

В.П. Степаненко, В.И. Белозеров**ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ (ГИБРИДНЫХ)
ЭНЕРГОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК
ГОРНОТРАНСПОРТНЫХ МАШИН**

Создать экологически безопасные, энерго – и ресурсосберегающие высокопроизводительные тяговые агрегаты, пригодные для эксплуатации в глубоких карьерах и в условиях Крайнего Севера, возможно с использованием современных накопителей энергии: инерционных ИН, электрохимических ЭХН и конденсаторов с двойным электрическим слоем КДЭС (суперконденсаторов). Дальнейшее совершенствование карьерных тяговых агрегатов обеспечит замена традиционного коллекторного электрического привода постоянного тока современным бесколлекторным безредукторным электроприводом переменного тока.

Ключевые слова: карьер, тяговые агрегаты, комбинированные энергосиловые установки, накопители энергии, суперконденсаторы, инерционные накопители, электрохимические накопители.

Наиболее эффективными и экологически чистыми являются энергосиловые установки, питающиеся от электрических сетей. Там, где питание от электрических сетей невозможно, нашли применение тепловые двигатели и комбинированные (гибридные) энергосиловые установки КЭУ с накопителями энергии. КЭУ используются на электромобилях, подводных лодках, в космосе, на железных дорогах, метрополитенах и т.д. Существует потребность в КЭУ и на открытых горных работах [1, 2].

На крупных карьерах при эксплуатации железнодорожного электрического транспорта трудности возникают из-за перемещения железнодорожных путей и контактных сетей вследствие непостоянства мест погрузки и разгрузки. На подавляющем большинстве карьеров разработка пород проводится с применением взрывных работ и экскаваторов. При использовании экскаваторов существует опасность касания ковша экскаватора к контактному проводу. Для уменьшения повреждения контактной сети проводятся специальные мероприятия: контактная

сеть временно убирается, укладывается на землю и защищается или проводится комбинированные действия.

На отечественных карьерах широко применяются тяговые агрегаты, технические характеристики которых приведены в табл. 1. Карьерные тяговые агрегаты ПЭ2М, ПЭ2У, ОПЭ-1АМ состоят из электровоза управления ЭУ и двух моторных думпкарв МД и не могут автономно передвигаться на участках рельсового пути, необорудованных контактной тяговой сетью [3, 4].

Тяговые агрегаты ОПЭ-1 и ОПА-1А оснащены контактно-дизельными КЭУ. Эти тяговые агрегаты состоят из трех секций: ЭУ (электровоз управления), МД (моторный думпкар), ДС (тепловозная секция). На секции ДС установлена дизель-генераторная силовая установка ДГУ, от которой на участках рельсового пути, не оборудованных контактной тяговой сетью, питаются основные и вспомогательные потребители тягового агрегата. В настоящее время срок эксплуатации многих тяговых агрегатов значительно превышает нормативный и они по своему техническому уровню не обеспе-

Таблица 1

Характеристики тяговых агрегатов

Показатели	Постоянный ток		Переменный ток			
	ПЭ 2М	ПЭ2У	ОПЭ1	ОПЭ1А	ОПЭ1АМ	НП1
Напряжение сети, кВ	1,5/3,0	1,5/3,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Состав агрегата	ЭУ+МД+ +МД	ЭУ+МД+ +МД	ЭУ+ДС+ +МД	ЭУ+ДС+ +МД	ЭУ+МД+ +МД	ЭУ+МД+ +МД
Число осей	12	12	12	12	12	12
Сцепная масса, т	368	368	360	372	368	372
Мощность, кВт	2430/5190	7000	6480	5325	7580	7600
Часовая сила тяги, кН	672	1200	810	660	1270	1200
Часовая скорость, км/ч	13/27,8	65	28,5	29,5	65	25
Автономное питание	–	–	Дизель 1470 кВт	Дизель 1100 кВт	–	–
Изготовитель	ДЭВЗ	ДЭВЗ	НЭВЗ	ДЭВЗ	ДЭВЗ	НЭВЗ

чивают эффективную эксплуатацию в глубинной зоне карьеров, а также в условиях Крайнего Севера.

