

**ВИБІР ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
ЗБІЛЬШЕННЯ ЧИСЛА ЕКСПЛУАТОВАНИХ НА ГОРИЗОНТІ  
ЕЛЕКТРОВОЗІВ ШАХТНОГО ТРАНСПОРТУ З ІНДУКЦІЙНОЮ  
ПЕРЕДАЧЕЮ ЕНЕРГІЇ**

© S. Dybrin

**CHOICE OF CAPACITIVE ENERGY STORAGE TO INCREASE THE  
NUMBER OF ELECTRIC LOCOMOTIVES OF MINE TRANSPORT WITH  
INDUCTIVE ENERGY TRANSFER THAT ARE OPERATED ON THE  
HORIZON**

**Мета.** Вибір серед повністю комерціалізованих пропозицій світового ринку суперконденсаторів конкретного ємнісного накопичувача енергії для збільшення числа експлуатованих на горизонті електровозів (В14-900) шахтного безконтактного транспорту без вдосконалення системи живлення.

**Методика дослідження.** Вирішення поставленої задачі досягнуто завдяки багатокритеріальному аналізу із застосуванням методу зваженої суми критеріїв.

**Результати дослідження.** Аналіз світового ринку суперконденсаторів дозволив визначити виробників, що мають в асортименті продукцію, орієнтовану для застосування на транспорті. Серед всіх виробників тільки Maxwell Technologies Inc. (MXWL), Nesscap, і IOXUS мають повністю комерціалізовані рішення та надають всю технічну інформацію, необхідну для обґрунтованого вибору. Запропоновано обмежити вибір ємнісного накопичувача готувими модульними рішеннями з причини того, що вони пройшли увесь цикл інженерного опрацювання. Розроблено методику вибору ємнісного накопичувача заданої енергоємності для заданих умов шахтного безконтактного транспорту. Розраховано параметри необхідних блоків модулів для можливих випадків комбінацій швидкісних станів рухомих складів на лінії. Для установки на безконтактний шахтний електровоз (В14-900) обрано блок суперконденсаторів, що складається з 8 модулів iMOD064V125A23 виробника Ioxus. Врахування таких специфічних критеріїв, як мінімальна температура блоку, мінімальний еквівалентний послідовний опір блоку призвело до того, що отримане значення фактичної енергоємності блоку модулів виявилось таким, що перевищує необхідне. Це розширює межі використання накопичувального блоку (евакуація, маневрування за відсутності живлення від мережі й ін.) і компенсує погіршення основних показників блоку з часом.

**Наукова новизна** полягає в тому, що запропонована методика вибору ємнісного накопичувача енергії враховує умови та особливості роботи унікального виду шахтного транспорту – транспорту з індукційною передачею енергії.

**Практичне значення.** Впровадження результатів дослідження дозволить збільшити кількість експлуатованих на горизонті рухомих складів без вдосконалення системи живлення.

**Ключові слова:** ємнісний накопичувач енергії, шахтний транспорт з індукційною передачею енергії, безконтактний шахтний електровоз

**Постановка проблеми.** Задачу можливості збільшення числа експлуатованих на горизонті електровозів (В14-900) шахтного безконтактного транспорту за незмінних інших умов пов'язано з вирівнюванням графіку навантаження тягової перетворювальної підстанції ТОВ1-160-1,2к-4000-УХЛ4. На перших етапах дослідження цього питання було здійснено аналіз складових навантаження тягової перетворювальної підстанції безконтактного транспорту [1] і можливості зниження максимуму навантаження тягової перетворювальної підстанції безконтактного транспорту, а також пошук і аналіз можливого технічного рішення по збільшенню числа використовуваних електровозів (В14-900). У результаті запропоновано знизити значення потужності, що передається двигунам, встановивши на електровозі автономне джерело енергії із заданою потужністю (джерело потужності). Розраховано значення необхідної енергоємності автономного джерела, зроблено висновок про доцільність подальшого аналізу, розрахунку і вибору конкретного накопичувача енергії і схеми його підключення на електровозі для збільшення числа використовуваних рухомих складів на лінії [7, 8].

