (s), n — частота вращения (rpm), $N_0 = 3$, $n_0 = 60$ rpm.

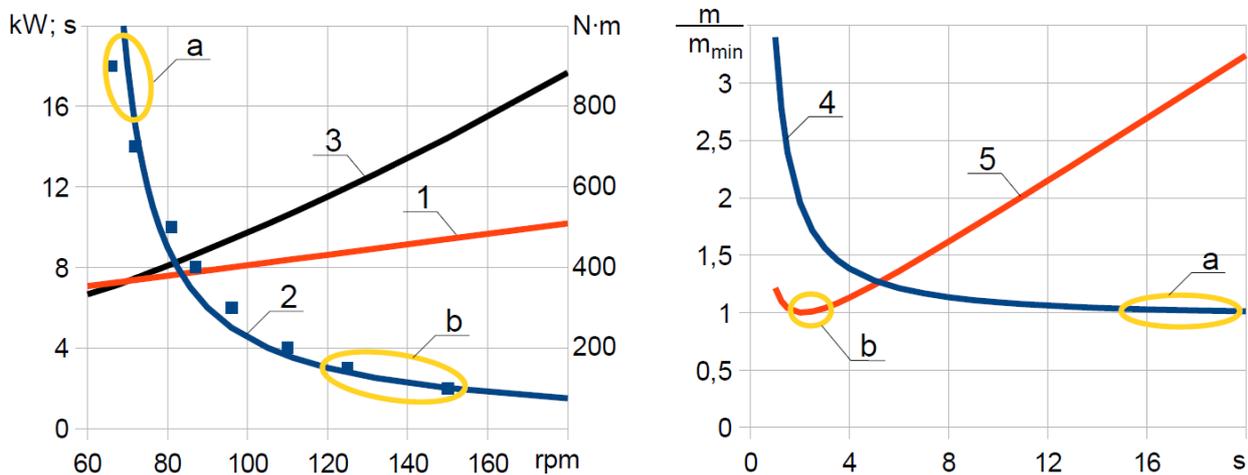


Рисунок 12. Анализ различных режимов прокрутки вала ДВС стартером:

- 1 - средний момент сопротивления вала ДВС;
- 2 - пусковая характеристика дизельного ДВС;
- 3 - средняя электрическая мощность прокрутки вала ДВС стартером;
- 4 - относительная масса свинцовой аккумуляторной батареи, необходимая для прокрутки;
- 5 - относительная масса суперконденсатора, необходимая для прокрутки;
- a - оптимальный режим при питании стартера от свинцовой аккумуляторной батареи;
- b - оптимальный режим при питании стартера от суперконденсатора.

Зная зависимость момента M сопротивления от частоты n вращения и технические характеристики стартера, можно найти мощность P_{st} потерь в стартере и электрическую мощность P_e прокрутки (кривая 3 на рис. 12):

$$P_e = 2\pi \cdot M \cdot n / 60 + P_{st}. \quad (13)$$

Сравним энергоэффективность различных режимов прокрутки, которую определим как достижение полезного эффекта (пуска ДВС) при наименьших затратах энергетических ресурсов. Энергетическими ресурсами в данном случае являются накопители энергии; затраты энергетических ресурсов выразим в виде их массы, исходя из которой легко получить остальные параметры накопителей (стоимость, объем, энергоёмкость, мощность).

Режимы прокрутки различаются частотами вращения. В процессе прокрутки происходит разряд накопителя (длительность разряда T приравняем к длительности прокрутки t_{cr}). Для каждой частоты n вращения из уравнений (12), (13) найдем энергоотдачу накопителя, требующуюся для прокрутки ДВС:

$$Q_{cr} = P_e \cdot t_{cr}. \quad (14)$$

Воспользовавшись формулой удельной энергоотдачи (4) найдем массу накопителя,

требующуюся для прокрутки ДВС:

$$m = Q_{cr}/SQ \quad (15)$$

Если в качестве накопителя энергии используется свинцовая аккумуляторная батарея, то расчет по приведенной выше методике показывает, что её масса m_{min} должна составлять по меньшей мере 42kg (для прокрутки дизеля КамАЗ-740 с частотой вращения 70rpm в течение 15÷20s — см. рис. 12, зона а). Данный расчет справедлив для новой батареи, заряженной на 100% с температурой электролита -20°C . По требованиям стандарта [6] температура электролита может быть понижена до -35°C , степень заряженности — до 75%; кроме того, батарея может быть не новой. С учетом соответствующих поправочных коэффициентов фактическая масса свинцовой батареи составит около 100kg.

Если в качестве накопителя энергии используется суперконденсатор, то расчет по приведенной выше методике показывает, что его масса m_{min} должна составлять по меньшей мере 2,5kg (для прокрутки дизеля КамАЗ-740 с частотой вращения 120÷150rpm в течение 2÷3s — см. рис. 12, зона б). Фактическая масса пускового бустера будет приблизительно втрое больше: с учетом массы корпуса, DC/DC преобразователя и элементов конструкции.

Резюме: Повышение энергоэффективности систем электростартерного пуска ДВС с использованием различных накопителей энергии необходимо осуществлять различными путями:

- для минимизации свинцовой батареи следует выбрать режим прокрутки, характеризующийся невысокой частотой вращения коленчатого вала и максимальной длительностью;
- для минимизации суперконденсатора следует выбрать режим прокрутки, характеризующийся высокой частотой вращения коленчатого вала, при этом оптимальная длительность прокрутки составит 2÷3s;
- для комбинированного накопителя следует выбрать промежуточный вариант.

3.2 Характеристики пускового бустера

В системах Capforce для питания электростартеров применяются комбинированные накопители энергии (аккумуляторная батарея плюс бустер, см. главу 1.3). Пусковой бустер в двухполюсном исполнении подключается к бортовой сети автомобиля параллельно (рис. 13) и не требует её изменений.

Техническими характеристиками пускового бустера являются:

- Вольт-Амперная характеристика и алгоритм управления её параметрами;
- энергоемкость E и длительность τ в формуле энергоотдачи (3). По сути дела, формула (3) определяет «время жизни» Вольт-Амперной характеристики при разряде суперконденсатора.

Вольт-Амперная характеристика пусковых бустеров Capforce представлена на рис. 14 (значения напряжения указаны для 12 V варианта, в скобках — для 24 V варианта).

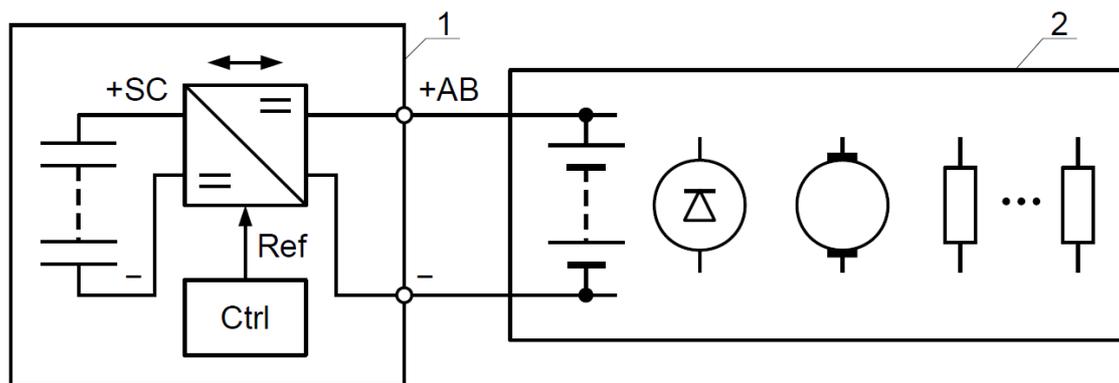


Рисунок 13. Подключение пускового бустера 1 к бортовой сети автомобиля 2

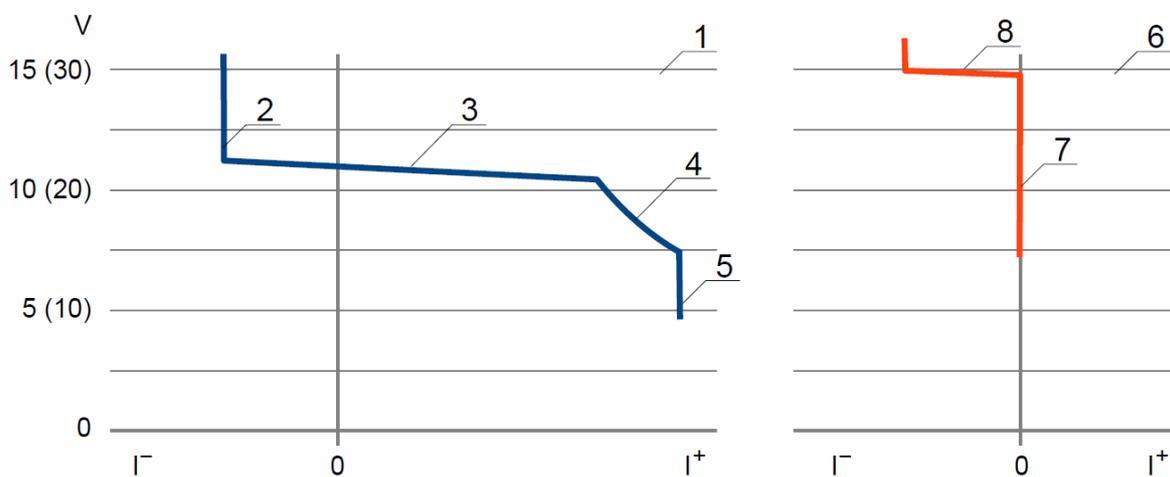


Рисунок 14. Вольт-Амперная характеристика пускового бустера:

1 - рабочий режим (2 - ограничение зарядного тока, 3 - регулирование напряжения, 4 - ограничение разрядной мощности, 5 - ограничение разрядного тока);
 6 - дежурный режим (7 - поддержание суперконденсатора в заряженном состоянии, 8 - подавление кондуктивных помех).

Параметры Вольт-Амперной характеристики задаются программно в зависимости от внешних условий [7], [8], определяются «прошивкой» бустера и допускают изменения.

Пусковой бустер может находиться в «спящем», «рабочем», или «дежурном» режимах:

- в спящем режиме бустер практически отключен от бортовой сети (потребляемый ток составляет около 1 мА);
- в рабочем режиме бустер обеспечивает регулирование напряжения на своих полюсах, ограничение разрядной мощности, зарядного и разрядного токов (их величина зависит от модели бустера);
- в дежурном режиме суперконденсатор поддерживается в заряженном состоянии,

при коммутации нагрузок бустер обеспечивает подавление выбросов напряжения (кондуктивных помех) в бортовой сети.

Выбор режима осуществляется автоматически по следующему алгоритму:

- переход в спящий режим, если в течение 10 минут напряжение в бортовой сети составляет 12 ± 1 (24 ± 2) V и не происходит включения электрических нагрузок;
- переход из спящего режима в рабочий при включении любой электрической нагрузки, вызывающей ступенчатое уменьшение напряжения в бортовой сети на $10\div 500$ mV;
- переход из рабочего режима в дежурный когда суперконденсатор бустера полностью заряжен;
- переход из дежурного режима в рабочий после включения стартера.

Работа пускового бустера:

Во время длительной стоянки автомобиля бустер выключен (находится в спящем режиме). Включение происходит автоматически после срабатывания любого элемента электрооборудования автомобиля, например, центрального замка. Затем в течение $10\div 15$ секунд происходит зарядка суперконденсатора (рабочий режим, участок 2 на рис. 13) после чего бустер готов к пуску ДВС (дежурный режим).

Зимой после длительной стоянки автомобиля пуск ДВС производится с максимальной выходной мощностью (участок 4 на рис. 14). При этом за счет совместного разряда аккумуляторной батареи и суперконденсатора обеспечивается прокрутка вала ДВС с длительностью, необходимой для надежного пуска.

При частых пусках горячего ДВС (режим СТАРТ-СТОП) прокрутка производится с постоянным выходным напряжением, близким к номинальному напряжению аккумуляторной батареи (участок 3 на рис. 14), что практически исключает её разряд.

Преимущества:

Выходная электрическая мощность бустера максимальна при отрицательных температурах окружающего воздуха, что обеспечивает надежный зимний пуск ДВС.

Бустер оптимально подходит для систем СТАРТ-СТОП автомобилей, так как обеспечивает «мягкое» включение электростартера (участок 5 на рис. 14), предотвращая динамические перегрузки и увеличивая ресурс последнего (количество включений) на порядок.

Совокупная стоимость владения системой пуска за период эксплуатации автомобиля ниже, чем при использовании традиционной аккумуляторной батареи (см. пример: Приложение 1), так как:

- бустер уменьшает критичность системы пуска к состоянию аккумуляторной батареи, что позволяет в $2\div 3$ раза сократить её массу (ёмкость) при одновременном увеличении срока службы;
- бустер не требует замены, обслуживания или ремонта в течение всего срока эксплуатации автомобиля.

3.3 Номенклатура пусковых бустеров

Таблица 2:

Модель	E, kJ	τ , s	U_r , V	I^+ , A	I^- , A	P_{max} , W	L, mm	m, kg	V_e , l	C_a , A·h
B9.0K12V	9,0	2,0	12	240	75	2160	89	3,8	2	30
B9.0K12V-A	9,0	3,0	12	240	75	1800	89	3,8	1,5	40
B13.5K12V	13,5	2,0	12	270	85	2400	89	3,8	3	30
B13.5K12V-A	13,5	3,0	12	270	85	2200	89	3,8	2,5	40
B18.0K12V	18,0	2,0	12	360	110	3200	114	4,7	4,5	40
B18.0K12V-A	18,0	3,0	12	360	110	3000	114	4,7	4	50
B21.0K24V	21,0	2,0	24	360	110	6000	137	6,0	7	40
B21.0K24V-A	21,0	3,0	24	360	110	4500	137	6,0	6	50
B31.5K24V	31,5	2,0	24	540	170	9000	166	7,4	12	60
B31.5K24V-A	31,5	3,0	24	540	170	6500	166	7,4	10,5	85
B42.0K24V	42,0	2,0	24	720	220	12000	278	11,8	16	60
B42.0K24V-A	42,0	3,0	24	720	220	8000	278	11,8	14	85

Пояснения к таблице 2:

$V_{xx.xKxxV}$ — климатическое исполнение У по стандарту [4].

