

В.П. Степаненко

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ И СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ НА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ

Системы электроснабжения открытых горных работ, удаленных от высоковольтных электрических сетей, в основном, питаются от автономных электростанций с двумя поочередно работающими дизель-генераторными установками. Рассмотрены пути снижения расхода дизельного топлива на автономных электростанциях с использованием комбинированных энергосиловых установок КЭСУ. В состав КЭСУ предлагается включать возобновляемые источники и накопители энергии, в качестве источников – ветряные генераторы и солнечные батареи, в качестве накопителей – аккумуляторные батареи и суперконденсаторы КДЭС. Реверсивные электрические схемы КЭСУ на силовых тиристорах и транзисторах IGBT должны принимать рекуперативную энергию. Использование КЭСУ позволит не менее, чем в 3–5 раз снизить расход дизельного топлива. Ключевые слова: открытые работы, электроснабжение, возобновляемые источники, энергия, дизельное топливо, накопители, суперконденсаторы, рекуперация, тиристоры, транзисторы IGBT.

Возобновляемая (пополняемая, альтернативная, восстанавливаемая) энергия извлекается из происходящих на нашей планете природных процессов и ресурсов. Основные источники энергии – ветер, вода, солнечный свет, энергия геотермальная, волн, приливов и отливов. Доля сжигаемой традиционной биомассы в мире постепенно сокращается, а доля возобновляемой энергии растет. Мировое потребление энергии из возобновляемых источников в 2006 г. достигало 5%, в 2010 г. – 16,7%, в 2013 – 21% [1–8].

В России системы электроснабжения открытых работ, удаленных от высоковольтных электрических сетей, в основном, питаются от автономных электростанций с двумя поочередно работающими дизель-генераторными установками. На карьерах эксплуатируются автосамосвалы и другие машины, потреб-

ляющие большие объемы дизельного топлива и горюче-смазочных материалов и загрязняющие окружающую среду [5, 8]. Снизить расход дизельного топлива не менее, чем в 3–5 раз, существенно повысить экологическую безопасность можно путем применения комбинированных энергосиловых установок КЭСУ, в состав которых должны входить возобновляемые источники и накопители энергии. Такие КЭСУ должны обеспечивать прием рекуперативной энергии и автономное электропитание.

На рис. 1 представлена принципиальная тиристорная электрическая схема КЭСУ в режиме рекуперативного торможения электропривода постоянного тока. В процессе торможения энергия, генерируемая в обмотках возбуждения OB_1 и OB_2 и якорей M_1 и M_2 электродвигателей постоянного тока последовательного возбуждения, накапливается аккумуляторной батарее GB и в конденсаторе с двойным электрическим слоем C .

Заряд аккумуляторной батареи и суперконденсатора C производится следующим образом. При открывании тиристора VS_2 обмотки якорей M_1 и M_2 и возбуждения OB_1 и OB_2 оказываются замкнутыми накоротко. При отпирании тиристора VS_1 тиристор VS_2 запирается и его ток уменьшается до нуля. За счет индуктивной энергии, накопленной в обмотках якорей M_1 и M_2 и возбуждения OB_1 и OB_2 двигателей, возникает ЭДС

