

УДК 621.33.21: 622.62-83

С. В. Дибрін

(Україна, Дніпро, Державний ВНЗ «Національний гірничий університет»)

## ОБГРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОСМНОСТІ НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗБІЛЬШЕННЯ ЧИСЛА ЕКСПЛУАТОВАНИХ НА ГОРИЗОНТІ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ШАХТНОГО ТРАНСПОРТУ З ІНДУКЦІЙНОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ ЕНЕРГІЇ

**Анотація.** Проаналізовано можливість істотного зниження максимуму потужності тягової перетворювальної підстанції без впливу на існуючу технічну базу (устаткування) системи безконтактного шахтного транспорту. З'ясовано, що знизити величину потужності, яка передається двигунам, можна, встановивши на електровозі автономне джерело енергії із заданою потужністю (джерело потужності). Це дасть можливість знизити втрати електричної енергії на електровозі й дозволить збільшити на лінії число використовуваних рухомих складів. Зроблено висновок про доцільність подальшого аналізу, розрахунку і вибору конкретного накопичувача енергії та схеми його підключення на електровозі.

**Ключові слова:** зниження максимуму потужності, автономне джерело потужності, рудниковий безконтактний електровоз, накопичувач енергії.

**Аннотация.** Проанализирована возможность существенного снижения максимума мощности тяговой преобразовательной подстанции без влияния на существующую техническую базу (оборудование) системы бесконтактного шахтного транспорта. Выяснено, что снизить величину мощности, передаваемой двигателям, можно, установив на электровозе автономный источник энергии с заданной мощностью (источник мощности). Это позволит снизить потери электрической энергии на электровозе и увеличит на линии число используемых составов. Сделан вывод о целесообразности дальнейшего анализа, расчета и выбора конкретного накопителя энергии, а также схемы его подключения на электровозе.

**Ключевые слова:** снижение максимума мощности, автономный источник мощности, рудничный бесконтактный электровоз, накопитель энергии.

**Abstract.** The possibility of reducing the maximum power of the converter substation of a non-contact mine transport system is analyzed. The power can be reduced by installing an independent electric power source on the electric locomotive. This will increase the number of simultaneously used railway rolling stocks.

**Key words:** reduction of maximum power, independent power source, energy storage, mine non-contact electric locomotive.

**Постановка проблеми.** Завдання можливості збільшення числа експлуатованих на горизонті електровозів (В14-900) шахтного безконтактного транспорту за незмінних інших умов пов'язане з вирівнюванням графіку навантаження тягової перетворювальної підстанції ТОВ1-160-1,2к-4000-УХЛ4. Першим етапом при дослідженні цього питання став аналіз складових навантаження тягової перетворювальної підстанції безконтактного транспорту [1]. Наступними мають стати аналіз можливості зниження максимуму навантаження тягової перетворювальної підстанції безконтактного транспорту, а також пошук і аналіз можливого технічного рішення стосовно збільшення числа використовуваних електровозів (В14-900).

**Мега роботи.** Пошук технічного рішення щодо збільшення числа використовуваних на горизонті електровозів (В14-900) при незмінних інших умовах та аналіз цього рішення.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Шахтний транспорт з безконтактною передачею енергії й досі залишається досить унікальною розробкою з низкою специфічних особливостей. У відомих літературних джерелах аналіз можливості та варіантів технічної реалізації збільшення числа використовуваних електровозів при незмінних інших умовах не проводився.

### Результати дослідження

*Аналіз можливості зниження максимуму навантаження тягової перетворювальної підстанції безконтактного транспорту*

Проаналізуємо складові навантаження тягової перетворювальної підстанції системи безконтактного транспорту з точки зору можливості зниження максимумів потужності, що віддається нею.

Потужність втрат при експлуатації лінії  $\Delta P_d$  залежить від її довжини і може бути зменшена тільки за рахунок заміни устаткування, що забезпечує функціонування лінії (кабель, конденсатори). Проте вибір