$V_{xx.xKxxV-A}$ — «арктическое» исполнение УХЛ по стандарту [4].

$V_{xx.xKxxV(L)}$, $V_{xx.xKxxV-A(L)}$ — измененное расположение клемм (плюсовая слева).

Энергоотдача в соответствии с формулой (3), не менее.

E, kJ — энергоемкость в формуле (3).

τ , s — длительность полуотдачи в формуле (3).

U_r , V — номинальное напряжение.

I^+ , A — максимальный выходной (разрядный) ток.

I^- , A — максимальный зарядный ток.

P_{max} , W — максимальная выходная (разрядная) мощность.

L, mm — длина (см. рис. 15).

m, kg — масса.

V_e , l — рекомендуемый максимальный рабочий объем запускаемого дизеля (допускается увеличение на 20% для бензиновых ДВС).

C_a , A·h — рекомендуемая минимальная емкость свинцовой аккумуляторной батареи.

Категория размещения по стандарту [4] 2 (под капотом).

Рабочая температура окружающего воздуха, °C:

в исполнении У по стандарту [4] -40÷+60,

в исполнении УХЛ по стандарту [4] -60÷+60.

Режим работы по стандарту [9] кратковременный (S2).

Степень защиты по стандарту [10] IP67.

Гамма процентная наработка до отказа 1 000 000 циклов при $\gamma = 95\%$.

Техническое обслуживание и ремонт

не требуются.

Допускается параллельное соединение двух бустеров одной модели.

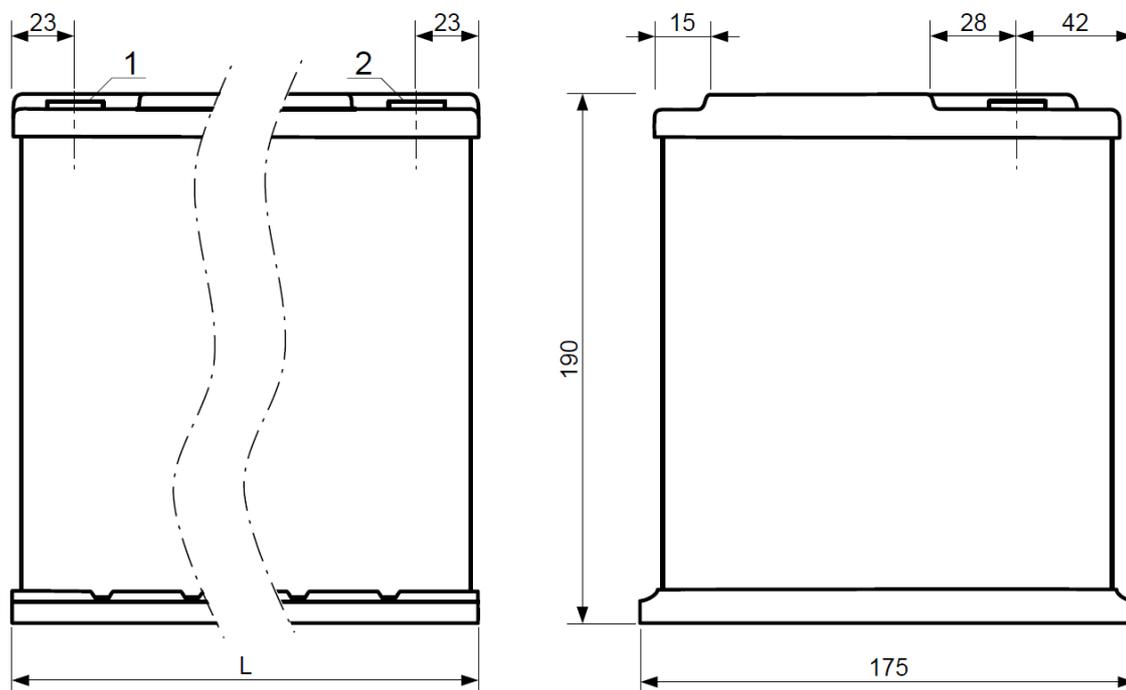


Рисунок 15. Внешний вид и размеры (мм) пусковых бустеров:

1 - минусовая клемма (резьбовое отв. Ø8мм); 2 - плюсовая клемма (резьбовое отв. Ø10мм).

Осциллограммы пуска ДВС с использованием бустеров см. в Приложениях 2, 3.

3.4 Пусковая батарея Capforce

Логичным развитием описанной выше технологии электростартерного пуска ДВС является объединение пускового бустера с LFP аккумуляторной батареей в общем корпусе. Такое устройство — пусковая батарея Capforce — лишено многих недостатков, присущих традиционным свинцовым аккумуляторным батареям.

Структурная схема батареи Capforce (рис. 16) содержит дополнительные средства, расширяющие её функциональные возможности:

- MOSFET выключатель 4 и токоограничивающий резистор 5 служат для предотвращения глубокого разряда и для точной регулировки зарядного напряжения/тока;
- электрический подогреватель 6, благодаря небольшой массе LFP ячеек, позволяет зимой достаточно быстро повысить их температуру до уровня, обеспечивающего полноценную зарядку от генератора автомобиля;
- система BMS 3 обеспечивает балансировку напряжения ячеек LFP аккумуляторной батареи при её зарядке, а также управление MOSFET выключателем и электрическим подогревателем.

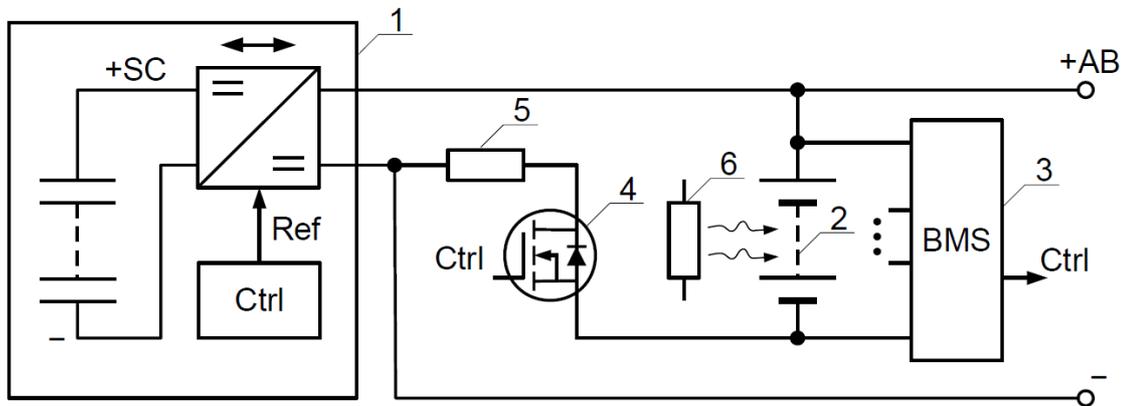


Рисунок 16. Структурная схема батареи Capforce:

1 - пусковой бустер; 2 - LFP аккумуляторная батарея;

3 - система балансировки напряжения ячеек LFP аккумуляторной батареи;

4 - MOSFET выключатель; 5 - токоограничивающий резистор;

6 - электрический подогреватель.

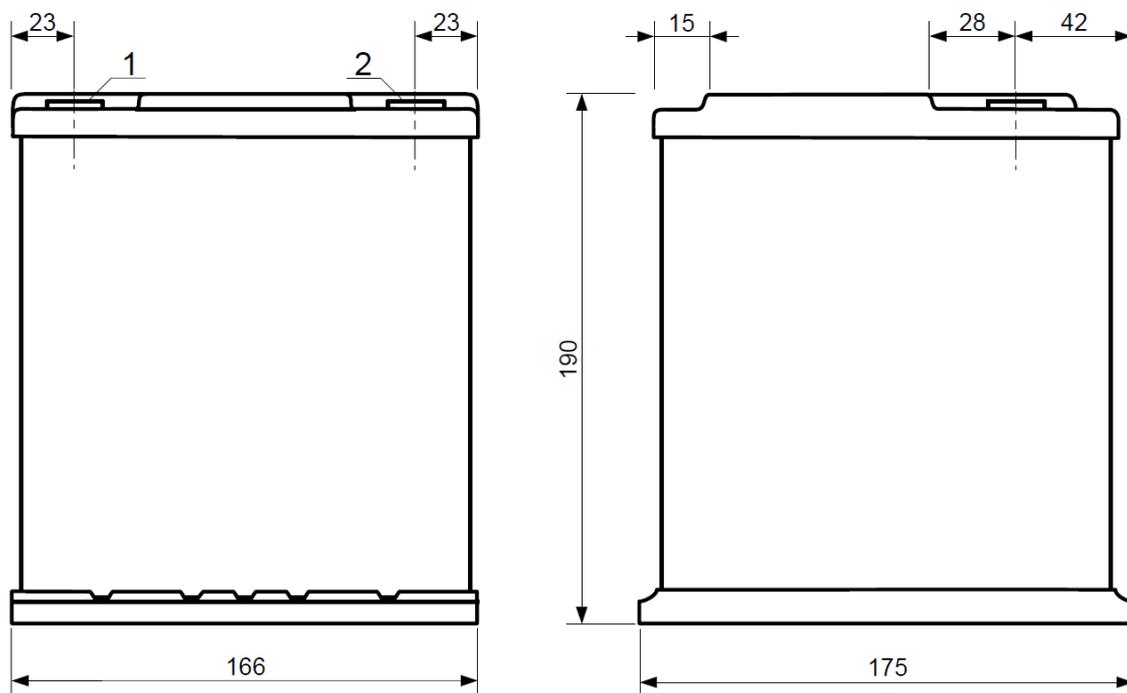


Рисунок 17. Внешний вид и размеры (мм) батареи Capforce A640K12.8V:

1 - минусовая клемма (резьбовое отв. Ø8мм); 2 - плюсовая клемма (резьбовое отв. Ø10мм);
для A640K12.8V(L) — расположение клемм изменено (плюсовая слева).

Технические характеристики:

Масса, kg	7,3.
Габаритные размеры, mm	в соответствии с рис. 17.
Категория размещения по стандарту [4]	2 (под капотом).
Рабочая температура окружающего воздуха, °C:	-35÷+60.
Степень защиты по стандарту [10]	IP67.
Номинальное напряжение, V	12,8.
Энергоотдача, kJ (рис. 18)	$622 \cdot T / (T + 1000) + 18 \cdot T / (T + 1,8)$.
Ток включения стартера, A (не более)	610.
Ток прокрутки, A (при напряжении 9V)	570±20.
Срок службы	15 лет.
Техническое обслуживание и ремонт	не требуются.

Допускается параллельное соединение батареи Carforce с 12V свинцовыми автомобильными батареями.

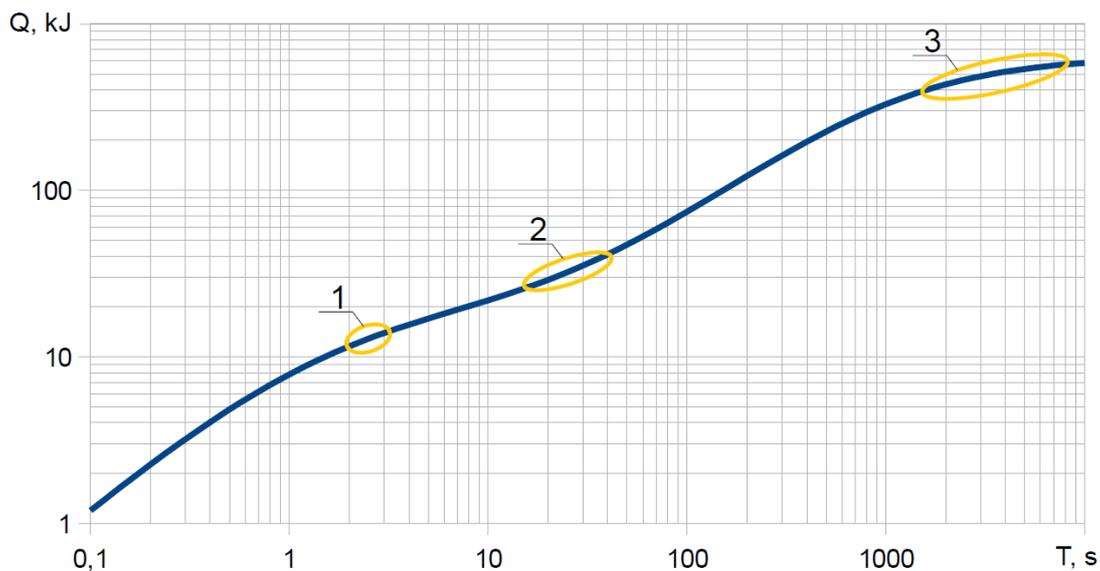


Рисунок 18. Энергоотдача батареи Carforce A640K12.8V: 1 - при пуске ДВС; 2 - при электроснабжении во время кратковременных остановок ДВС (СТАРТ-СТОП); 3 - при электроснабжении во время длительных остановок ДВС.

3.5 Сравнение батарей Carforce и AGM.

Батарея Carforce A640K12.8V может использоваться взамен автомобильных свинцовых батарей типа AGM, которые в настоящее время считаются наиболее подходящими для систем СТАРТ-СТОП. Для сравнения возьмем аккумуляторную батарею AGM 570 01 [11].