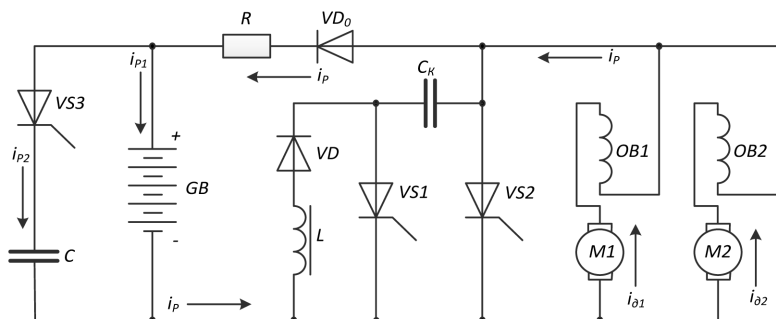


Рис. 1. Принципиальная тиристорная электрическая схема КЭСУ в режиме рекуперативного торможения: M_1, M_2 – обмотки якорей тяговых электродвигателей постоянного тока; OB_1, OB_2 – обмотки последовательного возбуждения; GB – аккумуляторная батарея; R – токоограничивающее сопротивление; C_k – коммутирующий конденсатор; VD_0, VD_1 – диоды; VS_1, VS_2, VS_3 – тиристоры; C – суперконденсатор, L – индуктивный дроссель; i_p – ток рекуперации; i_{p1} – электрический ток заряда аккумуляторной батареи; i_{p2} – электрический ток заряда суперконденсатора

самоиндукции, под действием которой диод VD_0 открывается. Через диод VD_0 и токоограничивающее сопротивление R течет ток – суммарный ток рекуперативного торможения электродвигателей M_1 и M_2 .

$$i_p = i_{д1} + i_{д2} = i_{p1} + i_{p2}$$

В схему включены два накопителя тормозной электрической энергии: аккумуляторная батарея GB и суперконденсатор C . Электрический ток рекуперации при торможении заряжает аккумуляторную батарею GB . При открытом тиристоре VS_3 электрическая энергия накапливается и в суперконденсаторе C .

Если аккумуляторная батарея GB собрана из наливных аккумуляторных элементов, то при заряде под крышкой батарейного ящика может скапливаться водород. Для предотвращения опасности взрыва водорода по сигналу аппаратуры газового контроля тиристор VS_3 открывается, в суперконденсаторе скачкообразно нарастает электрический ток i_{p2} . В наливной аккумуляторной батарее в этот же момент времени зарядный ток i_{p1} падает до нуля и опасность выделения водорода устраняется. Из суперконденсаторов в зарядно-разрядных режимах водород не выделяется и безопасное электрическое рекуперативное торможение и заряд суперконденсаторов может осуществляться вплоть до полной остановки электродвигателей и уменьшения тока в двигателях до 0. Существенно упростить принципиальные электрические схемы и повысить надежность КЭСУ возможно при использовании силовых биполярных транзисторов с изолированным затвором IGBT. Упрощенные схемы КЭСУ постоянного тока с двигателями последовательного возбуждения приведены на рис. 2 и 3. На рис. 2 изображена принципиальная широтно-импульсная электрическая схема КЭСУ в двигательном режиме. Питание электропривода может

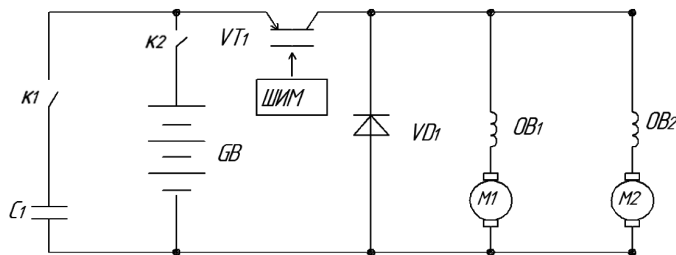


Рис. 2. Принципиальная транзисторная электрическая схема КЭСУ в двигательном режиме

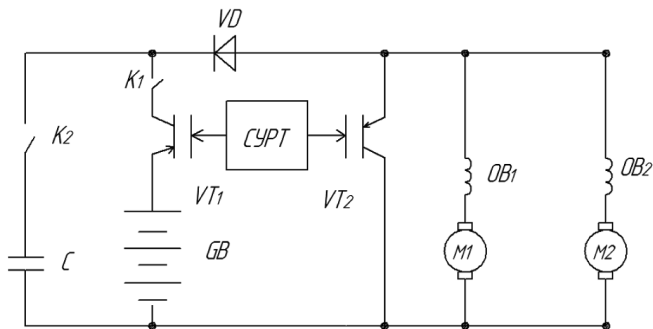


Рис. 3. Принципиальная транзисторная электрическая схема КЭСУ в режиме рекуперативного торможения