**Результати дослідження.** Аналіз світового ринку суперконденсаторів дозволив визначити виробників, що мають в асортименті продукцію, орієнтовану для застосування на транспорті [2]:

- основні світові виробники суперконденсаторів :
  - Maxwell Technologies Inc. (MXWL);
  - Nesscap;
  - IOXUS;
  - Yunasko;
- основні виробники і проекти по виробництву суперконденсаторів в Росії:
  - ЗАО НПО Технокор;
  - ЗАО Элит (ООО Элитех);
  - ООО МНПО "ЭКОНД";
  - ВСКБ «РИКОН»;
  - ОАО Элеконд;
  - ЗАО НПП «Инкар-М»;
  - НИИ Гириконд;
  - розробки Товариства енергетичних і електромобільних проектів;
  - НИИКУЭ;
  - ИНЭП ОИВТ РАН;
  - будівництво заводу Nesscap в Росії;
  - проект виробництва конденсаторів в кластері в Академмістечку.

Подальший аналіз показав, що серед перерахованих виробників тільки обмежена кількість має повністю комерціалізовані рішення.

Якнайповнішу технічну інформацію щодо пропонованих ємнісних накопичувачів, необхідну для їх обґрунтованого вибору, вдалося отримати у таких світових виробників, як Maxwell Technologies Inc. (MXWL); Nesscap; IOXUS. Ці

виробники пропонують як окремі конденсатори, так і готові модулі, призначені для запуску двигунів, мережевої корекції електропостачання, роботи в джерелах безперебійного живлення, транспортних підсистемах, системах рекуперації, вітроенергетичних установках, гібридних накопичувачах енергії й т. п.

Найбільш доцільно обмежити вибір ємнісного накопичувача готовими модульними рішеннями з причини того, що вони вже пройшли увесь цикл інженерного опрацювання. При їх створенні враховано й досліджено такі параметри, як тепловиділення і тепловідвід, максимальна напруга послідовно сполучених модулів, максимальний безперервний (середньоквадратичний) струм, максимальний струм витоку, початковий еквівалентний послідовний опір модуля. Модулі забезпечено пристроями контролю основних параметрів, балансування напруги конденсаторів і захисту, вони мають конкретні масогабаритні показники.

Необхідні для вибору параметри пропонованих модулів (див. [4, 5, 6]):

- номінальна ємність  $C_{ном.мод}$ , Ф;
- номінальна напруга модуля  $U_{ном.мод}$ , В;
- максимальна напруга при послідовному з'єднанні модулів  $U_{max.мод.послід}$ , В;
- максимальний струм витоку  $I_{витоку.мод}$ , мА;
- термічний опір модуля  $R_t$ , °С/Вт;
- максимальна допустима робоча температура модуля  $t_{max.мод}$ , °С (виробниками заявлено 65 °С);
- еквівалентний послідовний опір  $ESR_{DC}$ , мОм;
- спосіб охолодження модуля (природний або повітрям, що нагнітається);
- лінійні розміри модуля, мм (висота  $H$ , ширина  $W$ , довжина  $L$ );
- маса  $m$ , кг

Задаймося (див. [7, табл. 1.]): шуканою величиною енергії автономного джерела потужності  $W_{a.d}$  (Вт·ч); необхідною добавкою потужності від автономного джерела потужності  $P_{a.d}$  (Вт); граничним мінімальним значенням ККД роботи автономного джерела потужності  $\eta_{гран.a.d}$ ; очікуваною напругою на виході фільтру при роботі автономного джерела  $U_{н.в(a.d)}$  (В). Розрахуємо відсутні необхідні для вибору параметри пропонованих модулів:

- рекомендована виробниками мінімальна напруга модуля, В;

$$U_{min.мод} = U_{ном.мод} / 2; \quad (1)$$

- струм короткого замикання, А:

$$I_{кз.мод} = U_{ном} / ESR_{DC}; \quad (2)$$

- максимальний безперервний (середньоквадратичний) струм модуля (струм, який може бути використаний у межах допустимого діапазону температур роботи блоку; у даних виробників це діапазон  $-40^{\circ}\text{C} \sim +65^{\circ}\text{C}$ ), А:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{\Delta t}{R_i \cdot ESR_{DC}}}, \quad (3)$$

де  $\Delta t$  – допустиме прийняте збільшення температури блоку по відношенню до температури довкілля при протіканні шуканого струму, °С;

- енергія, що запасається модулем, в діапазоні робочої напруги, Вт·год :

$$E_{\max.\text{мод}} = \frac{C_{\text{ном.мод}} \cdot (U_{\text{ном.мод}}^2 - U_{\text{мін.мод}}^2)}{2 \cdot 3600}; \quad (4)$$

- питома енергоємність модуля по масі, Вт·год/кг :

$$E_{\max.\text{мод.пит.т}} = E_{\max.\text{мод}} / m; \quad (5)$$

- питома енергоємність модуля за об'ємом, Вт·год/м<sup>3</sup>:

$$E_{\max.\text{мод.пит.V}} = E_{\max.\text{мод}} / \left( \frac{H \cdot W \cdot L}{1000^3} \right); \quad (6)$$

- необхідна енергоємність блоку модулів (з урахуванням втрат у модулях і перетворювачі), Вт·год:

$$E_{\text{бл.мод}} = \frac{W_{a.\text{д}}}{\eta_{\text{гран.а.д}}}; \quad (7)$$

- необхідна потужність від блоку модулів (з урахуванням втрат у модулях і перетворювачі), Вт:

$$P_{\text{бл.мод}} = \frac{P_{a.\text{д}}}{\eta_{\text{гран.а.д}}}; \quad (8)$$

- необхідна кількість модулів (максимальна кількість з розрахованих по енергоємності та необхідній мінімальній напрузі модулів), штук:

$$N_{\text{мод}} = \max \left( \left[ \frac{E_{\text{бл.мод}}}{E_{\max.\text{мод}}} \right]; \left[ \frac{U_{\text{н.в(а.д.)}}}{U_{\text{мін.мод}}} \right] \right); \quad (9)$$

- вага необхідних модулів, кг:

$$m_{N.\text{мод}} = m \cdot N_{\text{мод}}; \quad (10)$$

- об'єм необхідних модулів, м<sup>3</sup>:

$$V_{N.\text{мод}} = \frac{H \cdot W \cdot L}{1000^3} \cdot N_{\text{мод}}; \quad (11)$$

- максимальна робоча напруга блоку послідовних модулів, В:

$$U_{\max.N.\text{мод}} = U_{\text{ном.мод}} \cdot N_{\text{мод}}; \quad (12)$$

- мінімальна робоча напруга блоку послідовних модулів, В:

$$U_{\text{мін.}N.\text{мод}} = U_{\text{мін.мод}} \cdot N_{\text{мод}}; \quad (13)$$

- еквівалентний послідовний опір блоку послідовних модулів, мОм:

$$ESR_{DC.N.\text{мод}} = ESR_{DC} \cdot N_{\text{мод}}; \quad (14)$$

• розрахунковий середньоквадратичний струм розряду блоку послідовних модулів при  $U_{\max.N.мод}$  і  $U_{\min.N.мод}$  відповідно, А:

$$I_{U.\max.N.мод} = P_{бл.мод} / U_{\max.N.мод}, \quad (15)$$

$$I_{U.\min.N.мод} = P_{бл.мод} / U_{\min.N.мод}. \quad (16)$$

Вибір ємнісного накопичувача на електровоз почнемо з визначення теплового режиму роботи модулів:

• прийнемо, що у вибухозахищеній оболонці, в якій знаходяться модулі, зроблено удосконалення, спрямовані на максимальне відведення тепла від модулів (теплопровідні кріплення, теплопровідна основа, примусова циркуляція повітря в камері, обрешетка камери зовні й т.п.), тоді термічний опір модулів збільшиться настільки замало, що його можна залишити таким, як заявлено виробником;

• згідно з досвідом експлуатації шахтного безконтактного транспорту прийнемо, що температура навколишнього повітря на електровозі не перевищує  $t_{зовн} = 35^\circ\text{C}$ ;

• розрахуємо максимально допустиму зміну в температурі блоку при протіканні шуканого струму:

$$\Delta t_{\max} = t_{\max.мод} - t_{зовн} = 65 - 35 = 30^\circ\text{C}.$$

Безпосередній вибір блоку модулів здійснимо в такій послідовності:

1) зменшуючи  $\Delta t$  (починаючи з  $\Delta t_{\max}$ ), розрахуємо по (3) максимальні безперервні (середньоквадратичні) струми послідовних модулів  $I_{RMS}$  (зменшуватимемо  $\Delta t$  поки знаходитиметься хоча б один блок (див. п. 2) з прийнятними параметрами);

2) відповідно до кожного  $\Delta t$  виберемо найбільш оптимальний блок модулів згідно з наступним алгоритмом:

a) серед усіх варіантів виберемо ті, для яких виконуватимуться умови по напрузі:

$$U_{\min.N.мод} > U_{н.в.(а.д)},$$

$$U_{\max.N.мод} < U_{\max.мод.послед};$$

b) серед вибраних блоків модулів відберемо ті, для яких виконуватиметься умова по струму :

$$I_{U.\min.N.мод} < I_{RMS};$$

c) якщо не один з варіантів не задовольняє пунктам a і b, збільшимо необхідну кількість модулів на одиницю ( $N_{мод.рез} = N_{мод} + 1$ ), повторимо розрахунок параметрів модулів – згідно з (10)–(16) і вибір блоку модулів – відповідно до п. 2;

d) серед відібраних виберемо блок модулів, що має найменші значення еквівалентного послідовного опору, об'єму, кількості модулів:

$$ESR_{DC.N.мод} \rightarrow \min; V_{N.мод} \rightarrow \min; N_{мод} \rightarrow \min.$$

Вибір саме цих критеріїв обумовлений тим, що :

- високий еквівалентний послідовний опір  $ESR_{DC.N.мод}$  викликає: підвищені втрати енергії, що веде до погіршення техніко-економічних показників проекту по установці блоку ємнісних модулів на електровоз; підвищене тепловиділення внаслідок підвищених втрат енергії, що веде до погіршення теплових умов експлуатації і, як наслідок, – до зменшення терміну служби блоку ємнісних модулів;

- дуже обмежений вільний простір для установки нового устаткування на безконтактному електровозі;

- менша кількість модулів у блоці  $N_{мод}$  призводить до поліпшення показників надійності блоку, зменшення числа додаткових з'єднань у блоці, що, у свою чергу, веде до зниження втрат і більшої надійності.

В умовах відсутності експертних оцінок, чітких уявлень про співвідношення вибраних критеріїв по важливості й рівномірності їх загальної шкали (та ін.) для ухвалення багатокритеріального рішення скористаємося методом зваженої суми критеріїв [3]:

- нормалізуємо критерії  $V_{N.мод}$ ,  $ESR_{DC.N.мод}$ ,  $N_{мод}$  (нормалізоване значення  $V'_{N.мод.i}$  дорівнюватиме 1, якщо відповідне значення  $V_{N.мод}$  мінімальне, і 0 – якщо максимальне) :

$$V'_{N.мод.i} = 1 - \frac{V_{N.мод.i} - V_{N.мод.min}}{V_{N.мод.max} - V_{N.мод.min}} ;$$

$$ESR'_{DC.N.мод.i} = 1 - \frac{ESR_{DC.N.мод.i} - ESR_{DC.N.мод.min}}{ESR_{DC.N.мод.max} - ESR_{DC.N.мод.min}} ;$$

$$N'_{мод.i} = 1 - \frac{N_{мод.i} - N_{мод.min}}{N_{мод.max} - N_{мод.min}} ;$$

- враховуючи, що для всіх варіантів об'єми блоків модулів не менші за об'єм еквівалентного куба зі стороною 0,4 м і не перевищують об'єм еквівалентного куба зі стороною 0,6 м, задамося ваговими коефіцієнтами для даних критеріїв:

$$w_V = 0,1, \quad w_{ESR} = 0,3, \quad w_N = 0,6;$$

- здійснимо згортку нормалізованих критеріїв для всіх блоків модулів, відібраних за пунктами  $a$  і  $b$ , визначивши значення зваженої суми критеріїв:

$$F_i(\hat{f} | w) = w_V \cdot V'_{N.мод.i} + w_{ESR} \cdot ESR'_{DC.N.мод.i} + w_N \cdot N'_{мод.i} ;$$

- серед даних блоків модулів, відібраних за пунктами  $a$  і  $b$ , виберемо блок з найбільшою зваженою сумою критеріїв:

$$F_i(\hat{f} | w) \rightarrow \max ;$$

3) серед блоків модулів, відібраних відповідно до кожного  $\Delta t$ , виберемо компромісний варіант, при якому:

$$\Delta t \rightarrow \min ; \quad ESR_{DC.N.мод} \rightarrow \min ; \quad V_{N.мод} \rightarrow \min ;$$

Вибір  $\Delta t$  в якості критерію обумовлений тим, що:

– загальне підвищення температури модуля веде до незначного росту еквівалентного послідовного опору  $ESR$  і зменшенню ємності в поточній експлуатації [4, 5, 6];

– згідно з даними виробників термін служби модулів дуже залежить від температури експлуатації та варіюється від 1000-1500 годин при максимальній експлуатаційній температурі (65°C) до 10 років – при температурі 25°C (під терміном служби мається на увазі, що за вказаний час при відповідній температурі ємність зменшиться на 20-25 %, а  $ESR$  збільшиться більше, ніж на 100 %) [4, 5, 6].

Знову скористаємося методом зваженої суми критеріїв [3]:

- нормалізуємо значення за вибраними критеріями:

$$\Delta t'_i = 1 - \frac{\Delta t_i - \Delta t_{\min}}{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}} ;$$

$$ESR'_{DC.N.мод.i} = 1 - \frac{ESR_{DC.N.мод.i} - ESR_{DC.N.мод.\min}}{ESR_{DC.N.мод.\max} - ESR_{DC.N.мод.\min}} ;$$

$$V'_{N.мод.i} = 1 - \frac{V_{N.мод.i} - V_{N.мод.\min}}{V_{N.мод.\max} - V_{N.мод.\min}} ;$$

- задамося ваговими коефіцієнтами для даних критеріїв:

$$w_{\Delta t} = 0,5, \quad w_{ESR} = 0,25, \quad w_V = 0,25 ;$$

- здійснимо згортку нормалізованих критеріїв:

$$F_i(\hat{f} | w) = w_{\Delta t} \cdot \Delta t'_i + w_{ESR} \cdot ESR'_{DC.N.мод.i} + w_V \cdot V'_{N.мод.i}$$

- виберемо блок модулів з найбільшою зваженою сумою критеріїв:

$$F_i(\hat{f} | w) \rightarrow \max .$$

Вибір здійснимо для кожного з варіантів відповідно до [7] Отримані результати приведено в табл. 1.

Розрахуємо, для порівняння, параметри необхідних блоків модулів, якщо для забезпечення випадків В, С, D, Е, F використовувати модулі, вибрані для випадку А (табл. 2).