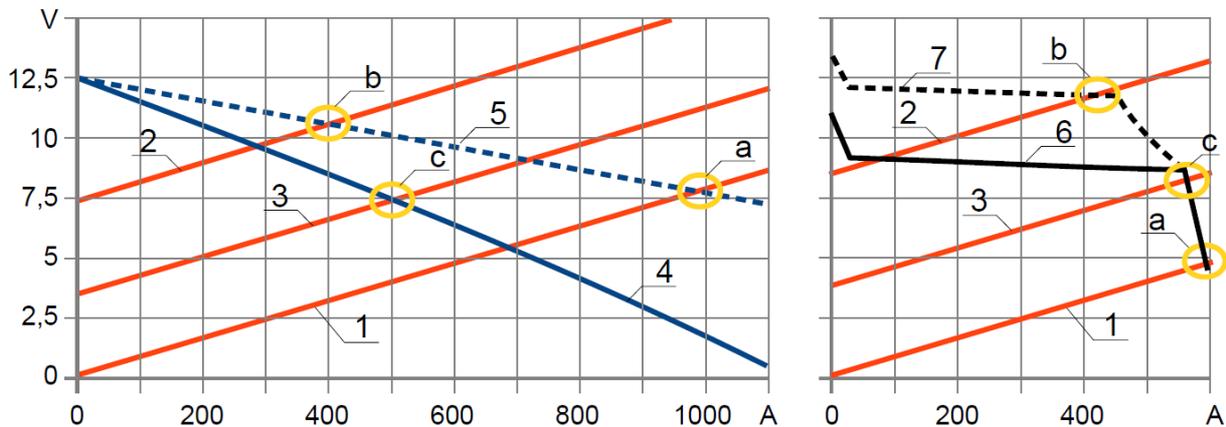
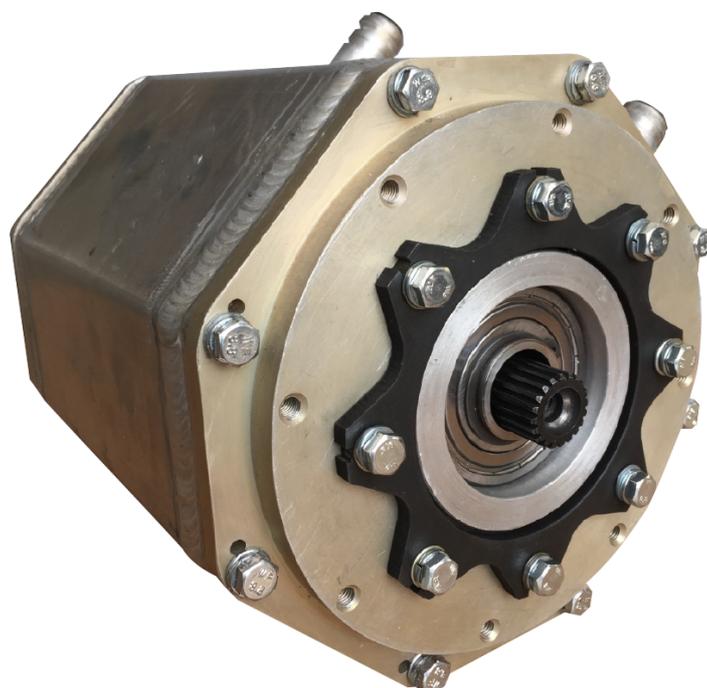


Рисунок 19. Вольт-Амперные характеристики: 1 - стартера в состоянии покоя; 2 - стартера в режиме прокрутки горячего ДВС; 3 - стартера в режиме прокрутки холодного ДВС; 4 - батареи AGM при -30°C ; 5 - батареи AGM при $+25^{\circ}\text{C}$; 6 - батареи Capforce при -30°C ; 7 - батареи Capforce при $+25^{\circ}\text{C}$; Зоны: а - максимального пикового тока в момент включения стартера; б - прокрутки горячего ДВС; с - прокрутки холодного ДВС.

AGM 570 01	Capforce A640K12.8V
Пусковые качества	
<p>На рис. 19 представлены Вольт-Амперные характеристики стартера и батарей. Пересечение этих характеристик позволяет найти напряжение и ток стартера в различных фазах пуска ДВС:</p>	
<p>Пиковый ток в момент включения стартера при положительных температурах достигает 1000А. Это влечет за собой механические ударные перегрузки и ухудшает условия работы щеточно-коллекторного узла стартера. В конечном итоге приходится идти на увеличение стартера (его веса и стоимости) для того, чтобы обеспечить достаточный ресурс работы при частых пусках ДВС в режиме СТАРТ-СТОП.</p>	<p>Благодаря нелинейной Вольт-Амперной характеристике пиковый ток стартера не превышает 610 А. Это облегчает режим работы стартера и позволяет уменьшить его вес и стоимость.</p>
<p>Внутреннее сопротивление батареи сильно зависит от температуры электролита. Для пуска ДВС зимой требуется увеличение выходной мощности батареи, но происходит наоборот.</p>	<p>Максимальная выходная мощность батареи стабильна в рабочем диапазоне температур (при прокрутке холодного ДВС на 25% выше, чем у полностью заряженного AGM).</p>

AGM 570 01	Capforce A640K12.8V
Реальная располагаемая емкость На первый взгляд Capforce (640kJ↔14A·h) проигрывает AGM (70A·h) в пять раз, но «в действительности всё выглядит иначе, чем на самом деле» (С.Е. Лец):	
Согласно стандарту [6] температура электролита аккумуляторной батареи может опускаться до -35°C , то есть, для предотвращения замерзания плотность электролита (приведенная к $+25^{\circ}\text{C}$) должна составлять не менее, чем 1,22г/сс. Это соответствует остаточной емкости 70%: $C_{\min} = 49\text{A}\cdot\text{h}$.	В соответствии с руководством [1] LFP аккумулятор при -35°C допускается разряжать до остаточной емкости 10%: $C_{\min} = 1,4\text{A}\cdot\text{h}$.
При снижении температуры электролита способность батареи принимать заряд ухудшается, что приводит к снижению максимальной остаточной емкости в среднем до 85% при зимней зарядке от автомобильного генератора (см. стр 59 в книге [2]): $C_{\max} = 59,5\text{A}\cdot\text{h}$.	Благодаря наличию электрического подогревателя батарея способна заряжаться зимой от автомобильного генератора до максимальной остаточной емкости 95%: $C_{\max} = 13,3\text{A}\cdot\text{h}$.
Реальная располагаемая емкость: $C_{\text{real}} = C_{\max} - C_{\min} = 10,5\text{A}\cdot\text{h}$. Данный параметр не нормируется, так как зависит от множества факторов.	Реальная располагаемая емкость: $C_{\text{real}} = C_{\max} - C_{\min} = 11,9\text{A}\cdot\text{h}$. Нормируемый параметр.
Массо-габаритные характеристики	
L = 278mm, W = 175mm, H = 190mm	L = 166mm, W = 175mm, H = 190mm
m = 21kg	m = 7,3kg
Стоимость Стоимость батареи Capforce в условиях серийного производства будет предположительно вдвое превышать стоимость батареи AGM. С учетом того, что батарея Capforce не требует замены в течение всего срока эксплуатации автомобиля, а для батареи AGM потребуется по меньшей мере одна замена, совокупная стоимость владения будет приблизительно одинаковой.	
Экологическая безопасность	
Директива RoHS [12] относит свинец к опасным веществам.	Батарея не содержит свинца.

Резюме: Батарея Capforce ни в чем не уступает батарее AGM, а по большинству характеристик является предпочтительной.



4.1 Энергоэффективность силовых установок

Энергоэффективность силовых установок определим как отношение полезного эффекта (100km пробега автомобиля) к затратам энергоресурсов. Таковыми являются: для бензинового двигателя — топливо, для электрической силовой установки — электроэнергия и средства её хранения (накопители энергии). На рис. 20 представлены графики затрат энергоресурсов в легковом автомобиле с различными силовыми установками.

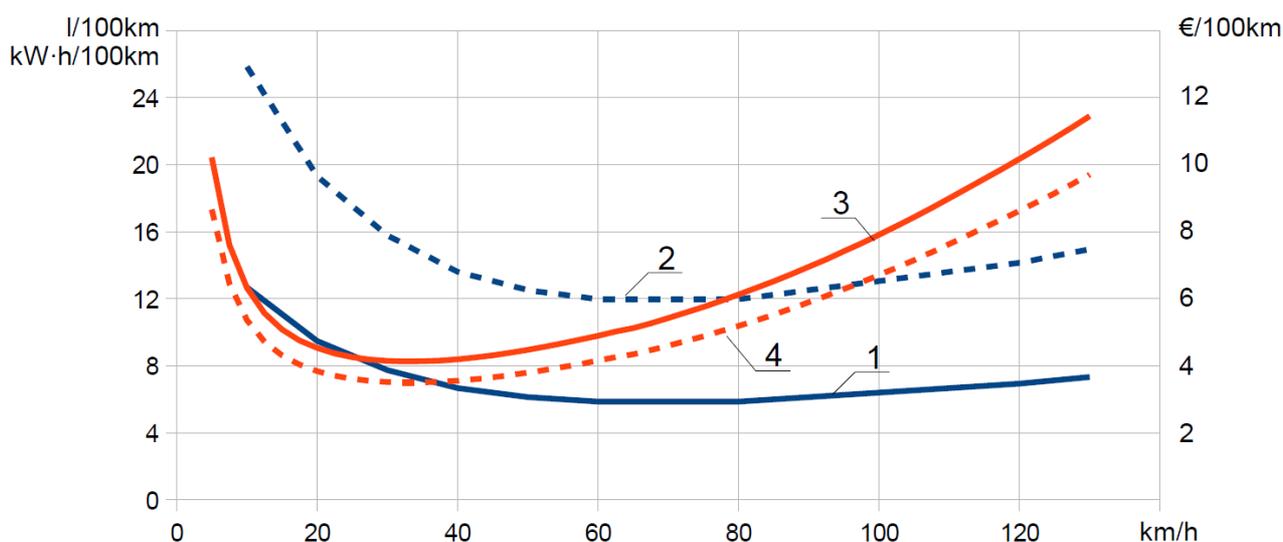


Рисунок 20. Затраты энергоресурсов в легковом автомобиле (постоянная скорость):
 1 - расход бензина (Euro 95) на 100 км пробега; 2 - стоимость бензина (€) на 100 км пробега;
 3 - расход электроэнергии на 100 км пробега; 4 - стоимость электроэнергии и амортизации аккумуляторной батареи (€) на 100 км пробега.

Графики соответствуют движению автомобиля с постоянной скоростью по ровной дороге с качественным покрытием. Масса автомобиля $m = 1300\text{kg}$; эффективная площадь аэродинамического сопротивления $S_a = 0,66\text{m}^2$; средняя мощность, потребляемая вспомогательным оборудованием (освещение, климат-контроль и др.), — 600W.

Кривая 1 расхода бензина в двигателе с рабочим объемом 1,4l взята из статьи [13]. Кривая 3 расхода энергии электрической силовой установкой получена расчетным путем (для EV58kW, см. главу 4.5). Среднемировые стоимости бензина Euro 95 (1,020€/l) и электроэнергии (0,104€/kW·h) взяты с сайта [14] по состоянию на август 2021г. Средняя стоимость аккумуляторной батареи на каждый kW·h емкости принята равной 320€ по данным [15]. Амортизационные затраты (0,320€/kW·h) на LFP аккумуляторную батарею приняты из расчета [1]: ресурс батареи — 2000 зарядно-разрядных циклов глубиной 80%—20%; снижение емкости за время эксплуатации батареи — 20%.

Как видно из графиков, наилучшая энергоэффективность достигается при

следующих скоростях движения автомобиля:

- от 50km/h до 100km/h — для силовой установки с ДВС (кривая 1 на рис. 20);
- от 20km/h до 50km/h — для электрической силовой установки (кривая 3, на рис. 20).

С целью сравнительной оценки силовых установок различного типа энергоресурсы приведены к единому показателю — стоимости в €/100km (кривые 2, 4 на рис. 20): **по энергоэффективности электрическая силовая установка выигрывает при движении автомобиля в городе** (до 80km/h). На более высоких скоростях электрическая и бензиновая установки сопоставимы по стоимости энергоресурсов и для их сравнения необходимы дополнительные критерии. В частности, массы автомобилей среднего класса (1200÷1400kg) с различными силовыми установками отличаются незначительно, если масса аккумуляторной батареи составляет около 20% от массы автомобиля. Например, LFP батарея (см. гл. 2.3.) с суммарным весом ячеек 242kg имеет энергоемкость $E = 96800\text{kJ}$ (~24kW·h в двухчасовом режиме разряда), что соответствует максимальному запасу хода 190km на скорости 80km/h (кривая 3 на рис. 20); при этом реальный запас хода приблизительно в 1,3 раза меньше: **по совокупности критериев электрическая силовая установка проигрывает ДВС в дальних поездках**. Исправление ситуации путем увеличения массы (емкости) батарей трудно отнести к хорошим решениям, так как положительный экологический эффект от исключения ДВС и сопутствующих вредных выбросов ослабляется ростом производства и переработки опасных веществ для аккумуляторов и повышенным пылеобразованием из-за износа резины и дорожного покрытия, связанного с увеличением массы автомобиля.

Технические решения Capforce для электрических силовых установок ориентированы, прежде всего, на **уменьшение массы батарей**, в частности:

- на гибридных автомобилях (HEV);
- на городских электромобилях (EV), предпочтительно беспилотных.

Преимущества такого подхода обсуждаются в главе 4.5.

В реальных условиях движения расход электроэнергии существенно отличается от представленного на рис. 20, так как при разгоне/торможении автомобиля возникают дополнительные затраты энергии. На рис. 21 показан график движения, соответствующий процедуре [16]. Фазы Low+Medium соответствуют городскому циклу движения, фазы Low+Medium+High+Extra High — смешанному. В нижней части рисунка приведена соответствующая суммарная мощность на осях ведущих колес:

- статическая (трение качения, аэродинамическое сопротивление);
- динамическая (разгон/рекуперативное торможение).

Как видно из рисунка, максимальная динамическая мощность существенно превышает статическую. Благодаря этому расход электроэнергии в городском цикле (при средней скорости 28km/h) составляет 11,1kW·h/100km, что заметно больше, чем при движении с постоянной скоростью (8,2kW·h/100km). Дополнительные затраты энергии возникают также при движении автомобиля по холмистой дороге.

