

**О. Н. СИНЧУК**, докт. техн. наук, проф., Криворожский национальный университет;  
**Э. С. ГУЗОВ**, канд. техн. наук, доц., Криворожский национальный университет;  
**И. О. СИНЧУК**, канд. техн. наук, доц., Криворожский национальный университет;  
**Ю. Б. ФИЛИПП**, канд. техн. наук, доц., Криворожский национальный университет;  
**В. О. ФЕДОТОВ**, ст. преп., Криворожский национальный университет.

## О ТАКТИКЕ ВЫБОРА ТИПА И ПАРАМЕТРОВ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КОМБИНИРОВАННЫХ ШАХТНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

**Введение.** Железородное сырье является одним из важнейших компонентов формирования ВВП и пополнения валовых запасов Украины [1]. В силу ряда как объективных так и необъективных причин, главными из которых, с одной стороны является падение цен на ЖРС, а с другой – рост себестоимости добываемого сырья, ставит под сомнение дальнейшую конкурентоспособность данного вида отечественного полезного ископаемого на мировом сырьевом рынке.

Актуальность исследований. Весомым слагаемым в общем комплексе формирования себестоимости ЖРС – до 30%, является сегмент затрат на его транспортирование [1]. Основным и единственным видом транспорта по доставке ЖРС, материалов и людей в подземных горных выработках железорудных шахт есть и будет оставаться как минимум в ближайшие 50–60 лет электровозный. К сожалению, эффективность функционирования электровозоставов и, что немаловажно, безопасность его эксплуатации далеки от требований современного горного производства по целому комплексу показателей и особенно в вопросах энергоэффективности и безопасности функционирования [2, 3]. Существующие типы и виды отечественных шахтных электровозов (а их более 20–ти) давно морально устарели и являют собой пример яркого технологического анахронизма.

В последнее десятилетие в Украине возобновились научно-изыскательские работы по созданию энергоэффективного и безопасного в эксплуатации нового для отечественных горных производств вида шахтного электровоза – комбинированного, когда тяговые электромеханические комплексы получают питание, как от тяговой контактной сети, так и от автономного источника энергии. Для достижения должного уровня эффективности такого синергетического по структуре ТЭМК, а, следовательно, и электровоза в целом, необходимо решение двух задач: выбор системы управления и источника автономного питания. Один из вариантов энергоэффективной синергетической структуры ТЭМК комбинированного вида шахтного электровоза приведен на рис. 1. Остановимся более подробно на втором из вышеприведенных критериев эффективности ТЭМК. Превентивно по виду источника питания привлекательными видятся два варианта: тяговые аккумуляторные батареи или синергетические конденсаторы в современном варианте их исполнения [4–7].

*Вариант тяговых аккумуляторных батарей.* Остановимся на аккумуляторных тяговых источниках питания, а также выборе параметров ТАБ и типов аккумуляторов для их формирования. При этом подчеркнем, что во многом именно от этого процесса будет зависеть «быть или не быть» отечественному контактно-аккумуляторному виду шахтного электровоза.

Однако следует понимать, что тактика подхода к формированию структуры контактно-аккумуляторных электровозов может иметь два направления [4–7]. Первый, это когда напряжение формируемой ТАБ равно напряжению тяговой сети, и второй – напряжение ТАБ меньше напряжения контактной сети, и его уровня достаточно лишь для кратковременного передвижения электровоза на низкой скорости при перестановке вагонеток при погрузочно-разгрузочных операциях. Оба варианта успешно реализованы фирмой ASEA (Швеция) для типового ряда шахтных электровозов этой фирмы [4–7]. Аналогичные результаты были в последствии получены так же рядом других зарубежных фирм [5, 6].

Исследования авторов для условий железорудных шахт [8–10] показали, что размещение ТАБ с уровнем напряжения питанием тяговых двигателей напряжением 250 В (как и в случае питания от тяговой контактной сети) невозможно в существующих габаритах отечественных рудничных видов контактных электровозов, а увеличение их габаритов невозможно из-за ограничений размеров горных выработок. В соответствии с этим возникает двуединая задача выбора ТАБ – минимально необходимой емкости и минимально возможных габаритов.