Блок, що відповідає випадку А і складається з 8 модулів іMOD064V125A23 виробника Iohus, за всіма параметрами перевищує відповідні значення в інших випадках (В, С, D, Е, F – див. табл. 2) і може бути прийнятий до використання на безконтактному шахтному електровозі для збільшення числа експлуатованих на горизонті рухомих складів шахтного безконтактного транспорту при незмінних інших умовах.

Таблиця 1

	Вибраний модуль для блоку	$N_{\text{мод.рез}}$ , ШТ	$m_{\text{мод.рез}}$ , КГ	$V_{\text{мод.рез}}$ мод.рез, м <sup>3</sup>	$ESR_{\text{DC.мод.рез}}$ , МОм	$\Delta t^{\circ}$ , °C	$I_{\text{RMS}}(\Delta t^{\circ})$ , А	$I_{U_{\text{min.мод.рез}}}$ , А	$U_{\text{н.в. (з.д.)}}$ , В	$U_{\text{min.мод.рез}}$ , В	Необхідна енергоємність $W_{\text{бл.к}}$ , Вт·год.	Енергоємність вибраного блоку модулів, Вт·год.
Випадок А	Ioxus iMOD064V125A23	8	192	0,1431	44	10	92,17	92,116	200,58	259,2	266,7	458,4
Випадок В	Ioxus iMOD080V100A23	5	145	0,11	34,5	13	104,66	101,44	198,42	202,5	229,5	358,8
Випадок С	Ioxus iMOD096V083A23	5	175	0,132	41,5	12	100,55	98,257	200,58	243	119,1	428,1
Випадок D	Ioxus iMOD096V083A23	4	140	0,1	33,2	4	58,05	54,41	191,94	194,4	118,15	342,5
Випадок E	Ioxus iMOD080V100A23	5	145	0,11	34,5	27	150,83	101,44	198,42	202,5	102,5	358,8
Випадок F	Ioxus iMOD096V083A23	4	140	0,1	33,2	6	71,1	68,44	193,72	194,4	66,4	342,5

Таблиця 2

	Вибраний модуль для блоку	$N_{\text{мод.рез}}$ , ШТ	$m_{\text{мод.рез}}$ , КГ	$V_{\text{мод.рез}}$ мод.рез, м <sup>3</sup>	$ESR_{\text{DC.мод.рез}}$ , МОм	$\Delta t^{\circ}$ , °C	$I_{\text{RMS}}(\Delta t^{\circ})$ , А	$I_{U_{\text{min.мод.рез}}}$ , А	$U_{\text{н.в. (з.д.)}}$ , В	$U_{\text{min.мод.рез}}$ , В	$U_{\text{max.мод.рез}}$ , В	Необхідна енергоємність $W_{\text{бл.к}}$ , Вт·год.	Енергоємність вибраного блоку модулів, Вт·год.
Випадок А	Ioxus iMOD064V125A23	8	192	0,1431	44	10	92,17	92,116	200,58	259,2	518,4	266,7	458,4
Випадок В	Ioxus iMOD064V125A23	7	168	0,125	38,5	10	92,17	90,57	198,42	226,8	453,6	229,5	401,1
Випадок С		7	168	0,125	38,5	14	109,1	105,28	200,58	226,8	453,6	119,1	401,1
Випадок D		6	144	0,107	33	4	58,3	54,4	191,9	194,4	388,8	118,15	343,8
Випадок E		7	168	0,125	38,5	10	92,17	90,57	198,42	226,8	453,6	102,5	401,1
Випадок F		6	144	0,107	33	6	71,4	68,44	193,72	194,4	388,8	66,4	343,8