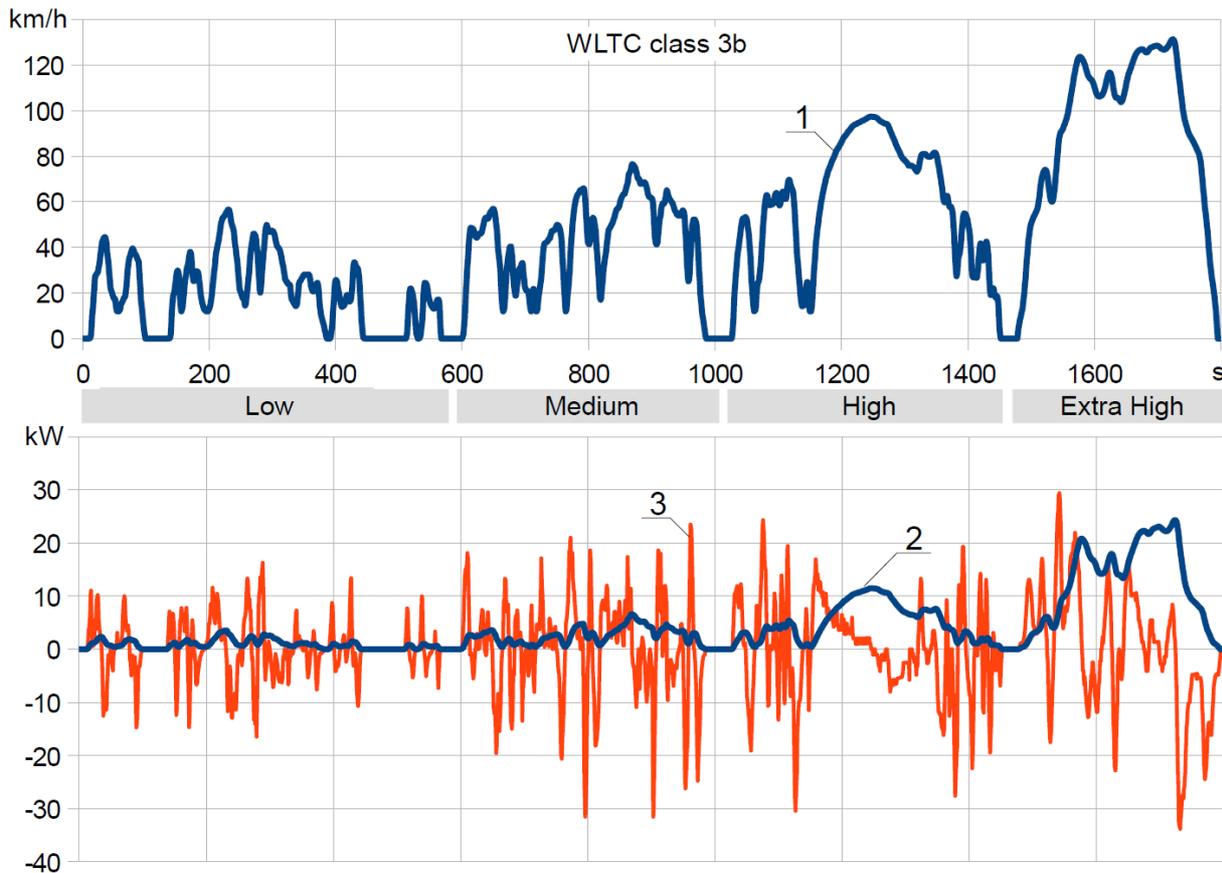


Рисунок 21: 1 - график движения легкового автомобиля; 2 - мощность преодоления сил трения качения и аэродинамического сопротивления; 3 - мощность разгона/торможения.

Механизм возникновения дополнительных затрат поясняется формулой:

$$P_{\Sigma} = m_e \cdot v \cdot dv/dt + m \cdot g \cdot dh/dt + P_{dr} + P_w, \quad (16)$$

где P_{Σ} — суммарная мощность, потребляемая силовой установкой (без учета вспомогательного оборудования), m — масса автомобиля, m_e — эквивалентная масса автомобиля с учетом инерции вращающихся частей, v , h — скорость и высота положения автомобиля, g — ускорение свободного падения, P_{dr} — мощность преодоления сил трения качения и аэродинамического сопротивления автомобиля, P_w — мощность потерь в силовой установке.

Первые два слагаемых в формуле (16) относятся, соответственно, к изменениям кинетической и потенциальной энергии автомобиля; их интегрирование в цикле (по замкнутому маршруту) не дает энергозатрат. P_{dr} — полезная мощность, затрачиваемая силовой установкой на перемещение автомобиля; её интегрирование в городском цикле показывает увеличение энергозатрат на 12% по сравнению с движением на постоянной скорости. Основное увеличение энергозатрат в городском цикле (21% и более — в зависимости от рельефа) связано с возрастанием P_w — мощности потерь в силовой установке.

Структура потерь в городском цикле движения рассматриваемого автомобиля ($m = 1300\text{kg}$, $S_a = 0,66\text{m}^2$) представлена на рис. 22. На этом же рисунке для сравнения представлены потери в случае использования батареи уменьшенной емкости.

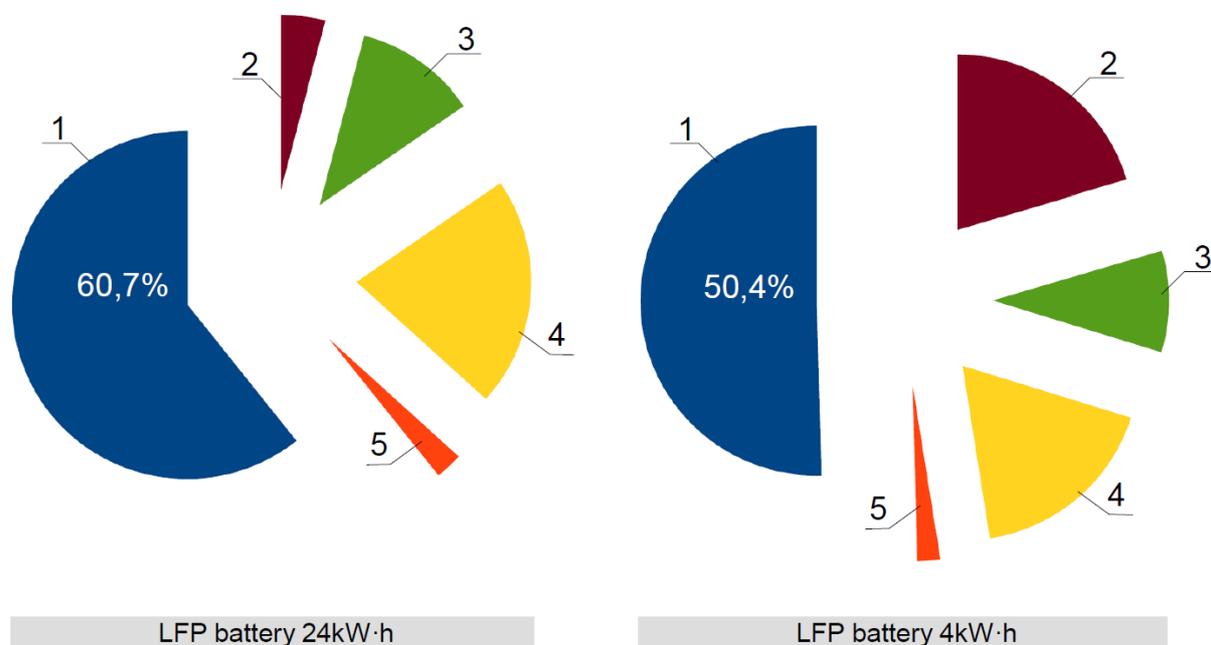


Рисунок 22. Энергозатраты электрической силовой установки в городском цикле движения автомобиля (без учета дополнительного оборудования): 1 - полезная мощность перемещения автомобиля; 2 - потери в аккумуляторной батарее; 3 - потери в DC-AC преобразователе; 4 - потери в электродвигателе; 5 - потери в коробке передач.

Как видно из рисунка, попытка уменьшения емкости аккумуляторной батареи до $4\text{kW}\cdot\text{h}$ ведет к уменьшению энергоэффективности силовой установки в 1,2 раза.

Резюме: Трудности создания электрических силовых установок малой массы связаны с потерями, возникающими при уменьшении емкости аккумуляторных батарей.

4.2 Управление разгонно-тормозным бустером

Потери энергии, связанные с уменьшением емкости аккумуляторных батарей, можно купировать за счет использования комбинированных накопителей энергии (см. параграф 1.3). В схеме силовой установки (рис. 23) применен комбинированный накопитель с трехполюсным разгонно-тормозным бустером. Суть заключается в том, что питание DC-AC преобразователя осуществляется по двум каналам:

- суперконденсатор, входящий в состав бустера, обеспечивает электроснабжение переменным (пульсирующим) током, с нулевым средним значением в цикле;

- остальную энергию выдает аккумуляторная батарея.

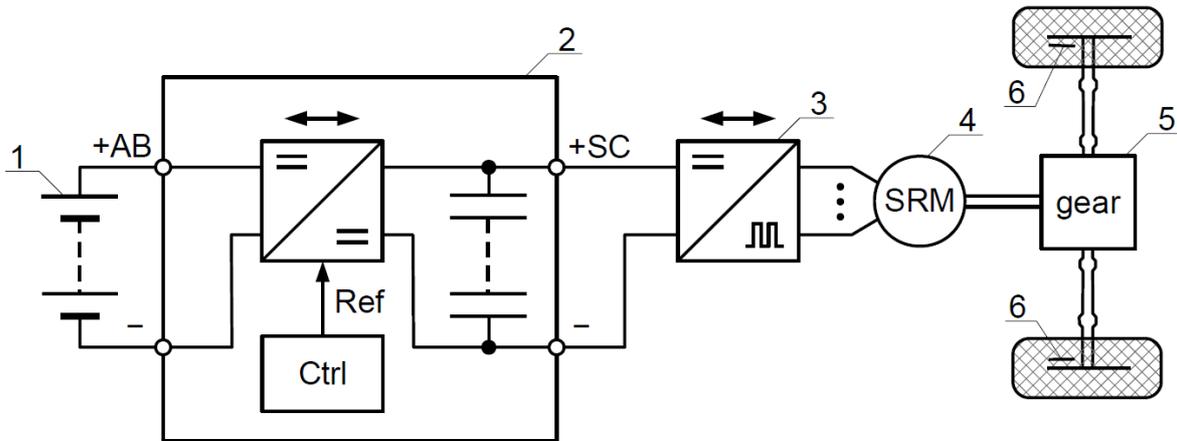


Рисунок 23. Структурная схема силовой установки с комбинированным накопителем: 1 - аккумуляторная батарея; 2 - разгонно-тормозной бустер; 3 - DC-AC преобразователь; 4 - электродвигатель; 5 - коробка передач; 6 - механические тормоза.

Выходная электрическая мощность комбинированного накопителя, измеренная на его силовых клеммах «+SC» и «-»:

$$P_{out} = P_{ab} + P_{sc} - P_{dc}, \quad (17)$$

где P_{ab} — выходная электрическая мощность аккумуляторной батареи; P_{sc} — выходная электрическая мощность суперконденсатора; P_{dc} — мощность потерь в DC-DC преобразователе, а соотношение указанных мощностей зависит от уставки Ref на управляющем входе DC-DC преобразователя.

Потери энергии в комбинированном накопителе на участке автомобильного маршрута:

$$W = W_{ab} + W_{sc} + W_{dc}, \quad (18)$$

где W_{ab} — потери энергии в аккумуляторной батарее, W_{sc} — потери энергии в суперконденсаторе, W_{dc} — потери энергии в DC-DC преобразователе. **Задача управления разгонно-тормозным бустером заключается в таком формировании уставки Ref , которое ведет к минимизации потерь W .**

Состояние разгонно-тормозного бустера определяется напряжением u_{sc} разомкнутой цепи суперконденсатора:

$$u_{min} < u_{sc} < u_{max}. \quad (19)$$

Для соблюдения условий (19) выходная мощность комбинированного накопителя (положительная и отрицательная) ограничивается DC-AC преобразователем.

Пример изменения напряжения u_{sc} представлен на рис. 24:

- на участке (а, б) автомобиль движется по ровной дороге с постоянной скоростью, но далее по маршруту находится спуск — управление разгонно-тормозным бустером заключается в предварительном уменьшении u_{sc} с целью последующей рекуперации

потенциальной энергии на участке (b, c);

- на участке (d, e) автомобиль движется по ровной дороге с постоянной скоростью, но далее по маршруту предстоит остановка на перекрестке — управление разгонно-тормозным бустером заключается в предварительном уменьшении u_{sc} с целью последующей рекуперации кинетической энергии на участке (e, f);

- в момент остановки u_{sc} будет максимально, что впоследствии позволит осуществить разгон автомобиля за счет энергии суперконденсатора.

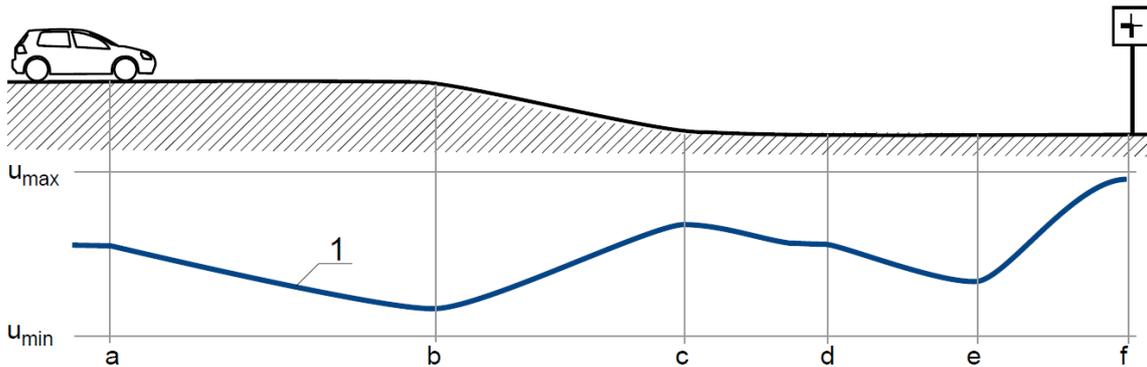


Рисунок 24. Движение автомобиля по участку маршрута (a, f): 1 - напряжение u_{sc} разомкнутой цепи суперконденсатора в процессе движения.

Таким образом, управление разгонно-тормозным бустером позволяет:

- осуществить «быструю» рекуперацию кинетической и потенциальной энергии автомобиля преимущественно в суперконденсаторе;
- «медленно» перераспределить энергию между суперконденсатором и аккумуляторной батареей;
- тем самым разгрузить аккумуляторную батарею и уменьшить потери W .

Динамическое программирование

Универсальный способ решения задачи управления разгонно-тормозным бустером основан на использовании методов динамического программирования [17].

Автомобиль должен быть оснащен средствами навигации и оценки дорожной обстановки. Способ заключается в том, что задают конечное множество U значений напряжения в диапазоне (u_{min} , u_{max}) и циклически выполняют следующие действия:

- на основе анализа данных средств навигации и оценки дорожной обстановки формируют прогноз P_f выходной электрической мощности P_{out} накопителя;
- период упреждения прогноза ($\sim 20s$) разбивают на множество интервалов времени;
- на каждом интервале времени формируют множество возможных вариантов изменения напряжения u_{sc} так, чтобы на границах интервала времени величина этого напряжения принадлежала множеству U ;
- для каждого варианта изменения напряжения u_{sc} вычисляют потери энергии w в накопителе, соответствующие выполнению прогноза P_f ;
- из множества сформированных вариантов выбирают непрерывную последовательность $u(t)$, которой в период упреждения прогноза соответствует

минимальная сумма потерь $W = \sum w$;

- формируют уставку Ref так, чтобы напряжение u_{sc} стремилось к выбранной последовательности $u(t)$.