Выбор параметров ТАБ предлагается осуществлять исходя из требований по выполнению технологических операций электровозной откатки: перестановки вагонеток под пунктами погрузки (люками), движения по погрузочной выработке, питания двигателя мотор–компрессора и освещения. Общий расход емкости ТАБ за период загрузки составит:

$$Q_{\Sigma} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, \quad (1)$$

где  $Q_1$  – емкость ТАБ, расходуемая на выполнение перестановок вагонеток под люками;

$Q_2$  – емкость ТАБ, расходуемая на проезд подвижного состава по погрузочной выработке;

$Q_3$  – емкость батареи, расходуемая на питание двигателя компрессора электровоза;

$Q_4$  – емкость батарей, расходуемая на работу осветительных приборов электровоза.

$$Q_1 = I_{II} \cdot \frac{t_{II}}{T_{II}} = 400 \cdot \frac{250}{3600} = 27,8 \text{ А}\cdot\text{ч.} \quad (2)$$

Поскольку реальная длина погрузочной выработки железорудных шахт в среднем составляет около 200 м, то для проезда этой выработки составу со скоростью 1 м/с потребуется время около 200 с. При среднем значении тока двух двигателей во время движения около 300 А расход ёмкости ТАБ при движении состава по погрузочной выработке составит:

$$Q_2 = I_D \cdot \frac{t_D}{T_{II}} = 300 \cdot \frac{200}{3600} = 16,7 \text{ А}\cdot\text{ч.} \quad (3)$$

Для питания мотор–компрессора рудничного электровоза с мощностью двигателя 2,5 кВт при напряжении 80 В потребуется ток около 35 А. С учетом среднего времени работы мотор-компрессора в погрузочной выработке около 5 мин расход емкости ТАБ составит:

$$Q_3 = I_K \cdot \frac{t_K}{T_{II}} = 35 \cdot \frac{5 \cdot 60}{3600} = 3 \text{ А}\cdot\text{ч.} \quad (4)$$

Питание цепей освещения мощностью около 500 Вт при напряжении 80 В потребует ток около 6 А. Тогда расход емкости ТАБ при времени работы в погрузочной выработке около 15 мин может составить:

$$Q_4 = I_O \cdot \frac{t_O}{T_{II}} = 6 \cdot \frac{15 \cdot 60}{3600} = 1,5 \text{ А}\cdot\text{ч.} \quad (5)$$

лять 400 А·г. При работе электровоза можно осуществлять подзарядку ТАБ, продолжительность которой может представлять в среднем 0,8 часа за один рейс. Тогда ток подзаряда будет определяться:

$$I_3 = \frac{Q_{\Sigma}}{t_3} = \frac{75}{0,8} = 94 \text{ А.} \quad (6)$$

Напряжение подзаряда для никель–железной батареи при  $U_e = 1,6$  В на одном элементе и их количестве  $n = 60$  будет равняться:

$$U_3 = n \cdot U_e = 60 \cdot 1,6 = 96 \text{ В.} \quad (7)$$

Эта методика расчета может быть положена в основу выбора параметров и режима работы ТАБ рудничного контактно–аккумуляторного электровоза с безусловным учетом весо–габаритных показателей ТАБ.

Важным фактором для формирования ТАБ в комплексе с тяговым электрооборудованием шахтного электровоза является правильный выбор типа аккумуляторов [6, 11]. В практике разработки и эксплуатации отечественных аккумуляторных видов шахтных электровозов широко используются для шахтных электровозов никель–железные аккумуляторы, параметры которых приведены в таблице 1. Никель–железные аккумуляторы (Ni–Fe) дешевле никель–кадмиевые аккумуляторы (Ni–Cd), не содержат токсичный кадмий, имеют долгий срок службы и высокую механическую прочность. Однако они характеризуются высоким саморазрядом, низкой отдачей по энергии, практически неработоспособны при температуре ниже  $-10^\circ \text{C}$  [12].

Существуют три основных вида никель–кадмиевых аккумуляторов: негерметичные с ламельными (ламельные аккумуляторы) и спеченными электродами (безламельные аккумуляторы) и герметичны.