Основным недостатком контактно-дизельных тяговых агрегатов является загрязнение окружающей среды. Массы вредных веществ в выхлопных газах дизельного двигателя мощностью 1470 кВт дизель-генераторной установки 14 ДГУ-2, при движении тягового агрегата ОПЭ-1 на передвижных путях в кг/ч приведены в табл. 2. Суммарная масса выбросов равна 8,56 кг/ч. Кроме того, в воздух выбрасывается ненормируемые вещества – оксиды серы SO_x . Если при движении по электрифицированному участку дизельный двигатель не выключается и продолжает работать

в режиме холостого хода, то в атмосферу дополнительно выбрасывается 0,93 кг вредных веществ в час. Данные замеры и расчеты производились по утвержденной методике [5].

В последние годы заметно снизилось применение контактно-дизельных тяговых агрегатов на карьерах, но не в связи с внедрением новых экологически безопасных транспортных машин, а вследствие существенного подорожания горюче-смазочных материалов. Новый экологически безопасный тяговый агрегат НП-1 хотя и имеет реализуемую силу тяги на 8% больше, но в его составе отсутствует накопитель энергии.

Техническая характеристика экологически безопасных контактно-ак-

Таблица 2

Вредные компоненты в выхлопных газах дизельного двигателя

Вредные выбросы	Количество, кг/ч
окиси углерода CO	1,603
оксидов азота NO_x	6,105
углеводорода CH	0,642
углерода C	0,208

Таблица 3

Характеристика контактно-аккумуляторного электровоза ВЛ-26

Характеристика	Значение
Сцепная масса	150 т
Мощность часовая	6х235 (1410) кВт
Напряжение в контактной сети	3300 В
Номинальное напряжение тяговых двигателей	750 В
Номинальное напряжение щелочной тяговой аккумуляторной батареи 672 ТНЖШ-550	840 В
Номинальная энергоемкость аккумуляторной батареи	462 кВтч
Удельная энергоемкость аккумуляторной батареи	18,48 кВтч/т
Удельная объемная энергоемкость аккумуляторной батареи	13,44 кВтч/м ³
Масса аккумуляторной батареи	25 т
Объем аккумуляторной батареи	34,4 м ³

кумуляторных электровозов ВЛ-26, опытная партия которых была выпущена в советское время Днепропетровским электровозостроительным заводом ДЭВЗ, приведена в табл. 3

Опыт применения электровозов ВЛ-26 не получил дальнейшего распространения в связи с невысоким тот период уровнем отечественной силовой электроники и низким качеством щелочных тяговых никель – железных аккумуляторов.

Расчет энергии и мощности накопителя для карьерного транспорта

Рассчитаем величину запаса энергии накопителя в кВт·ч для агрегата, имеющего сцепную массу 360 т и перевозящего состав из 10 грузовых думпкаров. Грузоподъемностью думпкаров 105 т, собственная масса 48 т. Общая масса поезда массой равна 840 т. Проведем расчет при длине горизонтальных путей 300 м, 500 м и 1000 м.

Примем следующие условия для расчета:

1. Горная масса перевозится вверх из карьера на поверхность без перецепок одним транспортным средством

(тяговым агрегатом) с накопителем энергии.

2. По забойным и отвальным временным горизонтальным путям поезд перемещается с постоянной скоростью 15 км/ч, с постоянным тяговым усилием и совершает остановки для погрузки и разгрузки.

3. Запас энергии в накопителе должен превышать энергию, затрачиваемую на движение поезда по забойным и отвальным путям в оба конца с учетом затрат энергии на собственные нужды поезда и маневровые работы.

4. Торможение поезда в капитальных траншеях и съездах с отвалов должно производиться с рекуперацией энергии.

5. Дополнительной расход энергии на маневры под погрузкой и разгрузкой учтем коэффициентом K_m , на собственные нужды – коэффициентом K_{ch} . Примем $K_m = K_{ch} = 1,2$.

6. Для электрических накопителей энергии к.п.д. передачи примем равным 0,88, для инерционных накопителей к.п.д. передачи выберем равным 0,85 и расход энергии на собственные нужды – 3,5%.