Для минимизации расхождения между прогнозом P_f и фактической мощностью P_{out} частота повторения указанных действий должна быть как можно выше.

Способ проиллюстрирован на рис. 25.

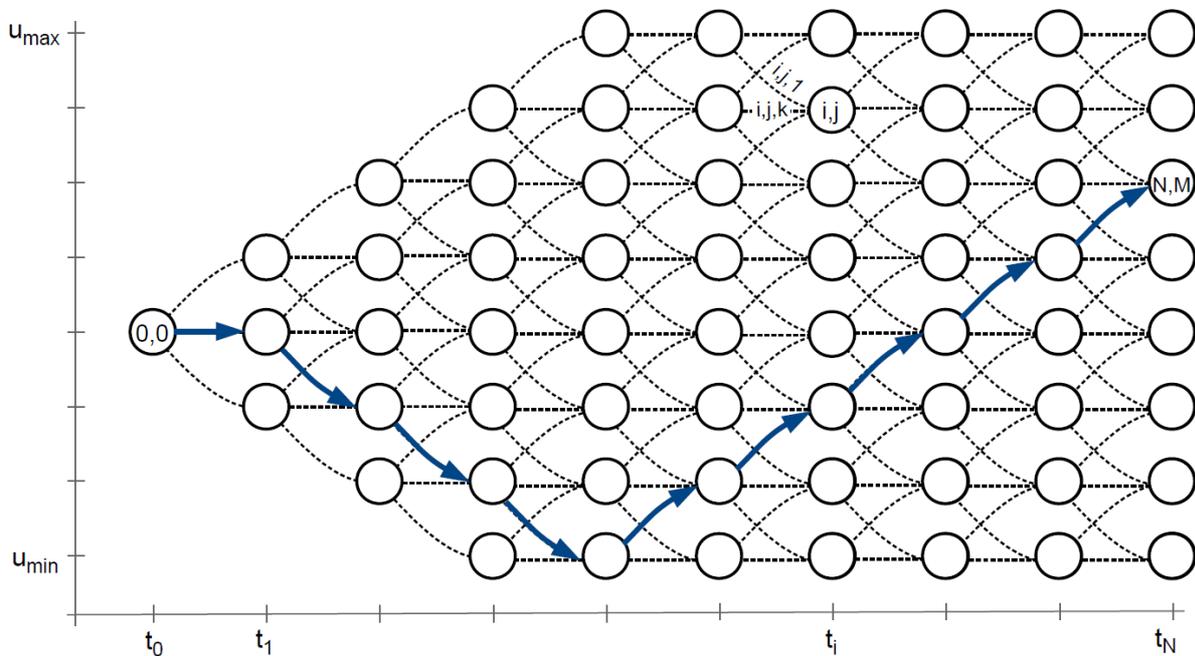
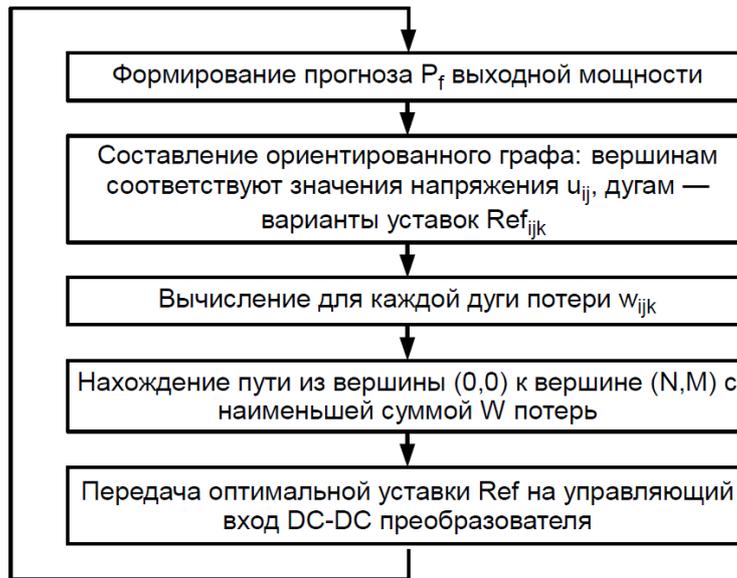


Рисунок 25. Управление разгонно-тормозным бустером на основе методов динамического программирования.

Рассмотренный способ позволяет свести задачу управления разгонно-тормозным бустером к известной задаче поиска кратчайшего пути в ориентированном ациклическом графе (см. стр. 170 в книге [18]).

Недостаток способа — необходимость достаточно точного прогнозирования выходной электрической мощности комбинированного накопителя (чем точнее прогноз, тем меньше потери в накопителе), то есть, предпочтительная область его применения — беспилотные автомобили.

Адаптивная рекуперация

Адаптивная рекуперация, по сравнению с динамическим программированием, представляет собой более грубый и простой способ управления разгонно-тормозным бустером. Он заключается в том, что уставку Ref формируют в соответствии с уравнением:

$$Ref = k \cdot (u_i(v) - u_{sc}), \quad (20)$$

где $u_i(v)$ — одна из множества убывающих функций от скорости v движения автомобиля, i — номер функции, u_{sc} — напряжение разомкнутой цепи суперконденсатора, k — коэффициент отрицательной обратной связи ($1/\Omega$), $I^- \leq Ref \leq I^+$ — накладываемые на уставку ограничения.

Способ поясняется графиками, представленными на рис. 26.

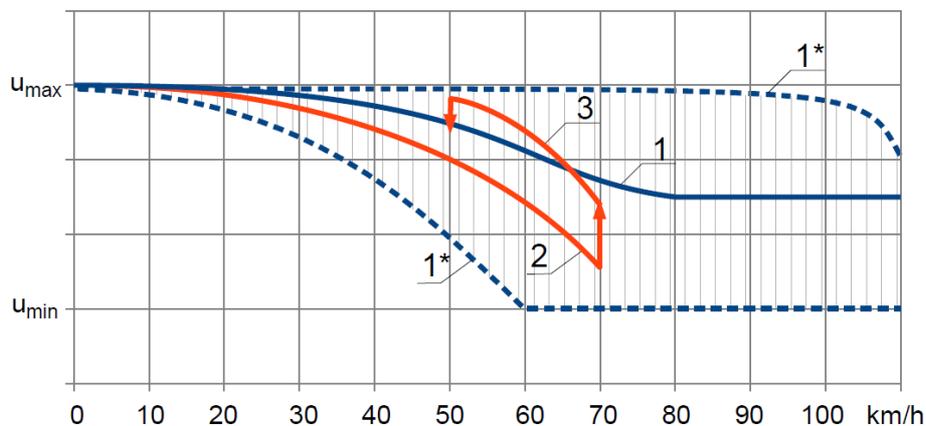


Рисунок 26: 1 - выбранная функция $u_i(v)$; 1* - границы допустимых значений функций $u_i(v)$ для различных i ; 2 - напряжение u_{sc} при разгоне автомобиля; 3 - напряжение u_{sc} при торможении автомобиля.

Уравнение (20) описывает регулятор, удерживающий напряжение u_{sc} вблизи заданного уровня $u_i(v)$. За счет того, что $u_i(v)$ является убывающей функцией от скорости движения автомобиля, обеспечивается рекуперация его кинетической энергии в некотором диапазоне скоростей. Каждая из множества функций $u_i(v)$ сформирована для определенной фазы (Low, Medium, High, Extra High), рельефа (спуск, подъем) и состояния дорожного покрытия.

Таким образом, управление разгонно-тормозным бустером сводится к выбору наиболее подходящего варианта функции $u_i(v)$ для текущих условий движения. В

простейшем случае достаточно двух вариантов («экономный» и «форсированный»), переключение между которыми может производиться как в ручном, так и в автоматическом режимах:

- вариант «экономный» является основным (соответствует графику 1 на рис. 26);
- вариант «форсированный» (соответствует верхнему графику 1* на рис. 26) включается перед ускорением автомобиля или преодолением подъема.

4.3 Номенклатура разгонно-тормозных бустеров

Таблица 3:

Модель	E, kJ	U_{ab} , V	U_{sc} , V	I_{max} , A	I_{rms} , A	L, mm	W, mm	H, mm	m, kg
B171K285V	171	52	285	360	40	440	350	200	36
B256K285V	256	52	285	540	50	440	350	240	42
B342K380V	342	52	380	540	50	535	350	240	49
B427K475V	427	52	475	540	50	630	350	240	56

Пояснения к таблице 3:

E, kJ — энергоемкость в формуле (3), при $\tau = 1,8s$.

U_{ab} , V — номинальное напряжение аккумуляторной батареи (входное).

U_{sc} , V — номинальное напряжение суперконденсатора (выходное).

I_{max} , A — максимально допустимый ток (кратковременно, 2s).

I_{rms} , A — максимально допустимый среднеквадратичный ток (длительно, при температуре охлаждающей жидкости не выше 50°C).

L, W, H, mm — размеры (см. рис. 27), не более.

m, kg — масса, не более.

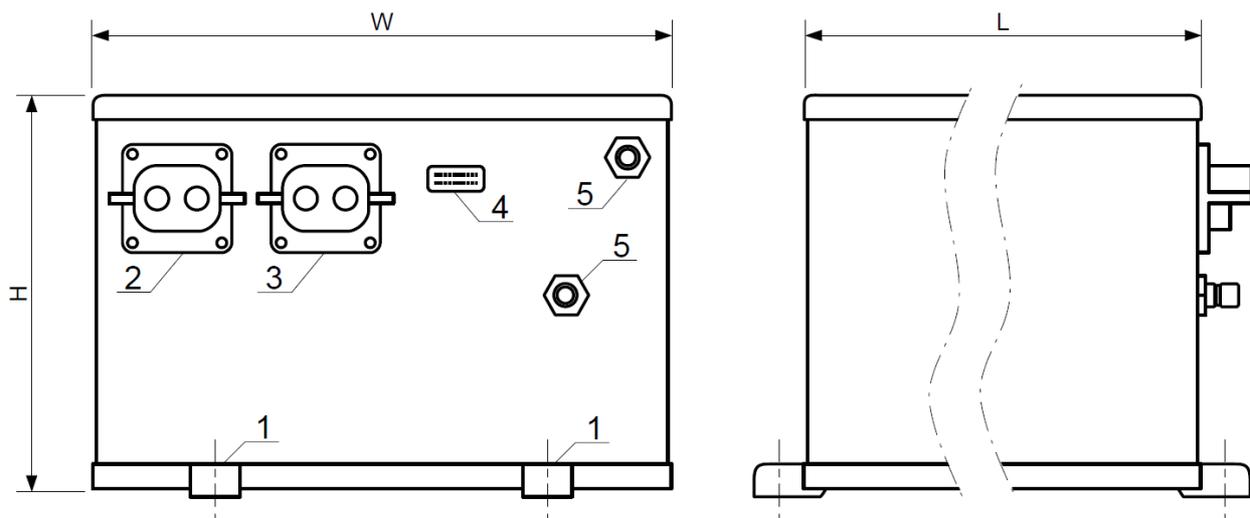


Рисунок 27. Внешний вид разгонно-тормозных бустеров: 1 - крепежные отверстия; 2 - выходной разъем («-», «+SC»); 3 - входной разъем («-», «+AB»); 4 - разъем управления; 5 - патрубki для подвода охлаждающей жидкости.

Категория размещения по стандарту [4]	2 (под капотом).
Рабочая температура окружающего воздуха, °C	-40÷+60.
Температура охлаждающей жидкости, °C	-40÷+50.
Минимальный расход охлаждающей жидкости, l/min	2.
Степень защиты по стандарту [10]	IP67.
Гамма процентный ресурс, км пробега	500 000 при $\gamma = 95\%$.
Техническое обслуживание и ремонт	не требуются.

4.4 Электродвигатели типа SRM

В электрических силовых установках транспортных машин могут применяться различные типы электродвигателей, среди них: IM — асинхронный двигатель, PM — двигатель с постоянными магнитами, SynRM — синхронный реактивный двигатель, PMSynRM — смешанный вариант. Они различаются конструкцией ротора и, как правило, имеют традиционную трехфазную обмотку статора, управляемую инвертором. Фазные токи таких двигателей являются взаимно зависимыми.

Отдельное место занимают электродвигатели типа SRM, управляемые DC-AC преобразователями с независимыми фазными токами. Недостатки и преимущества таких двигателей подробно описаны в книге [19]. Их ключевыми особенностями являются:

- очень простая конструкция статора и ротора, отсутствие дорогих материалов;
- относительно сложная схема DC-AC преобразователя.

Характеристики и стоимость SRM двигателей в значительной мере определяются DC-AC преобразователями, то есть, — силовой электроникой; её компоненты (в частности SiC транзисторы) стремительно развиваются и имеют устойчивую тенденцию к удешевлению. **Тесная связь характеристик SRM двигателей с силовой электроникой делает их наиболее перспективными в плане совершенствования и применения на транспортных машинах.**

Рис. 28 поясняет устройство и работу SRM двигателя Capforce:

- сердечник 1 статора имеет явно выраженные полюса;
- обмотки 2 сформованы из провода прямоугольного сечения и надеты на полюсные наконечники, что позволяет очень просто автоматизировать изготовление статора;
- ротор 3 представляет собой закрепленный на валу двигателя пакет пластин из электротехнической стали, он не содержит обмоток и постоянных магнитов, не требует специального охлаждения, достаточно просто балансируется и допускает высокую скорость вращения;
- четырехфазная схема позволяет (при определенном алгоритме управления током фаз) минимизировать пульсации крутящего момента;
- фазные обмотки объединены попарно (A, C и B, D), каждая пара обмоток управляется схемой DC-AC преобразователя, содержащей полумост на SiC транзисторах 4 и два разнополярных чоппера на IGBT транзисторах 5;
- все элементы (статор, ротор, DC-AC преобразователь) размещены в общем корпусе, то есть, представляют собой мехатронный модуль.

