

Частина I. ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ

УДК 622.232:621.316

В.Т. Зайка д-р техн. наук, В.М. Прокуда

(Україна, Дніпропетровськ, ДВНЗ „Національний гірничий університет”)

ЗНИЖЕННЯ ПОТОКІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ШАХТНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ АСИНХРОННОГО РЕГУЛЬОВАНОГО ПРИВОДУ МАГІСТРАЛЬНИХ КОНВЕЄРІВ

Вступ. Вугільна шахта являє собою енергоємне виробництво з багаторівневою розгалуженою електричною мережею. Майже 90% споживачів електричної енергії – це технологічні установки з асинхронними двигунами, що мало працюють у номінальних режимах. Це машини та механізми очисних робіт, магістральні конвеєри, водовідливні установки. Окрім значних втрат електроенергії (ЕЕ) у шахтній мережі від активної складової потужності, набувають вагомості втрати, що формуються від реактивної складової. Це пояснюється тим, що коефіцієнт потужності спеціальних вибухозахищених двигунів, що не перевищує 0,85 у номінальних режимах [5], стає ще меншим при недовантаженні, згідно з вимогами технологічного процесу. За даними роботи [6] для шахт Західного Донбасу на нижніх рівнях розподілу ЕЕ $\cos\phi$ знаходиться в межах 0,5–0,8, тобто складова реактивної потужності може майже у 1,5 раза перевищувати активну. Тому зниження перетоків реактивної енергії набуває ваги.

У теперішній час разом з конденсаторними установками, ФКУ та активними тиристорними компенсаторами з'являється можливість зменшити реактивну потужність, яка передається шахтною мережею, за рахунок упровадження регульованого асинхронного приводу гірничих установок, що працюють від перетворювачів частоти з ланкою постійного струму. У шахтній розподільній мережі таке рішення до недавнього часу було неможливим за відсутності приводу у вибухозахищеному виконанні, проте зараз його впровадження набуває значних темпів. Сфера застосування асинхронного частотного регульованого приводу на шахті – механізми подачі очисних комбайнів, конвеєрні та водовідливні установки, шахтний підйом, вентилятори провітрювання.

Мета роботи. Крім аналізу електромагнітних процесів у системі "живильна мережа –перетворювач частоти" й зниження споживання електроенергії при впровадженні регульованого приводу взагалі [4, 8], має інтерес оцінка впливу приводу магістральних конвеєрів на базі АД з ПЧ (рис. 1) на потоки реактивної енергії та втрати активної потужності у підземній розподільній мережі, що і є метою даного дослідження.

Основний зміст роботи. Нові тенденції у статичній перетворювальній техніці зумовили вихід на передній план двох типів перетворювачів частоти з ланкою постійного струму – АІН з ШІМ (автономний інвертор напруги з широтно-імпульсною модуляцією) і некерованим мережним перетворювачем [1], а також АІН з ШІМ та мережним перетворювачем з САК (система активної компенсації) [3,9]. Перший варіант привабливий через його порівняно невелику вартість (використовуються некеровані напівпровідникові елементи у мережному перетворювачі), а другий – через можливість повного компенсування всіх неактивних складових струму як самого навантаження інвертора, так і інших споживачів, приєднаних у місці з'єднання ПЧ з САК до живильного трансформатора.

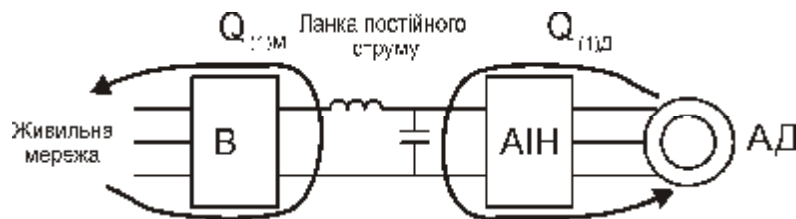


Рис. 1. Принципова схема асинхронного двигуна з перетворювачем частоти та зображення перетоків реактивної потужності

Для аналізу перетоків реактивної енергії та втрат активної потужності у шахтній електричній мережі розглянемо питання щодо формування навантаження з вищезгаданими приводами з ПЧ реактивної та інших неактивних складових струму.