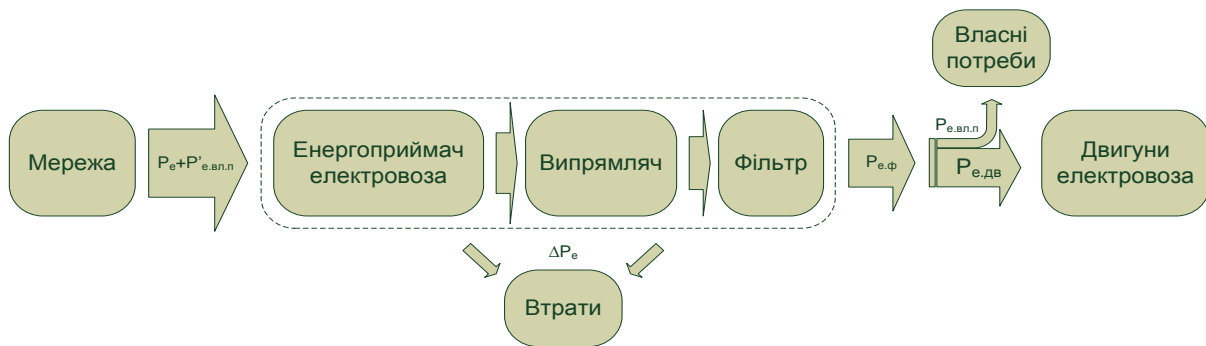
кабелю обґрунтовується економічними розрахунками усієї системи безконтактного транспорту і може стати темою окремого дослідження. Компенсуючі конденсатори лінії спеціально розроблено для цієї системи безконтактного транспорту й їх заміна на ефективніші також вимагає окремої розробки.

Потужність власних потреб електровоза  $P_{e.вл.п} = 2,7$  кВт [1] можна зменшити за рахунок заміни устаткування, що забезпечує функціонування допоміжних вузлів електровоза, на економічніше. Але таке зменшення не може істотно вплинути на зниження загального навантаження перетворювальної підстанції, оскільки доля даної потужності одного електровоза складає близько 1,5 % від встановленої потужності перетворювальної підстанції.

Потужність втрат на електровозі  $\Delta P_e$  залежить від потужності, що витрачається на переміщення рухомого складу (знаходиться в квадратичній залежності від струму, споживаного двигунами  $I_{дв}$  :

$\Delta P_e = (2 \cdot I_{дв})^2 \cdot R_{н.е.}$ , де  $R_{н.е.}$  – еквівалентний опір втрат електровоза), якщо не враховувати потужності власних потреб.

Таким чином, з усіх складових навантаження тягової перетворювальної підстанції можливість істотного зниження максимуму потужності без впливу на існуючу технічну базу (устаткування) системи безконтактного транспорту пов'язана з потужністю  $P_{e.дв}$ , що витрачається на рух. Процес її передачі від мережі до двигунів зображено на рис. 1:

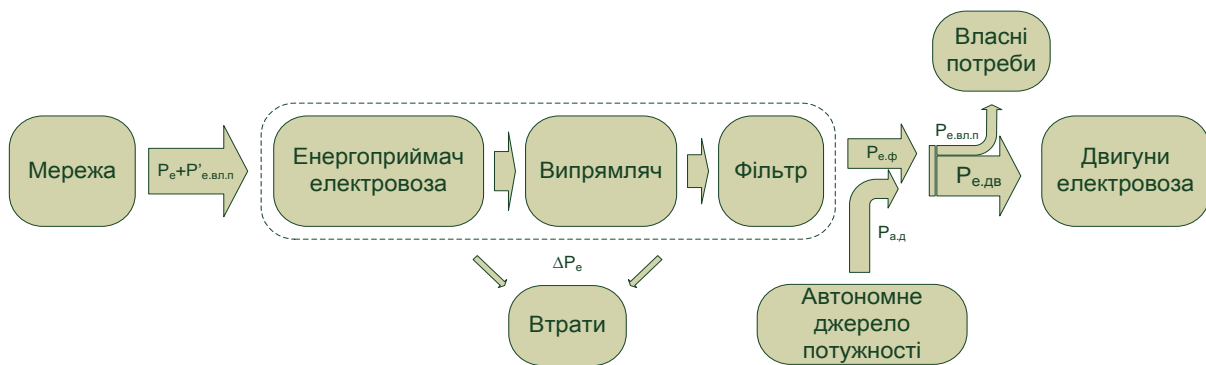


**Рис. 1. Процес передачі потужності від мережі до двигунів:**

$P_{e.вл.п}$  – електрична потужність власних потреб електровоза;  $P'_{e.вл.п}$  – електрична потужність власних потреб електровоза з урахуванням втрат, викликаних її передачею по ланцюгах приймально-силового контуру;  $P_e$  – електрична потужність електровоза без урахування потужності  $P'_{e.вл.п}$ ;  $\Delta P_e$  – електрична потужність втрат у ланцюгах приймально-силового контуру;  $P_{e.ф}$  – електрична потужність на виході фільтра;  $P_{e.дв}$  – електрична потужність на затискачах двигунів електровоза

Максимальне значення потужності, споживаної двигунами, припадає на час розгону. Знизити значення  $P_{e.дв}$  в цей період можна, зменшивши струм двигунів. Але це призведе до недовикористання двигунів по потужності, збільшення загального часу транспортування або зменшення кількості вагонеток та, відповідно, до погіршення експлуатаційно-економічних показників транспорту.