### Висновки

1. Врахування при виборі таких обмежень, як зміна в температурі блоку ( $\Delta t \rightarrow \min$ ), об'єм блоку модулів ( $V_{N..mod} \rightarrow \min$ ), еквівалентний послідовний опір ( $ESR_{DC.N..mod} \rightarrow \min$ ), кількість модулів у блоці ( $N_{mod} \rightarrow \min$ ) привели до того, що (табл. 1):
  - отримані значення фактичної енергоємності блоків модулів виявилися такими, що значно перевищують необхідні;
  - для випадків А і С значення мінімальної робочої напруги блоків модулів  $U_{\min.N..mod}$  виявилися такими, що значно перевищують очікувані напруги на виході фільтру при роботі автономного джерела  $U_{н.в(а.д.)}$ ;
  - зазначені наслідки дозволять розширити межі використання накопичувального блоку поза умов досліджуваних випадків (додатково: евакуація, маневрування за відсутності живлення від мережі й ін.) і компенсувати погіршення основних показників блоку з часом.
2. Блок модулів, вибраний для випадку А, за всіма параметрами може бути використаним в інших випадках (В, С, D, E, F – див. табл. 2).
3. Значна вага блоків модулів дозволить поліпшити показники електровоза по зчепленню.
4. Незначне збільшення температури блоків  $\Delta t$  при струмі в кінці розряду  $I_{U.\min.N..mod}$  (коли напруга наближується до  $U_{\min.N..mod}$ ) дозволить розраховувати на тривалий термін експлуатації блоку модулів без істотного погіршення його основних показників з часом.
5. Для установки на електровоз (В14-900) з метою збільшення числа експлуатованих на горизонті рухомих складів шахтного безконтактного транспорту при незмінних інших умовах обираємо блок, що відповідає випадку А і складається з 8 модулів iMOD064V125A23 виробника Ioxus.

### Перелік посилань

1. Dybrin, S.V., Syveryn, Y.S. (2014) Составляющие нагрузки тяговой преобразовательной подстанции бесконтактного шахтного транспорта. *Гірнична електромеханіка та автоматика*: Наук.-техн. зб.- Дніропетровськ: РВК НГУ.- Вип.92. – С. 37-40.
2. Мировой и российский рынок суперконденсаторов для транспорта (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: [http://gosnab.ru/gotovye\\_issledovaniya/gotovie\\_issl/elektrotehnika\\_i\\_elektronika/superkondensatory\\_2013.html](http://gosnab.ru/gotovye_issledovaniya/gotovie_issl/elektrotehnika_i_elektronika/superkondensatory_2013.html). Загол. з екрана.
3. Метод взвешенной суммы критериев в анализе многокритериальных решений: pro et contra, БИЗНЕС-ИНФОРМАТИКА №3(25)–2013 г.
4. Ioxus. Our modules (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.ioxus.com/english/products/modules/>. Загол. з екрана.
5. Nesscap ultracapacitors. Module. (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: [http://www.nesscap.com/ultracapacitor/EDLC/Supercapacitor/high\\_voltage\\_supercapacitor\\_module.jsp](http://www.nesscap.com/ultracapacitor/EDLC/Supercapacitor/high_voltage_supercapacitor_module.jsp). Загол. з екрана.

6. Maxwell Technologies. Ultracapacitor Modules. Current Products (Електрон. ресурс) / Спосіб доступу: URL: <http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/modules>. Загол. з екрана.
7. Dybrin, S.V. (2018). *Обґрунтування енергоємності накопичувача енергії для забезпечення збільшення числа експлуатованих на горизонті електровозів шахтного транспорту з індукційною передачею енергії*. Гірничая електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – Дніпро: РВК НГУ. – Вип. 99.
8. Dybrin, S.V., Tolstov, O.V., Buriak, A.O. (2018). Вибір типу акумуляючого елемента накопичувача енергії для забезпечення збільшення числа електровозів. *Гірничая електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – Дніпро: РВК НГУ. — Вип. 99.*

## АННОТАЦІЯ

**Цель.** Выбор среди полностью коммерциализированных предложений мирового рынка суперконденсаторов конкретного емкостного накопителя энергии для увеличения числа эксплуатируемых на горизонте электровозов (В14-900) шахтного бесконтактного транспорта без усовершенствования системы питания.