Наиболее оптимальными по стоимости являются ламельные никель–кадмиевые аккумуляторы характеризуются плоской разрядной кривой, высокими ресурсом и прочностью, но повышенной удельной энергией. Удельная энергия, скорость разряда Ni–Cd аккумуляторов с спеченными электродами выше, они работоспособны при низких температурах, но дороже, характеризуются эффектом памяти и способностью к тепловому разгону. Герметичные Ni–Cd аккумуляторы характеризуются горизонтальной разрядной кривой, высокими скоростями разряда и способностью действовать при низких температурах, но они дороже герметизированных свинцовых аккумуляторов и характеризуются эффектом памяти. Недостатком никель–кадмиевых аккумуляторов является применение токсичного кадмия.

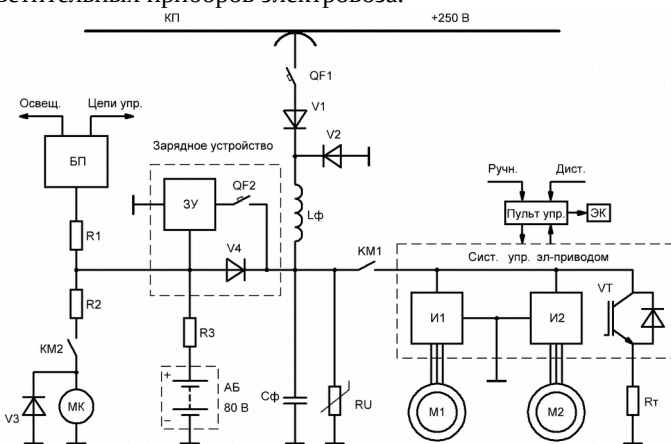


Рис. 1 Упрощенная структура электромеханической части контактно-аккумуляторного электровоза с тяговым асинхронным электроприводом

С учетом КПД и дополнительных затрат емкости ТАБ на протяжении рейса электровоза будет необходима общая емкость батареи около 70 А·ч. Приведенные расчеты могут считаться, в некоторой степени приближенными, и должны быть уточнены в ходе дополнительных исследований с учетом фактических значений параметров рейсовой работы электровозов. Так емкость может быть еще и уменьшена до 60 А·ч путем увеличения продолжительности заряда за счет времени пересменок – заряд не только во время рейса, но и в интервалах между сменами. Если учесть снижение емкости ТАБ в процессе ее эксплуатации, то ее номинальная емкость для выполнения 6-7 рейсов за одно изменение может составлять

Таблица 1 – Параметры никель–железных аккумуляторов для шахтных электровозов

Типы аккумуляторов	FL350 (ТНЖ350) V5	FL500 (ТНЖ500) V5
Номинальная емкость, А·г	350	500
Габаритные размеры, мм	165×167×538	165×167×538
Масса с электролитом, кг	20,6	24,0
Масса без электролита, кг	16,8	20,2
Ток заряда, А	70	100
Время заряда, ч	8,0	8,0
Конечное напряжение, В	1,6	1,6

Между тем не следует сбрасывать со счетов и такой существующий тип аккумуляторов как свинцово-кислотные. Использование данных типов аккумуляторов для контактно-аккумуляторных электровозов имеет так же, как свои преимущества так и недостатки. Так среднее разрядное напряжение свинцово-кислотных аккумуляторов составляет – 2,1 В на один элемент, тогда как щелочных – 1,1 В. Энергия разряда кислотных аккумуляторов, по некоторым оценкам, может в 1,4–2,1 раза превышать энергию щелочных аккумуляторов. Однако, во время зарядки свинцово-аккумуляторных батарей в контактно-аккумуляторных электровозах (торможение с электрической рекуперацией энергии, подзаряд батарей во время движения электровоза) протекающие химические реакции, могут быть опасными, особенно в случае высокой интенсивности зарядки. В свинцово-кислотных батареях может происходить выделение водорода и кислорода в результате гидролиза воды, повышают риск возникновения провокации взрыва в горных выработках. Для этого случая система подзарядки должна эффективно контролировать процесс заряда батарей и не допускать выделения водорода и кислорода.