Домогтися зниження значення потужності, що передається двигунам  $P_{e.дв}$ , можна, встановивши на електровозі автономне джерело енергії із заданою потужністю (джерело потужності). При цьому процес передачі потужності  $P_{e.дв}$ , що витрачається на рух, від мережі до двигунів зміниться (див. рис. 2):



**Рис. 2. Процес передачі потужності від мережі до двигунів з автономним джерелом енергії на електровозі:**

**$P_{a.0}$  – необхідна добавка потужності від автономного джерела енергії**

Реалізація запропонованого варіанта дозволить зменшити струм в силовому ланцюзі, що, у свою чергу, дасть можливість знизити втрати електричної енергії на електровозі (зменшиться  $\Delta P_e$ ).

*Збільшення числа безконтактних електровозів на лінії за рахунок зниження максимуму потужності електровозів*

Максимальна потужність тягової перетворювальної підстанції ТОВ1-160-1,2к-4000-УХЛ4, використовуваної для живлення даного шахтного безконтактного транспорту,  $P_{\max} = 180$  кВт.

Запишемо рівняння стабільної роботи перетворювальної підстанції в мережі безконтактного транспорту:

$$\begin{aligned} P_{\max} &\geq \Delta P_{\lambda} + \sum_{i=1}^N (P_{e.об,i} + \Delta P_{e,i}) + P_{e.вл,n} \cdot N = \\ &= \Delta P_{\lambda} + \sum_{i=1}^N P_{e,i} + P_{e.вл,n} \cdot N = \\ &= \Delta P_{\lambda}^0 \cdot L + U_{хв.с} \cdot \sum_{i=1}^N I_{e.об,i} + P_{e.вл,n} \cdot N, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\Delta P_{\lambda}^0$  – питома потужність втрат в лінії;  $L$  – протяжність транспортування;  $P_{e.об,i}$  – електрична потужність, що витрачається на рух  $i$ -м електровозом;  $\Delta P_{e,i}$  – потужність, що втрачається на  $i$ -му електровозі,  $P_{e,i} = P_{e.об,i} + \Delta P_{e,i}$ ;  $I_{e.об,i}$  – струм в ланцюзі двигунів  $i$ -го електровоза;  $N$  – число рухомих складів на лінії.

Навантаження перетворювальної підстанції буде максимальним у періоди, коли на маршруті декілька рухомих складів здійснюють розгін.

Відповідно до тягового розрахунку з початковими даними, що відповідають умовам шахти "Лутугінська" ВО "Луганськвугілля" (на якій для експлуатації безконтактних електровозів В14 обладнано горизонт 376 м на східному корінному відкочувальному штреку з протяжністю транспортування при централізованому електропостачанні близько  $L = 3$  км), електрична потужність електровоза під час розгону  $P_{e,p} = 70,014$  кВт.

Питома потужність втрат у лінії  $\Delta P_{\lambda}^0 = 11,15$  кВт/км [1].

Частина втрат, що вноситься потужністю власних потреб  $P_{e.вл,n}$  у потужність втрат ланцюгів приймально-силового контуру  $\Delta P_{e,p,i}$ , дуже мала (зважаючи на замале значення  $P_{e.вл,n}$ ), тому для спрощення розрахунків приймемо, що  $P'_{e.вл,n} = P_{e.вл,n}$ .

Виразимо з рівняння (1) і розрахуємо допустиме число рухомих складів  $N$  на лінії, припустивши, що усі вони здійснюють розгін одночасно, тобто  $\sum_{i=1}^N (P_{e.об,p,i} + \Delta P_{e,p,i}) = (P_{e.об,p} + \Delta P_{e,p}) \cdot N = P_{e,p} \cdot N$ :

$$N \leq \frac{P_{\max} - \Delta P_{\lambda}^0 \cdot L}{P_{e,p} + P_{e.вл,n}} = \frac{180 - 11,15 \cdot 3}{70,014 + 2,7} = 2,015. \quad (2)$$

Отримане число рухомих складів, що безперебійно живляться перетворювальною підстанцією, співпадає з числом рухомих складів, що безперебійно живляться в умовах діючої системи транспорту з безконтактною передачею енергії (шахта «Лутугінська»). На шахті при збільшенні кількості рухомих складів систематично відбувалося відключення підстанції захистом.