осуществляться от суперконденсатора C_1 при включении контактора K_1 или от аккумуляторной батареи GB при включенном контакторе K_2 . При отпирании транзистора VT_1 диод VD_1 запирается и напряжение источника питания поступает на электрические двигатели M_1 и M_2 . Блок ШИМ управляет транзистором VT_1 , плавно изменяя продолжительность импульсов. Среднее значение напряжения на электроприводе плавно регулируется от 0 до напряжения источника питания $U_{\text{ист}}$.

На рис. 3 представлена принципиальная схема КЭСУ в режиме рекуперативного торможения электропривода, выполненного на транзисторах *IGBT* с изолированным затвором VT_1 и VT_2 . Эта схема значительно проще схемы рекуперативного торможения на тиристорах VS , приведенной на рис. 1. Управление процессом электрического торможения и приемом тормозной энергии в схеме на рис. 3 осуществляется блоком СУРТ.

При включении контактора K_1 на рис. 3 в открытом транзисторе VT_1 и запертом VT_2 тормозной электрический ток из обмоток возбуждения OB_1 , OB_2 и якорей двигателей M_1 , M_2 течет через диод VD и заряжает аккумуляторную батарею GB . При включении контактора K_2 заряжаться будет суперконденсатор C , транзистор VT_2 должен быть заперт, а диод VD открыт. После спада зарядных токов в аккумуляторной батарее и суперконденсаторе до нуля управляющий блок СУРТ подает команду на открывание транзистора VT_2 . Контактors K_1 и K_2 остаются включенными, а транзистор VT_2 открывается и замыкает накоротко обмотки электрических двигателей M_1 и M_2 . Когда ток короткого замыкания в двигателях M_1 и M_2 достигнет величины уставки, блок СУРТ подает команду на запираение транзистора VT_2 и отпирание VT_1 . Далее процесс рекуперативного

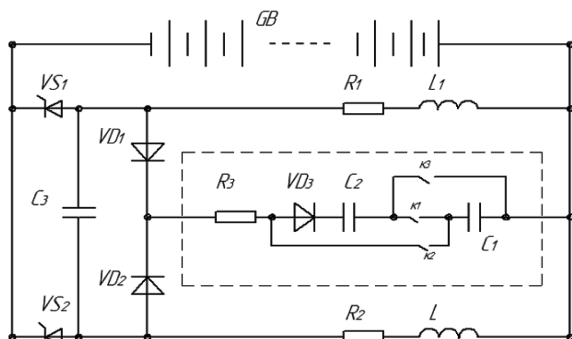


Рис. 4. Принципиальная тиристорная электрическая схема устройства повышения энергетических показателей КЭСУ

торможения продолжается до того момента, когда электрическая и кинетическая энергии привода станут равными нулю.

На рис. 4 представлена принципиальная тиристорная электрическая схема устройства повышения энергетических показателей КЭСУ. Это устройство, также, как и схемы, изображенные на рис. 1 и 3, работает по принципу электромагнитного дросселя [9, 10]. В данном случае энергия из аккумуляторной батареи GB поочередно запасается в индуктивностях L и L_1 , а затем через диоды VD_1 и VD_2 сбрасывается в емкости C_1 и C_2 . Заряд индуктивности происходит до заданного значения максимального тока (например, $I_{\max} = 2000$ А), затем цепь тока рвется тиристором VS_1 или VS_2 и ток i вынужден течь через коммутирующую емкость C_3 . Периодичность отпираания и запираания тиристоров VS_1 и VS_2 задается блоком управления.