В литий-ионных аккумуляторах для отрицательного электрода применяют углеродный материал, в который вмонтированы ионы лития. Активным материалом положительного электрода служит оксид кобальта, в который также вмонтированы ионы лития. Электролитом является раствор соли лития в неводной растворителе. Аккумуляторы имеют высокую удельную энергию, высокий ресурс и способны работать при низких температурах. Благодаря высокой удельной энергии их производство в последние годы резко увеличилось. В литиевых аккумуляторах есть только два существенных недостатка – высокая цена и необходимость иметь специальную (обычно встроенную) систему контроля заряда/разряда, предотвращающую склонность литиевых аккумуляторов к самовозгоранию и даже взрыву при нарушении условий эксплуатации.

По удельному энергии после литий-ионных аккумуляторов на второе место выходят натрий никель-хлоридные аккумуляторы, которые больше приспособлены к работе в тяжелых условиях эксплуатации. Также у этого вида аккумуляторных батарей есть свои преимущества и недостатки.

Длительный срок эксплуатации и высокие показатели циклирования ставят на данный момент времени натрий никель-хлоридные аккумуляторы на одно из первых мест среди существующих типов аккумуляторов. Единственной существенной помехой является значительная стоимость ТАБ сформированных на базе этих видов элементов. По факту ожидаемого снижения цены одного киловатт-часа емкости батареи до уровня 300 USD, что реально может быть достигнуто (себестоимость производства составляет менее 150 USD за 1 кВт·ч), то использование их в электротранспорте, в том числе и в шахтных электровозах, станет реальностью.

Основные технические и экономические показатели аккумуляторов различных электрохимических систем приведены в таблице 2.

Как было изложено ранее в тексте предварительно, при проектировании контактно-аккумуляторных видов электровозов приходится решать вопрос выбора типа аккумулятора с учетом массо-габаритных показателей и энергоресурса. Проведенный анализ в этом направлении показал, что в ближайшей перспективе наиболее целесообразным будет применение литий-ионных и натрий никель-хлоридных видов аккумуляторов, в которых удельный весовая энергия будет составлять более 200 Вт·ч/кг при ресурсе 3000 циклов (против 1000 циклов на сегодняшний день) и стоимости 0,12 \$/Вт·ч.

Кроме проанализированных видов есть и другие перспективные разработки аккумуляторов производства ряда фирм США, Японии, Швеции и некоторых других стран.

Поиски и разработки, направленные на снижение стоимости различных ТАБ, безусловно, продолжают и будут продолжаться в дальнейшем. Снижение уровня цен на литий-ионные, натрий никель-хлоридные аккумуляторы в сочетании с решениями, позволяющими предложить безопасные и большие емкости ТАБ на основе аккумуляторов этих электрохимических систем, могут создать еще более привлекательные условия для расширения их применения в качестве ТАБ для комбинированных видов шахтных электровозов.

Между тем, следует учитывать и тот факт, что в последние годы разработаны новые типы аккумуляторов, в т.ч. сверхёмкие – графеновые, точнее графено-магниевые, которые по всем параметрам значительно превосходят все ныне существующие накопители энергии. Важно, что эти аккумуляторы изготавливаются из недефицитных и недорогих материалов – графита и магния, которые безопасны, как для обслуживающего персонала, так и окружающей среды. В этих аккумуляторах используются нанотехнологии, позволяющие изготавливать слои графита толщиной в один атом с высокой прочностью и проводимостью. Графеновые аккумуляторы имеют в несколько раз большую энергоёмкость по сравнению с литий-ионными при цене в несколько раз меньшей – это открывает огромные перспективы в развитии и использовании накопителей энергии, на транспорте и в других отраслях. Для контактно-аккумуляторных электровозов этот компактный, энергоёмкий, допускающий

Таблица 2 – Основные технические и экономические показатели аккумуляторов

Электрохимическая система аккумулятора	Диапазон рабочих температур аккумуляторов, °С	Удельная энергия аккумулятора, Вт·г/кг	Относительная стоимость единицы энергии, грн / Вт·г	Потеря емкости при хранении в заряженном состоянии, % / месяц	Срок службы в режиме постоянного подзаряда, год
Свинцово-кислотная, герметичная	-20÷+40	20–50	0,8–1,8	10–15	3–10
Никель-кадмиевая, герметичная	-40÷+45	20–55	1,5–2	до 10	до 20
Литий-ионная	-10÷+50	100–260	2,5–4	5–25	до 5
Никель-хлоридная	-20÷+40	40–100	1,6–2,4	15–25	до 5

большие токи заряда и разряда, не требующий обслуживания и имеющий низкую цену тип аккумуляторов может стать в перспективе приоритетным.