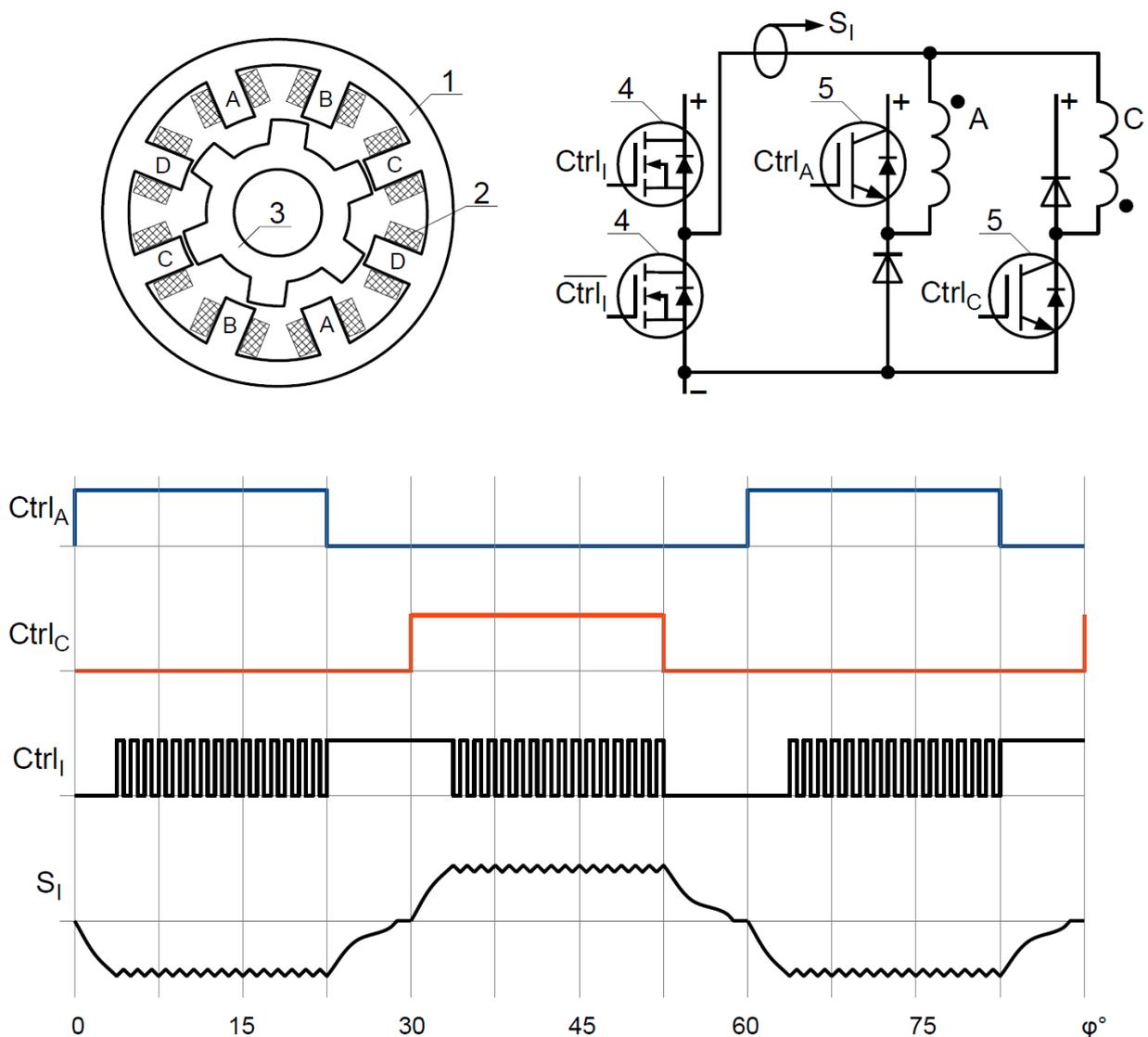


Рисунок 28. Четырехфазный SRM двигатель Capforce: 1 - сердечник статора; 2 - фазные обмотки; 3 - ротор; 4 - SiC транзисторы; 5 - IGBT транзисторы; $Ctrl_A$, $Ctrl_C$ - сигналы управления коммутацией фазных обмоток; $Ctrl_I$ - сигнал регулирования тока фазных обмоток; S_1 - выходной сигнал датчика тока фазных обмоток.

Предложенная гибридная схема четырехфазного DC-AC преобразователя с использованием транзисторов различного типа (SiC и IGBT) позволяет минимизировать стоимость: высокочастотные дорогостоящие SiC транзисторы регулируют ток фазных обмоток; низкочастотные недорогие IGBT транзисторы обеспечивают коммутацию фазных обмоток в зависимости от положения ротора. По стоимости такая схема сопоставима с традиционной схемой трехфазного инвертора на SiC транзисторах, что делает её конкурентоспособной.

На рис. 29 представлены внешний вид и размеры двигателей Capforce M33K400V и M41K500V.

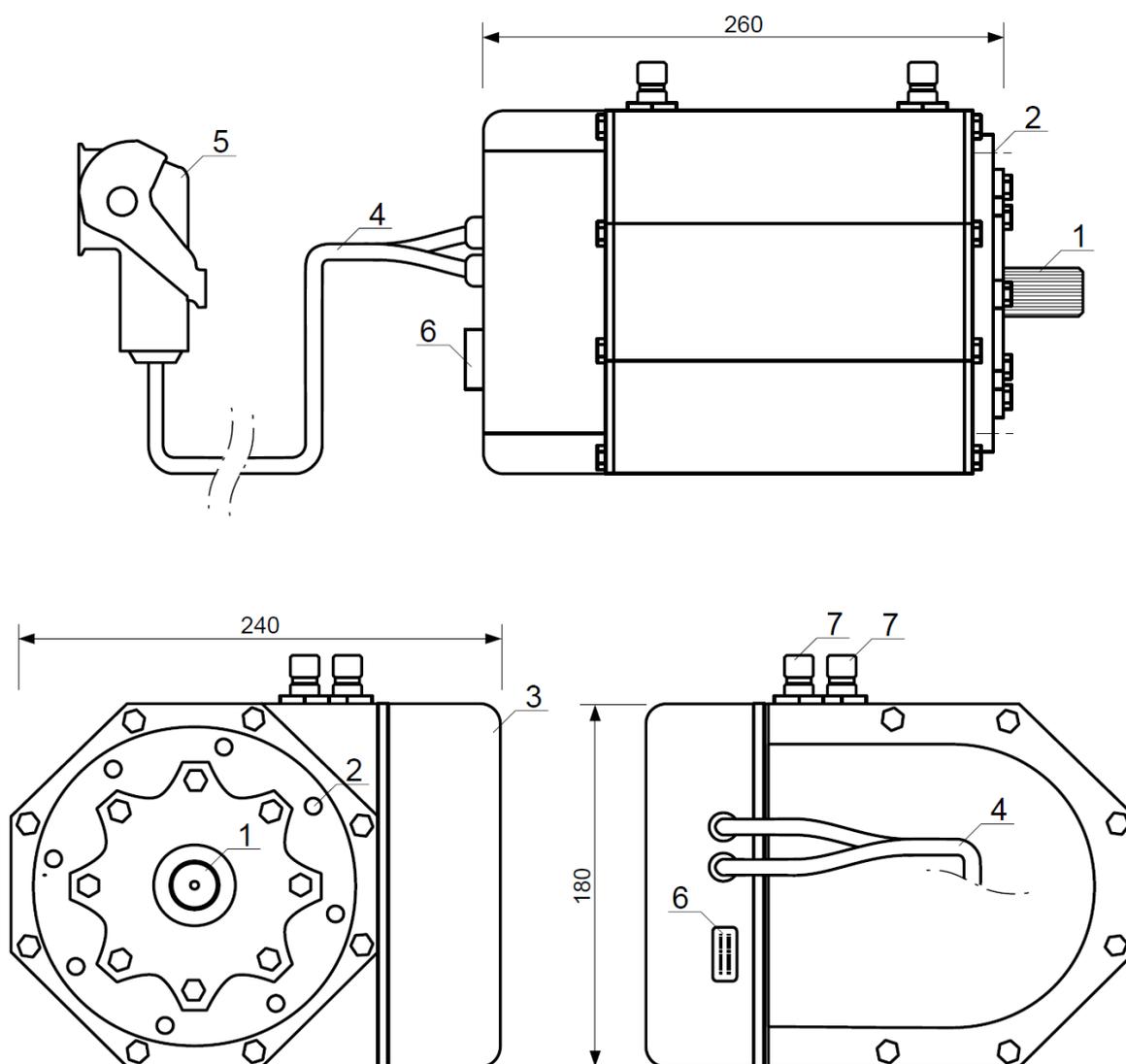


Рисунок 29. Внешний вид и размеры (мм) двигателей Capforce: 1 - вал; 2 - крепежные отверстия; 3 - DC-AC преобразователь; 4 - кабель питания; 5 - вилка для подключения питающего напряжения; 6 - разъем управления; 7 - патрубки для подвода охлаждающей жидкости.

Характеристики двигателей:

Категория размещения по стандарту [4]	2 (под капотом).
Рабочая температура окружающего воздуха, °C	-40÷+60.
Температура охлаждающей жидкости, °C	-40÷+60.
Минимальный расход охлаждающей жидкости, л/мин	5.
Степень защиты по стандарту [10]	IP55.
Гамма процентный ресурс, км пробега	500 000 при $\gamma = 95\%$.
Техническое обслуживание и ремонт	не требуются.
Масса, kg, не более	31.

Максимальный крутящий момент, N·m	55.
Максимальная частота вращения, rpm:	
для M33K400V	10000;
для M41K500V	12000.
Максимальное напряжение питания, V:	
для M33K400V	400;
для M41K500V	500.
Максимальная механическая мощность, kW:	
для M33K400V	33;
для M41K500V	41.

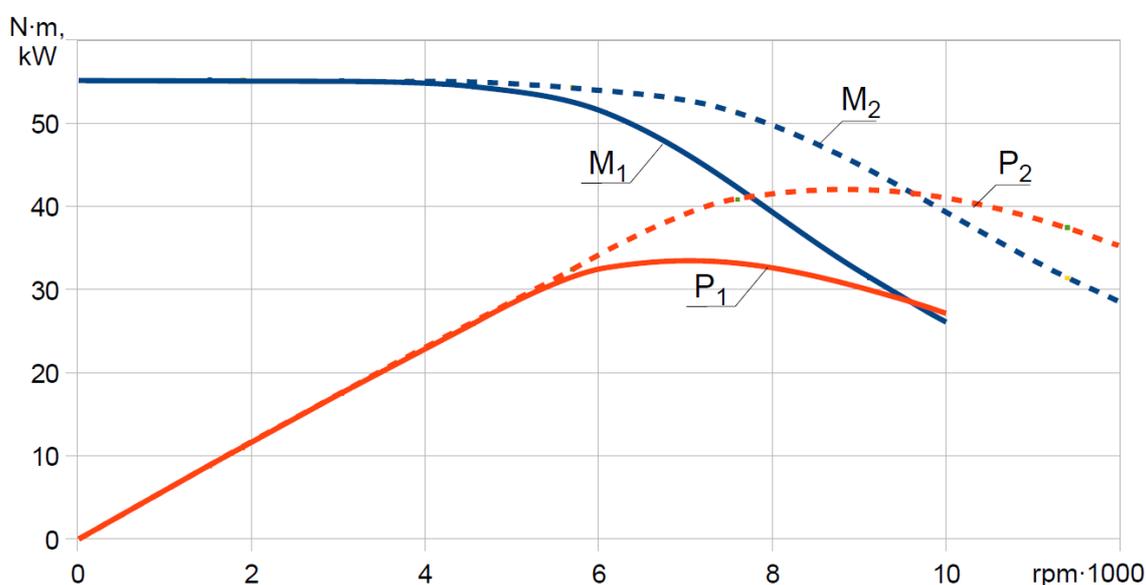


Рисунок 30. Механические характеристики в зависимости от частоты вращения (rpm): M1, M2 - максимально возможный крутящий момент (N·m) для двигателей M33K400V, M41K500V соответственно; P1, P2 - максимально возможная механическая мощность (kW) для двигателей M33K400V, M41K500V соответственно.

Таблица 4: Коэффициент полезного действия двигателей (включая DC-AC преобразователь) в зависимости от частоты вращения (rpm) и крутящего момента (N·m).

	1000rpm	2000rpm	4000rpm	6000rpm	8000rpm	10000rpm	12000rpm
5N·m	64,5%	75,7%	83,0%	85,7%	87,1%	88,0%	88,6%
10N·m	68,0%	78,6%	85,2%	87,7%	88,9%	89,7%	90,3%
20N·m	69,0%	80,3%	87,4%	90,1%	91,5%	92,3%	92,9%
30N·m	67,5%	79,6%	87,4%	90,4%	91,9%	92,9%	93,6%
40N·m	65,5%	78,4%	87,0%	90,3%	92,0%	93,1%	
50N·m	63,4%	77,0%	86,3%	89,9%	91,9%		

4.5 Варианты силовых установок*

*Примечание: представленные в этой главе технические решения проверены путем компьютерного моделирования; прототипы и результаты натурных испытаний на момент написания данного обзора отсутствуют.

Продуктовая линейка Capforce (накопительные ячейки, бустеры, двигатели) ориентирована на создание электрических силовых установок, характеризующихся минимальной массой и стоимостью. На рис. 31 предложены варианты автомобилей с такими силовыми установками.