Расчет:

Расход энергии за один рейс в оба конца $A_{\text{дв}}$ и мощность накопителя энергии N_a можно определить по формулам (1), (2) [3]. Расход энергии за один рейс в оба конца $A_{\text{дв}}$, кВт·ч:

$$A_{\text{дв}} (\text{кВт} \cdot \text{ч}) = (P_{\text{сч}} + Q_{\text{гр}}) (w_o L + h) + (P_{\text{сч}} + Q_{\text{пор}}) w_o (L - L_{\text{т}}) \quad (1)$$

Мощность источника автономного питания N_a (кВт):

$$N_a (\text{кВт}) = F_v / 367 \eta + \Delta N_{\text{сч}} \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) $P_{\text{сч}}$ – сцепной вес тягового агрегата, кН; Q – вес тяговой и прицепной части поезда, кН; $Q_{\text{гр}}$, $Q_{\text{пор}}$ – вес груженого и порожнего составов, кН; w_o – удельное основное сопротивление движению, Н/кН; h – разность отметок исходного и конечного пунктов откатки (уступ-отвал), м; L – длина откатки в один конец, м; $L_{\text{т}}$ – длина участка откатки, на котором производится торможение, η – КПД передачи вращающего момента на тяговые колеса; $N_{\text{сч}}$ – мощность, расходуемая на собственные нужды поезда (тягового агрегата), кВт.

Тяговое усилие F (Н) при движении с установившейся скоростью:

$$F (\text{Н}) = Q(\pm i + w_o) \quad (3)$$

где i – уклон рельсового пути, ‰; w_o – основное удельное сопротивление движению, [Н/кН].

Сопротивление движению W складывается из сопротивления движению локомотива и прицепных думпкарров. Без учета собственных нужд поезда удельное сопротивление тягового

агрегата на передвижных балластированных путях при движении под током $w_{\text{т}}$ определяется из выражения (4), без тока $w_{\text{б}}$ – из выражения (5):

$$w_{\text{т}} = 1,2(2,5 - 0,07v + 0,0025v^2) \quad (4)$$

$$w_{\text{б}} = 1,2(2,78 - 0,023v + 0,0075v^2) \quad (5)$$

где v – скорость движения, км/ч.

Для грузовых думпкарров удельное сопротивление $w_{\text{д}}$ равно

$$w_{\text{д}} = 3,6 + 0,15v^2 \quad (6)$$

В результате расчетов по формулам (4), (5), (6) при скорости движения 15 км/ч удельное сопротивление $w_{\text{т}} = 2,52$ Н/кН, $w_{\text{б}} = 3,93$ Н/кН, $w_{\text{д}} = 5,85$ Н/кН. Затраты энергии на передвижение поезда на 1 м в двух направлениях без учета к.п.д. передачи и расхода энергии на маневровые работы и собственные нужды равны 0,037 кВт·ч, а с учетом КПД передачи будет равен для инерционных накопителей равен 0,044 кВт·ч/м и для электрических – 0,042 кВт·ч/м. С учетом дополнительных расходов энергии на собственные нужды и маневровые работы удельный расход энергии примем равным 0,077 кВт·ч/м. Конечные результаты расчетов запаса энергии в накопителе с учетом и без учета расходов на собственные нужды и маневровые работы при длине горизонтальных участков пути 300 м, 500 м и 1000 м приведены в табл. 4.

Из сравнения табл. 3 и табл. 4 следует, что запас энергии тяговой аккумуляторной батареи контактно-аккумуляторного электровоза ВЛ26

Таблица 4

Зависимость запаса энергии в накопителе от длины горизонтального участка

Длина участка пути, м	300	500	1000
Запас энергии без учета расхода энергии на собственные нужды и маневровые работы, кВт·ч	13,2	22	44
Запас энергии с учетом расхода энергии на собственные нужды и маневровые работы, кВт·ч	23,1	38,5	77,0

значительно превышает требуемый расчетный запас энергии, необходимый для работы в автономном режиме на участке длиной 1 км ($77,0 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \ll \ll 462 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$). Отсюда следует, что аккумуляторную батарею 672ТНЖШ-550, которая была установлена на советском контактно-аккумуляторном электровозе ВЛ-26 (см. табл. 3), имеет достаточный запас энергии и ее можно рассматривать в качестве возможного накопителя энергии на карьерных тяговых агрегатах.