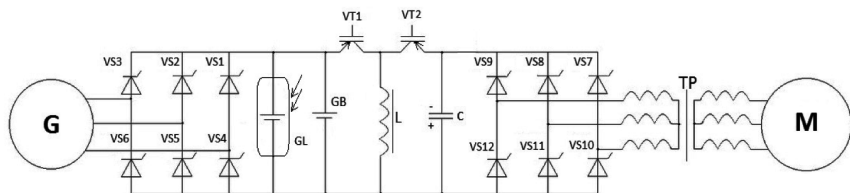


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема КЭСУ системы автономного электроснабжения: G – ветряной (дизельный) генератор; M – асинхронный электродвигатель; VS_1 – VS_6 – трехфазный мостовой выпрямитель; VS_7 – VS_{12} – трехфазный мостовой инвертор; TP – трансформатор; GB – аккумуляторная батарея; GL – солнечная батарея; VT_1 , VT_2 – биполярные транзисторы с изолированным затвором; VS – тиристоры; L – электромагнитный дроссель с сердечником; C – суперконденсатор

КПД конденсатора определяется отношением энергии, возвращенной в источник (сеть), к энергии, затраченной источником на заряд, а также количеством циклов. При этом КПД конденсатора КДЭС меняется в процессе заряда и разряда. Расчетом определяется среднее значение КПД цикла передачи энергии дроссель – конденсатор при заряде и конденсатор-дроссель при разряде. Моделирование показало, что КПД КДЭС в зависимости от режимов работы колеблется от 0,82 до 0,98. Срок службы конденсаторов зависит не только от числа циклов перезаряда, но и от степени разряда конденсатора при каждом цикле [9, 10].

На рис. 5 приведена принципиальная электрическая схема КЭСУ системы автономного электроснабжения.

На рис. 5 к автономным источникам электрической энергии – дизель-генераторной установке (или к ветровому генератору G) подключен трехфазный мостовой управляемый выпрямитель на тиристорах $VS_1–VS_6$. Параллельно к выходу выпрямителя $VS_1–VS_6$ подключены солнечная GL и аккумуляторная батарея GB . Схема накачки энергией суперконденсатора C , представленная на рис. 5, работает на принципе электромагнитного дросселя. В схему накачки входят биполярные транзисторы с изолированным затвором VT_1 и VT_2 , электромагнитный дроссель с сердечником L . При отпирании транзистора VT_1 энергия из солнечной и аккумуляторной батарей запасается в дросселе L . Суперконденсатор C подключен к входу инвертора напряжения, собранного на тиристорах $VS_7–VS_{12}$. Накопление электрической энергии в дросселе L происходит до заданного значения максимального тока (например, $I_{\max} = 3000$ А). Затем транзистор VT_1 размыкает цепь тока в дросселе. Одновременно с запирающим VT_1 открывается транзистор VT_2 и очередная порция энергии, запасенной в дросселе L , поступает в суперконденсатор C . Вследствие этого напряжение на суперконденсаторе повышается на некоторую величину. Частоту и продолжительность циклов отпирания и запираения транзисторов VT_1 и VT_2 задает блок управления. К выходу инвертора подключен трансформатор Tr , к вторичной обмотке которого могут подключаться различные предприятия – промышленного и жилищно-коммунального комплексов.

Выводы

1. Повысить экологическую безопасность, снизить расход дизельного топлива не менее, чем в 3–5 раз возможно, используя комбинированные энергосиловые установки КЭСУ с возобновляемыми источниками энергии.

2. Комбинированные энергосиловые установки КЭСУ целесообразно изготавливать в передвижном и стационарном исполнениях. Передвижные КЭСУ и размещать на карьерах, стационарные КЭСУ использовать для питания электроэнергией жилых поселков, обогатительных фабрик и других объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степаненко В. П., Сорин Л. Н. Энергоэффективность подземной локомотивной откатки с гибридными накопителями энергии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 6. – С. 135–140.

2. Степаненко В. П., Сорин Л. Н. Актуальность ресурсо- и энергосбережения подземных рудничных локомотивов с комбинированными накопителями энергии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 5. – С. 323–328.