В дополнение отметим еще один немаловажный факт, что создание контактно-аккумуляторного электровоза на базе контактного К14 и при соответствующей тяговой электромеханической структуре, будет одновременно косвенным решением проблемы повышения сцепного веса электровоза до ожидаемых 16 т. [3].

**Суперконденсаторы.** Ещё один вид накопителей электроэнергии, на который возлагались большие надежды – *ионисторы* (суперконденсаторы). По оценкам разработчиков, этот вид накопителей электрической энергии может выдерживать большие зарядные и разрядные токи, имея срок службы значительно больше, чем у существующих типах и видах аккумуляторов. Так энергия, запасённая конденсатором:

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2 \cdot 3600}, \text{ Вт}\cdot\text{ч}, \quad (8)$$

где  $C$  – ёмкость конденсатора,  $F$ ;  $U$  – напряжение на конденсаторе,  $V$ .

При ёмкости 3000  $F$  и напряжении на конденсаторе 2,7  $V$  запасённая энергия  $W = 3,04 \text{ Вт}\cdot\text{ч}$ .

При цене такого конденсатора  $C_1 = 135 \$$ , т.е. относительная цена составит:

$$C_{\text{отн}} = \frac{C_1}{W} = \frac{135}{3,04} = 44 \$ / (\text{Вт}\cdot\text{ч}). \quad (9)$$

в необходимости небольшого количества накапливаемой энергии.

К примеру, в работе [6] приведен пример блока питания с использованием суперконденсаторов, подключаемых параллельно аккумуляторной батарее, для снятия пиковых нагрузок с аккумулятора в ТАБ рудничного электровоза. При этом энергетическая ёмкость блока конденсаторов составляет менее 1% энергетической ёмкости аккумуляторной батареи. Т.е. в энергетическом плане ёмкостной накопитель не играет заметно положительной роли, но в тоже время существенно увеличивает затраты. Но это предмет отдельного исследования.

**Выводы.** Приведенная методика позволяет производить выбор параметров и вид источника автономного питания тяговых синергетических комплексов комбинированных видов шахтных электровозов и рекомендуется для использования в практике создания вышеотмеченных транспортных средств.

**Список литературы:** 1. Сборник технико-экономических показателей горнодобывающих предприятий Украины в 2009 – 2010 гг.: Анализ мировой конъюнктуры рынка ЖРС 2004 – 2011 гг.: / Е.К. Бабец, Л.А. Штанько, В.А. Салганик, И.Е. Мельникова и др. – Кривой Рог: Видавничий дім. 2011. – 329 с. 2. Леб'одкін С. В. Вугільна промисловість і перспективні напрямки розвитку тягових електроприводів рудникових електровозів (Проблеми і перспективи) / С. В. Леб'одкін, А. Ф. Сінолиць, О. В. Пасько // Вісник Криворізького технічного університету. Збірник наукових праць. – 2004. № 4. – С. 12 – 15. 3. Шахтний електровозний транспорт. Теорія, конструкції, електрообладнання : учебник / І. О. Синчук, Э. С. Гузов, В. Л. Дебелый, Л.Л. Дебелый; под ред. доктора технических наук, профессора О. Н. Синчука. – Кривой Рог – Донецк: ЧП Щербатых А. В., 2015 – 428 с. 4. Asea Аккумуляторные локомотивы и другие шведские NG локомотивы. <http://gn15.info/forum/viewtopic.php?t=7043/> (Accessed 2016-12-20). 5. Производители локомотивов - China Coal Group <https://chinacoalintl.com/> (Accessed 2016-12-20). 6. Степаненко В. П. Особенности организации локомотивной откатки с использованием комбинированных электровозов. Научное сообщение ИГД им. Скопинского. / Горная механика, рудничный транспорт, техническое обслуживание и ремонт ГШО. – М., 1988. С.130-138. 7. Материалы сайта [www.asea.com](http://www.asea.com). 8. Синчук О. М. Шахтний контактно-аккумуляторний електровоз. Горний журнал. – 1988. -№6. – С.55-57. 9. Синчук О. Н., Шокарев Д. А., Скапа Е. И., Гузов Э. С., Караманиц Ф. И. Синергетический тяговый асинхронный электротехнический привод для контактно-аккумуляторного двухосного электровоза//Електромеханічні та енергозберігаючі системи.-2011.-Вип.4(16). –С.65-68. 10. Синчук О. Н., Синчук І. О., Гузов Э. С., Шокарев Д. А. Тяговые электромеханические комплексы шахтных контактных электровозов. Электрические и компьютерные системы. № 15 (2014): 286-291. 11. Степаненко В. П. Разработка и испытание шахтных контактно-аккумуляторных электровозов / В. П. Степаненко, В. Ванцлафф, Р. Данейка. // Уголь. – 1986. – №12. – С. 32–33. 12. Степаненко В. П. Повышение энергоэффективности и ресурсосбережения рудничного электровозного транспорта // Вісник Криворізького технічного університету. Збірник наукових праць. – 2016. № 42. – С. 20 – 25.