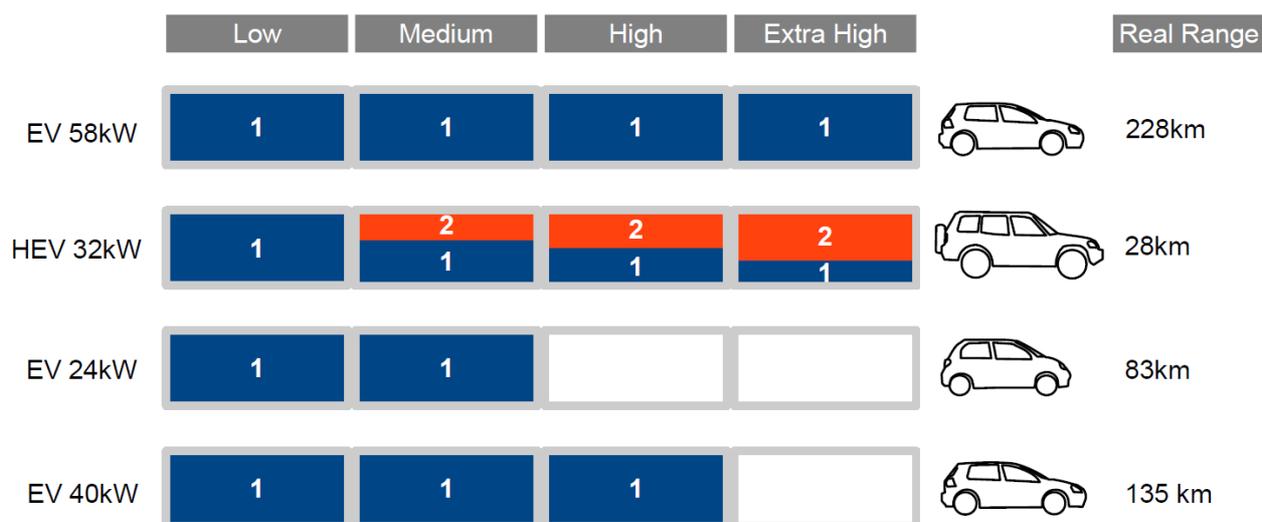


Рисунок 31. Варианты автомобилей: EV - городские электромобили; HEV - гибрид. Распределение мощности в различных фазах WLTC: 1 - мощность электродвигателя; 2 - мощность ДВС. Глубина разряда батареи при расчете запаса хода: 90%.

EV 58kW (традиционный вариант)

Компоновка на автомобиле и структурная схема силовой установки EV 58kW (рис. 32) являются достаточно распространенными:

- высоковольтная аккумуляторная батарея с жидкостной термостабилизацией расположена стационарно в донной части корпуса автомобиля;
- два электродвигателя служат, соответственно, для привода передней и задней колесных пар.

Отличительные особенности и преимущества:

- аккумуляторная батарея собрана из LFP ячеек с ультранизким тепловым сопротивлением (см. главу 2.3), что позволяет в экстренных случаях сократить длительность зарядки до 15 минут, температурный рабочий диапазон таких ячеек максимально широк (от -40°C до $+60^{\circ}\text{C}$);
- электродвигатели и коробки передач для передней и задней колесных пар унифицированы;
- электродвигатели (см. главу 4.4) имеют предельно простую конструкцию;

- коробки передач автоматические, двухступенчатые, что повышает энергоэффективность в городском цикле на 9%, так как смещает область работы двигателей в правую часть таблицы 4.

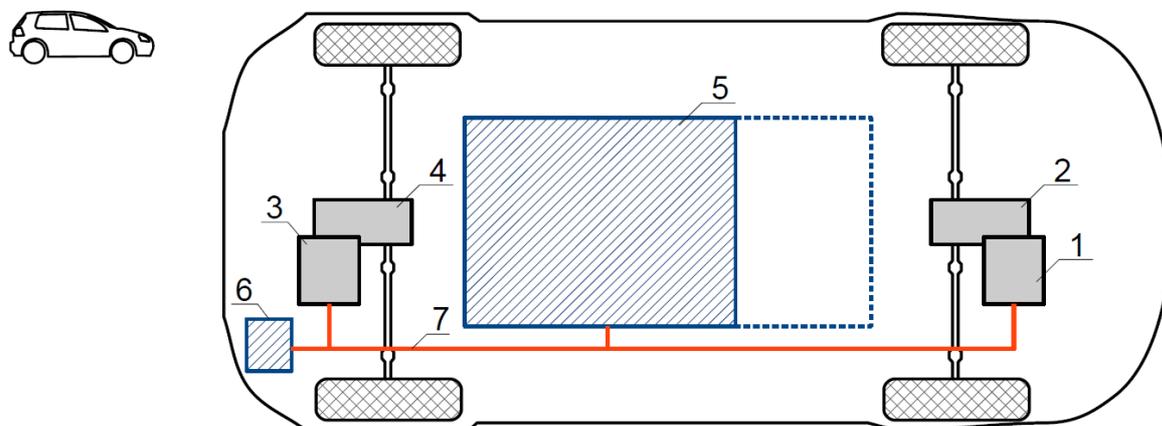


Рисунок 32. Компоновка и структурная схема силовой установки EV 58kW:

1 - электродвигатель передней колесной пары; 2 - коробка передач передней колесной пары; 3 - электродвигатель задней колесной пары; 4 - коробка передач задней колесной пары; 5 - аккумуляторная батарея; 6 - зарядное устройство; 7 - высоковольтный кабель.

Таблица 5: Характеристики автомобилей с электрической силовой установкой EV 58kW

	Исполнение 1	Исполнение 2
Энергоемкость батареи, kJ (kW·h)*	96800 (24)	145200 (36)
Схема соединения ячеек C440K3.2V в батарее	110S2P	110S3P
Суммарная масса ячеек C440K3.2V в батарее, kg	242	363
Номинальное напряжение батареи, V	352	352
Суммарная максимальная мощность на валу электродвигателей M33K400V, kW (HP)	58 (79)	58 (79)
Типоразмер колесных шин	165/70R14	165/70R14
Передаточное число:** - при низкой скорости (первая передача) - при высокой скорости (вторая передача)	16 8	16 8
Максимальная скорость, km/h	135	135
Расчетная масса автомобиля, kg***	1300	1420
Площадь аэродинамического сопротивления, m ²	0,66	0,66
Время разгона до 100km/h, s	13,5	15
Мощность вспомогательного оборудования, W****	600	600
Запас хода, km: - в городском цикле (Low+Medium) - в смешанном цикле (Low+Medium+High+Extra High)	193 155	280 228

Пояснения к таблице 5:

* Энергоемкость E аккумуляторной батареи, измеряемая в кДж, приведена в соответствии формулой (3); соответствующая емкость батареи, измеряемая в кВт·ч, приведена для двухчасового режима разряда током 0,5С.

** В состав автоматических коробок переключения передач входит дифференциальный механизм; передаточное число измеряется как отношение частоты вращения вала электродвигателя к частоте вращения колес при движении по прямой; порог переключения передач — 60км/ч.

*** Расчетная масса автомобиля приведена с учетом полезной нагрузки 180кг, для этого значения рассчитаны время разгона и запас хода.

**** Средняя мощность, потребляемая вспомогательным оборудованием (освещение, климат-контроль и др.) учтена при расчете запаса хода.

Существенный признак традиционного варианта — массивная аккумуляторная батарея, которая может рассматриваться как **неотъемлемая часть корпуса автомобиля**. Такой подход влечет за собой ряд трудно искореняемых недостатков, указанных ниже.

Сроки службы батареи и автомобиля должны быть приблизительно равными. Исходя из этого следует выбирать емкость батареи: 24÷36 кВт·ч, что соответствует среднему пробегу 200 000км при двух тысячах зарядно-разрядных циклов глубиной 80%—20%. Отклонение емкости от указанных значений экономически неоправданно.

Запас хода при экономически оправданной емкости батареи составляет в среднем 200км. Это соответствует режиму эксплуатации городских автомобилей индивидуальными автовладельцами. Массовое использование такого режима эксплуатации не позволяет решить две основные проблемы:

1. Низкая оборачиваемость аккумуляторов, лимитируемая сроком эксплуатации автомобиля (10÷15 лет). Чем быстрее будут поступать аккумуляторы на вторичную переработку, тем меньше потребуются ископаемых для их производства.
2. Большая площадь, занимаемая автостоянками в крупных городах (один автомобиль — два стояночных места: одно возле дома и одно возле офиса).

Более перспективными представляются варианты электрических силовых установок с небольшими легко заменяемыми батареями.

HEV 32kW (гибридный вариант)

Силовая установка HEV 32kW представлена на рис. 33. Данный вариант сочетает в себе преимущества параллельных и подзаряжаемых (Plug-in) гибридов, то есть, позволяет передвигаться в городском цикле на электрической тяге с использованием относительно небольшого низковольтного аккумулятора. Необходимые мощность и напряжение обеспечиваются разгонно-тормозным бустером (см. главу 4.2).

Широко распространенный вариант переднеприводной компоновки ДВС не требует изменений, так как электропривод находится сзади.

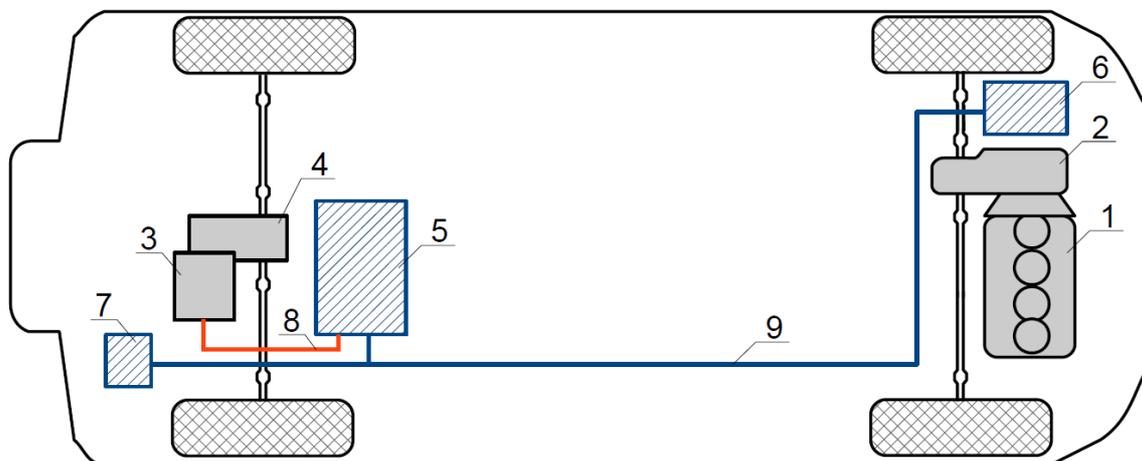


Рисунок 33. Компонка и структурная схема силовой установки HEV 32kW: 1 - ДВС; 2 - коробка передач передней колесной пары; 3 - электродвигатель задней колесной пары; 4 - коробка передач задней колесной пары; 5 - разгонно-тормозной бустер; 6 - аккумуляторная батарея; 7 - зарядное устройство; 8 - высоковольтный кабель; 9 - низковольтный кабель.

Таблица 6: Характеристики автомобиля с электрической силовой установкой HEV 32kW

Энергоемкость батареи, kW·h	4
Номинальное напряжение батареи, V	52
Масса батареи*, kg	30
Разгонно-тормозной бустер	B342K380V
Максимальная мощность на валу электродвигателя M33K400V, kW (HP)	32 (43,5)
Типоразмер колесных шин	225/65R17
Передаточное число:** - при низкой скорости (первая передача) - при высокой скорости (вторая передача)	22 8
Максимальная скорость, km/h: - с приводом только от электродвигателя - с совместным приводом от электродвигателя и ДВС	62 170
Расчетная масса автомобиля, kg***	1700
Площадь аэродинамического сопротивления, m ²	0,8
Время разгона до 50km/h на электротяге, s	10
Мощность вспомогательного оборудования, W****	600
Запас хода в городском цикле (Low) на электротяге, km:	28

Пояснения к таблице 6:

* При использовании Li-Ion батареи типа NMC;

** В состав автоматической коробки переключения передач задней колесной пары входит дифференциальный механизм; передаточное число измеряется как отношение частоты вращения вала электродвигателя к частоте вращения колес при движении по прямой; порог переключения передач — 60km/h.

*** Расчетная масса автомобиля приведена с учетом полезной нагрузки 180kg, для этого значения рассчитаны время разгона и запас хода.

**** Средняя мощность, потребляемая вспомогательным оборудованием (освещение, климат-контроль и др.) учтена при расчете запаса хода.

Рассмотренный вариант гибрида не критичен к состоянию аккумуляторной батареи — даже если она практически разряжена, трогание, разгон и рекуперативное торможение будут осуществляться за счет разгонно-тормозного бустера.

EV 24kW, EV 40kW (варианты с быстро заменяемыми батареями)

Варианты с быстро заменяемыми батареями [17] представлены на рис. 34.

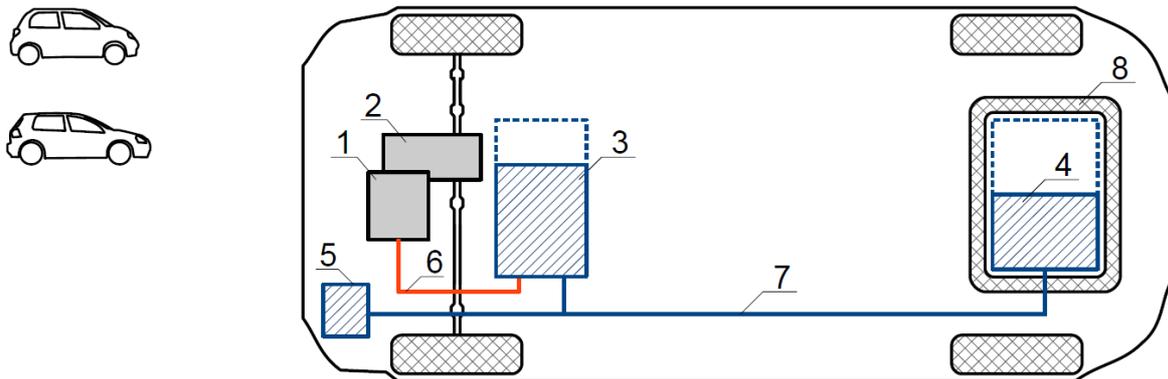


Рисунок 34. Компоновка и структурная схема силовых установок EV 24kW, EV 40kW:

1 - электродвигатель ; 2 - коробка передач; 3 - разгонно-тормозной бустер;

4 - аккумуляторная батарея; 5 - зарядное устройство; 6 - высоковольтный кабель;

7 - низковольтный кабель; 8 - теплоизоляционный отсек.

Разгонно-тормозной бустер разгружает аккумуляторную батарею, что позволяет минимизировать её размеры и массу, снизить напряжение до безопасного уровня, исключить необходимость жидкостного охлаждения. Это дает возможность оперативной замены батареи в течение 1÷2 минут в сети роботизированных пунктов.

После замены батарея имеет температуру, близкую к оптимальной. Из-за минимальных тепловых потерь температура батареи, помещенной в теплоизоляционный отсек, меняется незначительно. Это расширяет допустимый температурный диапазон эксплуатации автомобиля.