Припустимо: потужність, що витрачається кожним рухомих складом на рух під час розгону (без урахування потужності власних потреб), вдалося знизити до рівня потужності, що витрачається електровозом на сталий рух з порожняком  $P_{e.лор} = P_{e.об,лор} + \Delta P_{e,лор}$  (більша з потужностей, споживаних під час сталого руху). Згідно з тяговим розрахунком потужність електровоза під час сталого руху з порожняком  $P_{e.лор} = 39,51$  кВт. Тоді допустиме на лінії число рухомих складів  $N$  розраховуємо подібно виразу (2):

$$N \leq \frac{P_{\max} - \Delta P_{\lambda}^0 \cdot L}{P_{e.лор} + P_{e.вл,n}} = \frac{180 - 11,15 \cdot 3}{39,510 + 2,7} = 3,472.$$

Таким чином, для цих умов з'являється реальна можливість збільшити на лінії число використуваних рухомих складів до трьох одиниць.

*Обґрунтування енергоємності накопичувача енергії для забезпечення збільшення числа електровозів*

Згідно з тяговим розрахунком  $U_{xx.6} = 230,6$  В – напруга холостого ходу випрямляча; виходячи з того, що при струмі годинного режиму роботи обох двигунів  $152 \cdot 2 = 304$  А, напруга на затискачах двигунів (з урахуванням падіння напруги на опорі втрат  $R_{n.e.} = 0,15$  Ом) має бути 185 В;  $t_{p.sp} = 40,2$  с – найбільший розрахунковий час розгону (час розгону навантаженого рухомого складу).

Для максимального за часом і найбільш важкого випадку А – розгону трьох навантажених рухомих складів – визначимо величину енергії автономного джерела потужності на кожному електровозі, що забезпечує зниження потужності в період розгону з рівня, споживаного електровозом на розгін  $P_{e.p} = P_{e.об.p} + \Delta P_{e.p} = 70015$  Вт, до рівня, допустимого за умов забезпечення експлуатації трьох електровозів. Для цього розрахуємо:

- допустиму потужність, яка витрачається кожним електровозом, що розганяється, на рух  $P_{e.p.дон}$  (без урахування потужності власних потреб), виразивши  $P_{e.p}$  з формули (2) :

$$P_{e.p.дон} \leq \frac{P_{max} - \Delta P_{л}^0 \cdot L}{N} - P_{e.вл.л} = \frac{180 - 11,15 \cdot 3}{3} - 2,7 = 46,15 \text{ кВт};$$

- зменшення втрат потужності, що витрачається електровозом на рух, при її зниженні з необхідного рівня під час пуску  $P_{e.p}$  до допустимого значення  $P_{e.p.дон}$  :

$$\Delta(\Delta P_{e.p.дон}) = (I_{e.p}^2 - I_{e.p.дон}^2) \cdot R_{n.e.} = \frac{P_{e.p}^2 - P_{e.p.дон}^2}{U_{xx.6}^2} \cdot R_{n.e.} = \frac{70015^2 - 46150^2}{230,6^2} \cdot 0,15 = 7,82 \text{ кВт}.$$

Зменшення потужності, що витрачається на рух, призведе й до зниження потужності втрат в енергоприймачі, викликаних струмом власних потреб (як складової загального струму). Зважаючи на малу величину  $P_{e.вл.л}$ , а значить і малу величину самого зниження, бачимо, що це дозволить трохи зменшити шукану енергоємність автономного джерела потужності, але ускладнить розрахунок, враховувати його не будемо;

- необхідну добавку потужності від автономного джерела:

$$P_{a.д} = P_{e.p} - P_{e.p.дон} - \Delta(\Delta P_{e.p.дон}) = 70,015 - 46,15 - 7,82 = 16,045 \text{ кВт};$$

- необхідне зменшення струму на виході фільтра (струм автономного джерела)

$$\Delta I_{a.д} = \frac{P_{e.p} - P_{e.p.дон}}{U_{xx.6}} = \frac{70015 - 46150}{230,6} = 103,5 \text{ А};$$

- очікувану напругу на виході фільтра при роботі автономного джерела

$$U_{н.а(a.д)} = U_{xx.6} - \frac{P_{e.p.дон}}{U_{xx.6}} \cdot R_{n.e.} = 230,6 - \frac{46150}{230,6} \cdot 0,15 = 200,58 \text{ В};$$

- шукану величину енергії (енергоємність) автономного джерела потужності

$$W_{a.д} = \frac{t_{p.sp}}{60 \cdot 60} \cdot P_{a.д} = \frac{40,2}{60 \cdot 60} \cdot 16045 = 179,2 \text{ Вт}\cdot\text{ч};$$