**Методика исследования.** Решение поставленной задачи достигнуто благодаря многокритериальному анализу с применением метода взвешенной суммы критериев.

**Результаты исследования.** Анализ мирового рынка суперконденсаторов позволил определить производителей, имеющих в ассортименте продукцию, ориентированную на применение на транспорте. Среди всех производителей только Maxwell Technologies Inc. (MXWL), Nesscap, и IOXUS имеют полностью коммерциализированные решения и предоставляют всю техническую информацию, необходимую для обоснованного выбора. Предложено ограничить выбор емкостного накопителя готовыми модульными решениями по причине того, что они прошли весь цикл инженерной обработки. Разработана методика выбора емкостного накопителя заданной энергоемкости для заданных условий шахтного бесконтактного транспорта. Рассчитаны параметры необходимых блоков модулей для возможных случаев комбинаций скоростных состояний подвижных составов на линии. Для установки на бесконтактный шахтный электровоз (В14-900) выбран блок суперконденсаторов, состоящий из 8 модулей iMOD064V125A23 производителя Ioxus. Учет таких специфических критериев, как минимальная температура блока, минимальный эквивалентное последовательное сопротивление блока привел к тому, что полученное значение фактической энергоемкости блока модулей оказалось превышающим необходимое. Это расширяет границы использования накопительного блока (эвакуация, маневрирование при отсутствии питания от сети и др.) и компенсирует ухудшение основных показателей блока со временем.

**Научная новизна** заключается в том, что предложенная методика выбора емкостного накопителя энергии учитывает условия и особенности работы уникального вида шахтного транспорта – транспорта с индукционной передачей энергии.

**Практическое значение.** Внедрение результатов исследования позволит увеличить количество эксплуатируемых на горизонте подвижных составов без усовершенствования системы питания.

**Ключевые слова:** емкостной накопитель энергии, шахтный транспорт с индукционной передачей энергии, бесконтактный шахтный электровоз

## **ABSTRACT**

**Purpose.** Calculation and selection of a capacitive energy storage to increase the number of mine non-contact electric locomotives that operated on the horizon.

**The methodology** of research is a multi-criteria analysis by weighted sum of criteria.

**Findings.** Analysis of the world market of supercapacitors allowed us to determine the manufacturer with range of products that focuses on the use of transport. Among all the producers only Maxwell Technologies Inc. (MXWL), Nesscap, and IOXUS have a fully commercialized solutions and provide all technical information necessary for informed choice. It is proposed to limit the choice of capacitive storage by ready-made modular solutions due to the fact that they have passed the entire cycle of engineering processing. The method of choice of the capacitive storage device of the set energy intensity for the given conditions of mine non-contact transport is developed. Parameters of necessary units of modules for possible cases of combinations of speed states of rolling stock on the line are calculated. For installation on the non-contact mine electric locomotive (B14-900), a supercapacitor unit consisting of 8 Ioxus iMOD064V125A23 modules is needed. Taking into account such specific criteria as the minimum temperature of the block, the minimum equivalent series resistance of the block led to the fact that the resulting value of the actual energy intensity of the module block was higher than necessary. This expands the boundaries of the use of the storage unit (evacuation, maneuvering in the absence of power from the network, etc.) and compensates for the deterioration of the basic indicators of the unit over time.

**The originality** consists in the fact that the proposed method of the choice of a capacitive energy storage takes into account the conditions and specifics of the operation of a unique type of transport.

**Practical implications.** Implementation of the research results will increase the number of simultaneously used rolling stock without improving the non-contact power system.

**Keywords:** *capacitive energy store, mine transport with inductive transmission of energy, non-contact mine electric locomotives*