Выбор энергоемких и экологически безопасных накопителей энергии

Современными и экологически безопасными накопителями энергии являются супермаховики, электрохимические накопители энергии ЭХН (аккумуляторные батареи) и КДЭС (они же молекулярные накопители энергии МН или суперконденсаторы) [6].

Сравнение свинцово-кислотных и никель-железных ЭХН

1. Никель-железные аккумуляторы самые дешевые ЭХН, но они обладают существенными недостатками: значительным саморазрядом и фоновым выделением водорода, а также выделением водорода в режиме заряд-разряд во взрывоопасных концентрациях.

2. Свинцово-кислотные аккумуляторные батареи имеют меньшее газо-выделение, большую удельную энергетическую емкость ($30\text{--}60 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$), меньшее внутреннее сопротивление, большее напряжение на элементе ($1,75\text{--}2,5 \text{ В}$ против $0,9\text{--}1,5 \text{ В}$), соответственно меньшее количество перемычек в аккумуляторной батарее, большую отдачу по емкости при низких температурах и более широкий диапазон рабочих температур.

Сравнение электрохимических накопителей энергии ЭХН и конденсаторов с двойным электрическим слоем КДЭС

1. Расчетная рабочая температура ЭХН обычно $20\text{--}25^\circ\text{C}$. Повыше-

ние температуры на каждые $7\text{--}10^\circ\text{C}$ сверх расчетной обычно сокращает срок службы в два раза. Эксплуатация их при температуре выше $+50^\circ\text{C}$, как правило, недопустима. Снижение температуры ниже расчетной увеличивает срок службы ЭХН, но уменьшает отдаваемую емкость на $0,8\text{--}1\%$ на один градус.

2. Невысокий к.п.д. процессов заряда и разряда ЭХН, при увеличении разрядного тока сверх номинального значения отдаваемая емкость сильно снижается.

3. Длительное время заряда ЭХН (более 3 часов). При ускоренном заряде снижается к.п.д.

Преимущества КДЭС перед ЭХН

1. Срок службы КДЭС (конденсаторной батареи) 10 лет или 100 000 циклов заряд-разряд, т.е. на порядок выше, чем ЭХН.

2. Невысокая трудоемкость обслуживания и ремонта КДЭС в эксплуатации.

3. Отдаваемая при разряде электроэнергия КДЭС в меньшей степени зависит от температуры и тока. При высоких и низких температурах отсутствует существенное снижение характеристик КДЭС.

4. Высокий к.п.д. процессов заряда-разряда КДЭС, т.к. внутреннее сопротивление батарей КДЭС меньше, чем ЭХН.

5. Продолжительность режимов заряда-разряда КДЭС батареи до 100% емкости существенно короче, время заряда от 15 до 40 мин. и ограничивается мощностью зарядно-разрядных устройств.

6. Высокая объемная и весовая удельная мощности, невысокий саморазряд (не выше $0,3\%$ в сутки), уровень заряженности КДЭС однозначно зависит от величины напряжения на конденсаторе.

7. Отсутствует процесс газообразования в разрядном и зарядном ре-

Таблица 5

Сравнение ЭХН аккумуляторов и суперконденсаторов КДЭС

Удельные параметры	Аккумуляторы			Суперконденсаторы	
	кислотный	щелочной	ионно-литиевый	промышленный	опытный
Энергия, Вт·ч/кг	20–40	15–80	80–220	2–10	45–85
Мощность, Вт/кг	100–300	500–1300	800–3000	1500–12000	2000–21000
Ток макс., А	до 7 С	(4–10)С	(10–20)С	до 5000 А	более 5000 А