3. Степаненко В. П., Белозеров В. И. Применение комбинированных (гибридных) энергосиловых установок горнотранспортных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 2. – С. 174–181.

4. Степаненко В. П. Применение комбинированных (гибридных) энергосиловых установок в горной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 11. – С. 322–328.

5. Степаненко В. П., Белозеров В. И., Сорин Л. Н. Перспективы применения комбинированных накопителей энергии на карьерном железнодорожном транспорте // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 5. – С. 317–322.

6. Степаненко В. П. Электровозная откатка на урановых рудниках Советско-германского акционерного общества «Висмут». 1980–1987 гг. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 6. – С. 141–150.

7. Степаненко В. П. Исследование зависимости коэффициента сцепления рудничных электровозов от абразивности горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 2. – С. 168–173.

8. Белозеров В. И., Степаненко В. П. Потребность создания карьерных локомотивов с накоплением энергии // Горная промышленность. – 2014. – № 5. – С. 76.

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

10. Денщикова К. К. Комбинированные энергетические установки на основе суперконденсаторов. Конференция ОВИТ РАН «Результаты фундаментальных исследований в области энергетики и их практическое значение». Москва, 22–26 марта 2008 г. – М., 2008. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Степаненко Валерий Павлович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: valestepanenko@yandex.ru, МГИ НИТУ «МИСиС».

V.P. Stepanenko

APPLICATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES AND SUPERCONDENSERS IN OPEN PIT MINING

Open pit mines located far from high-voltage electric mains are supplied from independent power stations with two alternative Diesel-generator sets. This article analyzes ways of reducing diesel fuel flow rate at stand-alone power plants using combined power plants KESU. It is suggested to include KESU structure with renewable energy sources, such as windmills and solar batteries, and with energy storage units, such as accumulator batteries and supercondensers KDES. Reversal circuits of KESU, with power thyristors and IGBT transistors, should intake restored energy. The use of KESU will allow not less than 3–5 times reduction in diesel fuel consumption.

Key words: open pit mining, power supply, renewable sources, energy, diesel fuel, storage units, supercondensers, regeneration, thyristors, IGBT transistors.

AUTHOR

Stepanenko V.P., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
e-mail: valesstepanenko@yandex.ru,
Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Stepanenko V. P., Sorin L. N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 6, pp. 135–140.
2. Stepanenko V. P., Sorin L. N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 5, pp. 323–328.
3. Stepanenko V. P., Belozherov V. I. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 2, pp. 174–181.
4. Stepanenko V. P. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2014, no 11, pp. 322–328.
5. Stepanenko V. P., Belozherov V. I., Sorin L. N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 5, pp. 317–322.
6. Stepanenko V. P. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 6, pp. 141–150.
7. Stepanenko V. P. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 2, pp. 168–173.
8. Belozherov V. I., Stepanenko V. P. *Gornaya promyshlennost'*. 2014, no 5, pp. 76.
9. Shevlyugin M. V. *Resurso- i energosberegayushchie tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte i v metropolitenakh, realizuemye s ispol'zovaniem nakopiteley energii* (Resource- and energy-saving technologies in railway transport and underground railways using energy storage units), Doctor's thesis, Moscow, MGUPS (MIIT), 2009, pp. 51.
10. Denshchikov K. K. *Kombinirovannyye energeticheskie ustanovki na osnove superkondensatorov. Konferentsiya OVIT RAN «Rezultaty fundamental'nykh issledovaniy v oblasti energetiki i ikh prakticheskoe znachenie»*. Moskva, 22–26 marta 2008 g. (Combined power plants based on supercondensers. Fundamental research findings in power engineering and their practical importance: Conference proceedings. Department of Nano and Information Technologies, Russian Academy of Sciences. Moscow, 22–26 March 2008), Moscow, 2008.