Таблица 7: Характеристики автомобилей с быстро заменяемыми батареями

Электрическая силовая установка	EV 24kW	EV 40kW
Энергоемкость батареи, kW·h*	8	8 / 16
Масса батареи, kg*	60	60 / 120
Номинальное напряжение батареи, V	52	52
Тип электродвигателя	M33K400V	M42K500V
Тип разгонно-тормозного бустера	B171K285V	B427K475V
Максимальная мощность на валу электродвигателя, kW (HP)	24 (32,5)	40 (54)
Типоразмер колесных шин	155/70R13	165/70R14
Передаточное число:** - при низкой скорости (первая передача) - при высокой скорости (вторая передача)	12 --	24 12
Максимальная скорость, km/h	80	100
Расчетная масса автомобиля, kg***	950	1200
Площадь аэродинамического сопротивления, m ²	0,66	0,66
Время разгона до 60km/h, s	12	8
Мощность вспомогательного оборудования, W****	500	600
Запас хода, km: - в городском цикле (Low+Medium) - в смешанном цикле (Low+Medium+High)	83 —	145 135

Пояснения к таблице 7:

* При использовании Li-Ion батареи типа NMC, для EV 40kW допускается использование одной либо двух батарей.

** В состав автоматической коробки переключения передач входит дифференциальный механизм; передаточное число измеряется как отношение частоты вращения вала электродвигателя к частоте вращения колес при движении по прямой; порог переключения передач — 45km/h (для EV 40kW). В силовой установке EV 24kW коробка передач одноступенчатая.

*** Расчетная масса автомобиля приведена с учетом полезной нагрузки 180kg, для этого значения рассчитаны время разгона и запас хода.

**** Средняя мощность, потребляемая вспомогательным оборудованием (освещение, климат-контроль и др.) учтена при расчете запаса хода.

Предложенные варианты наилучшим образом подходят для электромобилей (предпочтительно беспилотных), работающих в режиме городского такси, при этом:

- быстрая замена батарей уменьшает коэффициент простоя DTR (см. формулу (1));
- повышается оборачиваемость аккумуляторов, что снижает экологическую нагрузку за счет сокращения общего количества аккумуляторов, находящихся в эксплуатации;
- разгружаются городские автостоянки, так как автомобили почти постоянно находятся в движении.

Приложения

Приложение 1: Экономическое обоснование использования пускового бустера В31.5К24V на автомобилях КамАЗ.

Расчеты приведены в ценах 2021г. Ориентировочная стоимость серийного образца бустера В31.5К24V составляет 45 тыс. руб. при объеме серии от 1 тыс./год.

1. В большинстве климатических зон основная экономия будет достигнута за счет уменьшения расходов на аккумуляторные батареи: в штатном варианте для пуска дизельных ДВС с рабочим объемом 10÷14 литров используются две батареи типа 6СТ190 либо две батареи типа 12СТ85; в предлагаемом варианте с использованием бустера В31.5К24V потребуются две батареи типа 6СТ60, либо одна батарея типа 12СТ85. Стоимость и средний срок эксплуатации (* — с учетом использования бустера) некоторых типов батарей представлены в таблице:

Производитель	Тип АБ	Стоимость, руб.	Срок экспл., лет	Кол-во, шт.
Алькор (Тюмень)	6СТ190 4LA Ca+	10 980	1,5÷2	2
	6СТ60 VLA Ca/Ca	4 080	4÷5*	2*
TUBOR (Н. Новгород)	6СТ190 3VL	15 430	2,5÷3	2
	6СТ61 VL Silver	6 130	5÷6*	2
Тюменский аккумуляторный завод	12СТ85 NA	15 000	2,5÷3	2
			5÷6*	1*

Затраты на приобретение/замену батарей в течение 10 лет эксплуатации транспортной машины составляют:

- от 110 тыс. руб. до 154 тыс. руб. в штатном варианте;

- от 16 тыс. руб. до 30 тыс. руб. в предлагаемом варианте с использованием бустера В31.5К24V.

С учетом стоимости бустера:

- усреднённый экономический выигрыш за десятилетний период эксплуатации транспортной машины составит ориентировочно 64 тыс. руб.;

- срок окупаемости составит 3÷4 года.

2. В условиях крайнего севера распространена практика непрерывной работы ДВС зимой, что связано с высокой критичностью системы пуска ДВС к состоянию батарей. Обусловленные этим усредненные затраты на непроизводительный расход топлива для автомобилей КамАЗ [20] представлены в таблице:

Среднесуточный простой, час.	4	8	12
Сезонный непроизводительный расход топлива, кг.	1 800	3 600	5 400
Сезонные затраты на непроизводительный расход топлива, руб.	108 000	216 000	324 000

Использование бустера В31.5К24V позволит существенно повысить надежность зимнего пуска ДВС, в результате:

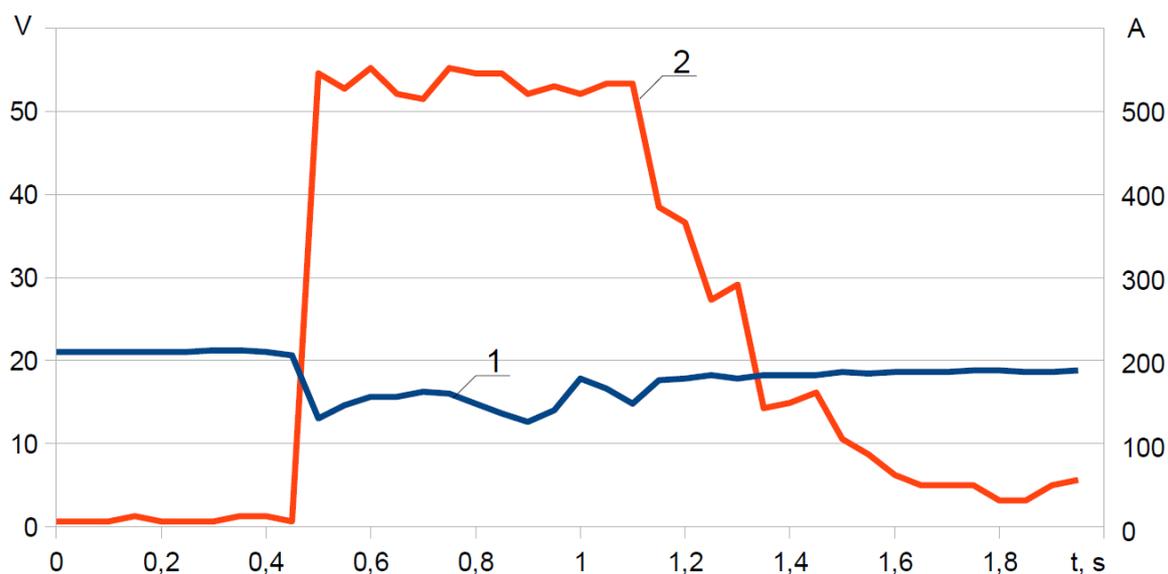
- стоимость бустера многократно окупится за один сезон (5 месяцев) зимней эксплуатации за

счет сокращения времени работы ДВС на холостом ходу;
 - повысится коэффициент технической готовности автопарка;
 - сократятся затраты на восстановление работоспособности автомобилей с использованием передвижных установок пуска ДВС.

Приложение 2: Осциллограммы зимнего пуска дизельного двигателя КамАЗ 740 ($V=10850\text{cm}^3$) с использованием бустера В31.5К24V

Условия проведения испытаний:

- г. Великий Новгород, 21 октября 2020, 08 ч 25 мин;
- до начала испытаний машина находилась 21 час в камере холода при -40°C ;
- перед пуском в течение 15 минут работал подогреватель охлаждающей жидкости двигателя, затем в течение 2 минут — электрофакельное устройство (температура масла в картере до подогрева -37°C , через 5 минут после пуска и остановки ДВС $+12^\circ\text{C}$);
- аккумуляторная батарея 85А·h, напряжение разомкнутой цепи 24,8V, внутреннее сопротивление 50mΩ.



Осциллограммы пуска дизеля $V=10850\text{cc}$ при -40°C :

1 - напряжение бортовой сети; 2 - ток бустера.

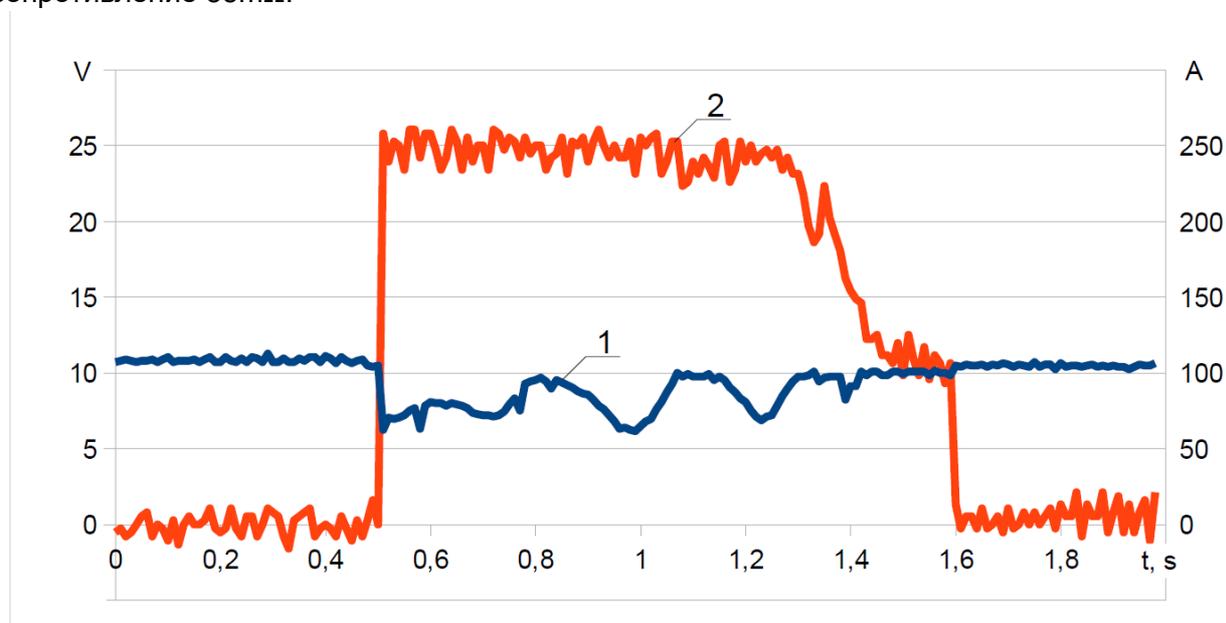
Средний потребляемый ток во время прокрутки стартера составляет 720A, в том числе ток пускового бустера 540A (75%).

Приложение 3: Осциллограммы зимнего пуска дизельного двигателя автомобиля VW GOLF 6 ($V=1968\text{cm}^3$) с использованием бустера В9.0К12V

Условия проведения испытаний:

- г. Челябинск, 19 ноября 2016, 07 ч 00 мин;
- пробег автомобиля 29000 км;
- до начала испытаний автомобиль находился на открытой стоянке 13 часов;

- температура окружающего воздуха -29°C , под капотом -26°C ;
 - аккумуляторная батарея $30\text{A}\cdot\text{h}$, напряжение разомкнутой цепи $12,2\text{V}$, внутреннее сопротивление $35\text{m}\Omega$.



Осциллограммы пуска дизеля $V=1968\text{cc}$ при -26°C :
 1 - напряжение бортовой сети; 2 - ток бустера.

Средний потребляемый ток во время прокрутки стартера составляет 355A , в том числе ток пускового бустера 240A (68%).

Перечень использованного программного обеспечения

- Apache OpenOffice 4.1.9
- Ansys Electromagnetics Suite 19.0 Maxwell 2D
- Ansys Fluent 18.1
- Matlab R2018b

Ссылки

[1] АККУМУЛЯТОРЫ ЛИТИЙ-ИОННЫЕ Серии LT-LFP. Руководство по эксплуатации LT.38294932.3482.002-2016РЭ. <https://www.liotech.ru/>

[2] Акимов С.В., Чижков Ю.П. Электрооборудование автомобилей. Учебник для ВУЗов.- М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004 - 384 с.

[3] УСТРОЙСТВО ДЛЯ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. Патенты: RU 167 451, EP 3 290 258, CN 9 875 482.

[4] ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для

различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.

[5] ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО И БАТАРЕЯ. Патент RU 2 737 037.

[6] ГОСТ Р 54120-2010. Двигатели автомобильные. ПУСКОВЫЕ КАЧЕСТВА. Технические требования.

[7] СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ МАШИНЫ. Патенты: RU 2 596 807, US 10 556 515, EP 3 321 136, CN 107 614 328.

[8] ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ ТРАНСПОРТНОЙ МАШИНЫ. Патент RU 183 969

[9] ГОСТ Р 52230-2004. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ АВТОТРАКТОРНОЕ. Общие технические условия.

[10] ГОСТ 14254-2015 (IEC 60529:2013). МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ. Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (Код IP).

[11] Banner. Technischer ratgeber. <https://www.bannerbatterien.com/>

[12] DIRECTIVE 2002/95/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment.

[13] N. Sobrino, A. Monzon, and S. Hernandez. Reduced Carbon and Energy Footprint in Highway Operations: The Highway Energy Assessment (HERA) Methodology. Networks and Spatial Economics, 16(1):395–414, 2016.

[14] <https://www.globalpetrolprices.com/>

[15] C Iclodean et al. Comparison of Different Battery Types for Electric Vehicles. 2017 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 252 012058.

[16] UN Regulation No. 154 - Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP). <https://unece.org/>

[17] СИСТЕМА АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ И СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ЕЮ. Патент RU 2 721 227. Международная заявка WO 2021/045643 A1.

[18] N. Christofides. Graph Theory: An Algorithmic Approach. Academic Press, 1975.

[19] R. Krishnan. Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications. CRC Press, 2001.

[20] Гермагенов С. С., Ноговицын Р. Р. Расход дизельного топлива при работе грузовых автомобилей на холостом ходу двигателя в условиях крайнего севера. Проблемы науки №6., 2019. С.28-31.

Россия. г. Челябинск, ул. Нахимова — 19п,
ООО «Смартер», директор Андрей Швед
Тел. +7 (929) 237-92-03, mail@smarter.su

*Мы готовы к любым формам партнерства, которые помогут претворить
представленные здесь решения в практические результаты.*