Таблица 6

Сравнительные характеристики КДЭС

Параметры	Производитель		
	Технокор, Россия	Элтон, Россия	Максвелл, Германия
Рабочее напряжение, В	400–800	400–800	810–405
Емкость, Ф	300–150	360–180	190–92
Запасаемая энергия, МДж/кВтч	50,2/14	57,6/16	51,7/14,3
Максимальная мощность, МВт	57,1	36,0	30,4
Масса, т	24,3	6,95	3,4
Объем, м ³	30,4	2,3	11,9
Электролит	водный	водный	ацетонитрил, 600 л, ядовит
Цена, млн руб.	15,5	10,2	24,0

жимах КЭДС, что позволяет использовать КДЭС в схемах рекуперативного торможения электромобилей и электровозов.

Основные недостатки КДЭС по сравнению с ЭХН

1. Низкая плотность энергии от 5 кВт·ч/т до 10 кВт·ч/т.

2. Зависимость запасенной энергии от квадрата напряжения.

3. Высокая стоимость 1 кВт·ч накопленной энергии.

Технические характеристики ЭХН и КДЭС приведены в табл. 5 и 6.

При расчетах энергии рекуперативного торможения масса поезда была принята равной 840 т, скорость движения – 30 км/ч, уклон траншеи – 40‰. Глубина карьера была выбрана переменной: 100 м, 150 м, 200 м и

250 м, длина тормозных участков 2,5 км, 3,75 км, 5,0 км и 6,25 км, соответственно. В табл. 7 приведены результаты расчета энергии рекуперативного торможения при движении поезда на спуске в траншее.

В качестве накопителей для приема энергии рекуперативного торможения можно использовать как щелочные ТНЖШ-550, так и кислотные аккумуляторы. Отечественной промышленностью выпускаются тяговые свинцово-кислотные панцирные аккумуляторы 7PzSL805, их которых можно укомплектовать батарею 440x7PzSL805 на напряжение 880 В, емкостью 805 Ач, энергоемкостью 797,5 кВт·ч. Габаритные размеры аккумуляторной батареи 440x7PzSL805 позволяют разместить ее на тяговом

Таблица 7

Результаты расчета энергии торможения

Характеристики	Значения			
Глубина карьера, м	100	150	200	250
Длина тормозного участка, км	2,5	3,75	5,0	6,25
Время движения, ч	0,08	0,12	0,16	0,20
Время движения под контактной сетью, ч	0,13	0,17	0,21	0,25
Электроэнергия рекуперативного торможения, кВтч	194	291	386	485

агрегате, а ее энергоемкость позволяет полностью принять энергию рекуперативного торможения.

Для накопления электроэнергии в тормозных режимах, а также для питания тяговых электродвигателей при двух-трехкратных перегрузках целесообразно применять суперконденсаторы КДЭС и инерционные накопители ИН. Накопители энергии можно размещать как на тяговых агрегатах, так и на тяговых подстанциях. В настоящее время имеется опыт эксплуатации накопителей энергии на тяговых подстанциях Московского метрополитена [1, 2, 7].

Дальнейшее совершенствование обеспечит применение бесколлекторного (вентильного, индукторного или асинхронного) электропривода, что позволит увеличить мощность тяговых агрегатов не менее, чем на 25–30%, повысить производительность на 15–20%, снизить расход энергии на 3–5% на уклонах 60‰, повысить ско-

рость движения на подъемах, снизить эксплуатационные расходы на ремонт и обслуживание тяговых электродвигателей и пускорегулирующей аппаратуры [2, 8].

Заключение

1. Создать экологически безопасные, ресурсо- и энергосберегающие высокопроизводительные тяговые агрегаты, пригодные для эксплуатации в глубоких карьерах и в условиях Крайнего Севера, возможно с использованием современных накопителей энергии: инерционных ИН, электрохимических ЭХН и конденсаторов с двойным электрическим слоем КДЭС (суперконденсаторов).