**Bibliography (transliterated):** 1. Babets E. K., Shtanko L. A., Salganik V. A. [i dr.]. "Analiz mirovoy konyunktury rynku ZhRS 2004-2011 gg.". Krivoy Rog : Vidavnicliy dim, 2011. – 329. Print. 2. Leb'odkin S. V. Vuhil'na promyslovist' i perspektyvni napryamky rozvytku tyahovykh elektropryvodiv rudnykovykh elektrovoziv (Problemy i perspektyvy) / S. V. Leb'odkin, A. F. Sinolytsey, O. V. Pas'ko // Visnyk Kryvoriz'koho tekhnichnoho universytetu. Zbirnyk naukovykh prats'. – 2004. # 4. – pp. 12 – 15. Print. 3. Shakhtnyy elektrovoznyy transport. Teoriya, konstruktzii, elektrooborudovanie : uchebnik / I. O. Sinchuk, E. S. Guzov, V. L. Debelyy, L.L. Debelyy; pod red. doktora tekhnicheskikh nauk, professora O. N. Sinchuka. – Krivoy Rog – Donetsk: ChP Shcherbatykh A. V., 2015 – 428 s. 4. Asea . <http://gn15.info/forum/viewtopic.php?t=7043/> (Accessed 2016-12-20). 5. China Coal Group <https://chinacoalintl.com/> (Accessed 2016-12-20). 6. Stepanenko V. P. Osobennosti organizatsii lokomotivnoy otkatki s ispol'zovaniem kombinirovannykh elektrovozov. Nauchnoe soobshchenie IGD im. Skochinskogo. / Gornaya mekhanika, rudnichnyy transport, tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont GShO. – M., 1988. S.130-138. 7. Materialy sayta [www.asea.com](http://www.asea.com). 8. Sinchuk O. M. Shakhtnyy kontaktno-akkumulyatornyy elektrovoz. Gornyy zhurnal. – 1988. -№6. – S.55-57. Print. 9. Sinchuk O.N, Shokarev D.A., Skapa E.I., Guzov E.S., and Karamanits F.I. Sinergeticheskyy tyagovyy asinhronnyy elektrotekhnicheskyy privod dlya kontaktno-akkumulyatornogo dvuhosnogo elektrovoza, (2011), Elektromekhanichni ta energozberigayuchi sistemi, Kremenchuk, Ukraine, KNU, Vip. 4/2011 (16), pp. 65-68. Print. 10. Sinchuk O. N., Sinchuk I. O., Guzov E. S., Shokarev D. A. Tyagovye elektromekhanicheskie komplekxy shakhtnykh kontaktnykh elektrovozov. Elektricheskie i komp'yuternye sistemy. № 15 (2014): pp. 286-291. Print. 11. Stepanenko V.P., Ventslaff V., Deineke R., Vasilenko V.I. Ugol'. 1986, no 12, pp. 32–33. Print.

Поступила 29.05.2017