- очікуване граничне мінімальне значення ККД роботи автономного джерела потужності, при якому значення потужності втрат в самому джерелі дорівнюватиме величині зменшення потужності втрат від потужності, що витрачається електровозом на рух при її зниженні з  $P_{e.p}$  (необхідної при розгоні) до  $P_{e.p.дон}$  (допустимої),

$$\eta_{\text{гран.а.д}} = \frac{P_{\text{а.д}}}{P_{\text{а.д}} + \Delta(\Delta P_{\text{е.р.дон}})} = \frac{16,045}{16,045 + 7,82} = 0,672.$$

Однотимчасний розгін трьох навантажених рухомих складів (випадок А) – це винятковий випадок.

Для можливих менш енергетично важких для перетворювальної підстанції випадків комбінацій швидкісних станів рухомих складів на лінії (випадки В–F):

- ✓ випадок В – розгін двох навантажених і сталий рух порожнього рухомого складу;
- ✓ випадок С – розгін трьох порожніх рухомих складів;
- ✓ випадок D – розгін навантаженого і сталий рух двох порожніх рухомих складів;
- ✓ випадок E – розгін двох порожніх і сталий рух порожнього рухомого складу;
- ✓ випадок F – розгін двох порожніх і сталий рух навантаженого рухомого складу

розраховуємо величину необхідної енергії автономного джерела потужності на найбільш "потребуючому" рухомому складі, що розганяється (навантаженому або порожньому, якщо немає навантаженого).

Результати розрахунків наведено в таблиці.

	$P_{\text{е.р.дон}}$ , Вт	$\Delta(\Delta P_{\text{е.р.дон}})$ , Вт	$\Delta I_{\text{а.д}}$ , А	$U_{\text{н.е(а.д.)}}$ , В	$\Delta P_{\text{е.р.дон}}$ , Вт	$\eta_{\text{гран.а.д}}$	$P_{\text{а.д}}$ , Вт	$W_{\text{а.д}}$ , Вт·ч (кДж)
Випадок А	46150	7820	103,5	200,58	7820	0,672	16045	179,2 (645,12)
Випадок В	49471	6924	89,1	198,42	6924	0,663	13619	152,13 (547,668)
Випадок С	46150	7820	103,5	200,58	7820	0,672	16045	80,036 (288,13)
Випадок D	59435	3863	45,9	191,94	3863	0,635	6717	75,025 (270,09)
Випадок E	49471	6924	89,1	198,42	6924	0,663	13619	67,938 (244,577)
Випадок F	56701	4758	57,7	193,72	4759	0,643	8555	42,673 (153,623)

Отримані значення необхідної енергії автономного джерела потужності  $W_{\text{а.д}}$  можна вважати достатньо малими для можливості подальшого аналізу, розрахунку і вибору конкретного накопичувача і схеми його підключення (наприклад, енергетична місткість автомобільного акумулятора може складати 40 А·год, тобто близько 12 В·40 А·год = 480 Вт·год).

### Висновки

1. Можливість істотного зниження максимуму потужності тягової перетворювальної підстанції без впливу на існуючу технічну базу (устаткування) системи безконтактного шахтного транспорту пов'язана з потужністю, що витрачається на його рух.

2. Знизити величину потужності, що передається двигунам, можна, встановивши на електровозі автономне джерело енергії із заданою потужністю (джерело потужності).

3. Установка автономного джерела потужності дає можливість знизити втрати електричної енергії на електровозі й дозволить збільшити на лінії число використовуваних рухомих складів.

4. Отримані значення необхідної енергоємності автономного джерела потужності дозволяють зробити 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.

### Список літератури

1. Составляющие загрузки тяговой преобразовательной подстанции бесконтактного шахтного транспорта / Сиверин И.С., Дыбрин С.В. // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб.- Дніропетровськ: РВК НГУ, 2014.- Вип.92. – С. 37-40.
2. Транспорт с индуктивной передачей энергии для угольных шахт / Г.Г.Пивняк, И.П.Ремизов, С.А.Саратикянц (д.б. все авторы); под ред. Г. Г. Пивняка.– М.: Недра, 1990. – 245 с.
3. Электровоз рудничный высокочастотный В14-900: Руководство по эксплуатации В14.00.00.000 РЭ// Донгипроуглемаш, Дружковский машиностроительный завод.
4. Преобразователь частоты тиристорный ТОВ1-160-1,2 к-4000 УХЛ4: Паспорт ИВЕГ. 435523.013 ПС

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Випанасенко С.І.*