2. Дальнейшее улучшение тяговых свойств, повышение мощности и снижение эксплуатационных расходов карьерных тяговых агрегатов обеспечит замена традиционного коллекторного привода постоянного тока бесколлекторным электроприводом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белозеров В.И., Степаненко В.П. Актуальность создания карьерных локомотивов с накопителем энергии // Горная промышленность. – 2014. – № 4. – С. 19.
 2. Степаненко В.П. Применение комбинированных (гибридных) энергосиловых установок в горной промышленности // Горный информационно-технический бюллетень. – 2014. – № 11. – С. 322–328.
 3. Поталов М.Г. Карьерный транспорт. – М.: Недра, 1980. – С. 262.

4. Шадрин Н.М. Электровозный транспорт. Справочник рабочего. – М.: Недра, 1995. – С. 214.
 5. Методика расчета вредных выбросов (сбросов) для комплекса оборудования открытых горных работ. – Люберцы, 1999, 48 с.
 6. Штанг А.А., Михайлова О.А. Проектирование гибридного транспортного средства на основе современных накопителей энергии. – Новосибирск, НГТУ, 2013. – 6 с.

7. Шевлюгин М.В. Ресурсо- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н. – М.: МГУПС (МИИТ), 2009. – С. 51

8. Степаненко В.П., Кондрашин А.Ю., Верхутов Ю.А. Шахтные транспортные средства с безредукторным бесколлекторным приводом // Научные сообщения Национального Центра горного производства ИГД им. А.А. Скочинского. – 2000. – № 314. – С. 172–177. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Степаненко Валерий Павлович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, МГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: ud@msmu.ru, Белозеров В.И. – кандидат технических наук, ООО «Экопроекткарьер».

UDC 622. 621.311.1

APPLICATION OF COMBINATION (HYBRID) POWER-PLANTS FOR MINE TRANSPORTATION VEHICLES

Stepanenko V.P., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Senior Researcher, Moscow Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, e-mail: ud@msmu.ru, Belozеров V.I., Candidate of Technical Sciences, LLC «Ekoproektkar'er», Russia.

It is possible to design safe, energy- and resource-saving, high-capacity locomotive units suitable for application in deep open pit mines and under the far north conditions using advanced energy storage units: inertial, electrochemical and electric double-layer capacitors (supercapacitors). Further improvement of open pit locomotive units will be enabled by replacement of traditional commutator dc drive with the modern commutatorless and gearless ac motor.

Key words: open pit mine, locomotive units, combination power-plants, energy storage units, supercapacitors, inertial energy-storage unit, electrochemical energy-storage unit.

REFERENCES

1. Belozеров V.I., Stepanenko V.P. *Gornaya promyshlennost'*. 2014, no 4, pp. 19.
2. Stepanenko V.P. *Gornyi informatsionno-tekhnicheskii byulleten'*. 2014, no 11, pp. 322–328.
3. Potapov M.G. *Kar'ernyi transport* (Open pit mine transport), Moscow, Nedra, 1980, pp. 262.
4. Shadrin N.M. *Elektrovoznyi transport. Spravochnik rabochego* (Locomotive transport. Operator's manual), Moscow, Nedra, 1995, pp. 214.
5. *Metodika rascheta vrednykh vybrosov (sbrosov) dlya kompleksa oborudovaniya otkrytykh gornykh rabot* (Calculation procedure for toxic emission of a set of equipment for open pit mining), Lyubertsy, 1999, 48 p.
6. Shtang A.A., Mikhailova O.A. *Proektirovanie gibridnogo transportnogo sredstva na osnove sovremennykh nakopitelei energii* (Hybrid transport vehicle design based on advanced energy storage units), Novosibirsk, NGTU, 2013, 6 p.
7. Shevlyugin M.V. *Resurso- i energosberegayushchie tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte i metropolitenakh, realizuemye s ispol'zovaniem nakopitelei energii* (Resource- and energy-saving technologies in surface and underground railroad transportation using energy storage units), Doctor's thesis, Moscow, MGUPS (MIIT), 2009, pp. 51.
8. Stepanenko V.P., Kondrashin A.Yu., Verkhutov Yu.A. *Nauchnye soobshcheniya Natsional'nogo Tsentra gornogo proizvodstva IGD im. A.A. Skochinskogo*. 2000, no 314, pp. 172–177.