Далі під реактивною складовою струму будемо розуміти складову, що зумовлена зсувом струму відносно напруги за першою гармонікою, а під вищими неактивними – складові тригонометричного ряду розкладення складних кривих струму в ряд Фур'є, у яких частота вища основної гармоніки [7]. Вважаємо навантаження симетричним за фазами. Зауважимо, що для аналізу приймаємо напругу синусоїдальної форми (коефіцієнт викривлення <5%), що виконується за умови: $\frac{S_{K3}}{P_d} \geq \frac{18}{u_{K3}}$, де u_{K3} – напруга КЗ живильного трансформатора; P_d – потужність перетворювача; S_{K3} – потужність КЗ у точці приєднання живильного трансформатора [10]. Впливом комутаційних процесів АІН на стороні навантаження на спектральну зміну напруги мережного перетворювача знехтуємо, що відповідає випадку, коли індуктивність кола постійного струму перетворювача частоти $L_d \rightarrow \infty$, а індуктивність кола комутації $L_k \rightarrow 0$ [4].

Відомо, що повна потужність при несинусоїдальних режимах струму $S = \sqrt{P^2 + Q_{(1)}^2} + T^2$, де T – потужність викривлення; P – активна потужність; $Q_{(1)}$ – реактивна потужність за першою гармонікою.

За наведених вище припущень для аналізу запишемо аналітичні вирази споживання реактивної потужності та потужності викривлення при:

– живленні двигуна конвеєра безпосередньо від трансформаторної підстанції без статичних перетворювачів

$$Q_{д(1)} = \frac{P_2}{\eta_d} \operatorname{tg} \varphi_d,$$

при цьому потужність викривлення двигуна відсутня $T_d = 0$;

– живленні двигуна конвеєра від АІН з ШІМ та некерованого мережного перетворювача за умов безперервного струму

$$Q_{\text{не кер пч}(1)} = \frac{P_2 / \eta_{дШІМ}}{\eta_{аіШІМ} \cdot \eta_{мп}} \operatorname{tg} \varphi_{мп(1)};$$

$$T_{\text{не кер пч}} = K_{T \text{ HDI}} P_{\text{не кер пч}} = K_{T \text{ HDI}} \frac{P_2 / \eta_{дШІМ}}{\eta_{аіШІМ} \cdot \eta_{мп}}.$$

$\varphi_{мп(1)} \approx 0$, приймаючи кут комутації некерованого перетворювача зневажливо малим [1]. Тому $Q_{\text{не кер пч}(1)} \approx 0$;

– живленні двигуна конвеєра від АІН з ШІМ та мережного перетворювача з САК за умов модуляційних коливань струму <10% основної гармоніки струму

$$Q_{\text{пч з САК}(1)} = \frac{P_2 / \eta_{дШІМ}}{\eta_{аіШІМ} \cdot \eta_{мп}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{пч var}},$$

$$T_{\text{пч з САК}} \approx \operatorname{var},$$

$$-\frac{P_2 / \eta_{дШІМ}}{\eta_{аіШІМ}} < \sqrt{Q_{\text{пч з САК}(1)}^2 + T_{\text{пч з САК}}^2} < \frac{P_2 / \eta_{дШІМ}}{\eta_{аіШІМ}}.$$

Остання умова відображує, що компенсація неактивних складових відбувається за рахунок енергії, накопиченої у реактивних елементах ланки постійного струму.

Позначення у формулах: Q_d – реактивна складова потужності АД без ПЧ, квар; $Q_{\text{не кер пч}(1)}$ – реактивна складова потужності першої гармоніки системи АД з ПЧ, квар, що циркулює між джерелом енергії та випрямлячем; P_2 – активна потужність на валу двигуна, кВт; η_d – ККД двигуна із заданим навантаженням; $(\eta_{аіШІМ} \cdot \eta_{мп})$ – ККД системи перетворювача частоти (автономного інвертора та випрямляча); $\operatorname{tg} \varphi_{мп(1)}$ – частка від ділення реактивної складової потужності за першою гармонікою ПЧ на активну потужність; $\operatorname{tg} \varphi_d$ – частка від ділення реактивної потужності АД без ПЧ на активну; $Q_{\text{пч з САК}(1)}$ – реактивна потужність за першою гармонікою ПЧ з САК; $T_{\text{пч з САК}}$ – потужність викривлення ПЧ з САК; $K_{T \text{ HDI}}$ – коефіцієнт спотворення кривої струму.

Розглянемо залежності складових потужностей споживання магістрального конвеєра вугільної шахти для трьох типів приводу, наведених вище, від коефіцієнта завантаження конвеєрної стрічки. Для мінімізації непродуктивних витрат на конвеєрному транспорті необхідно регулювати швидкість привідного двигуна за законом $E_{\mu}/f_0 = const$, $f_0 \sim K_{зк}$ [4], де E_{μ} – ЕРС кола намагнічування привідного двигуна; f_0 – частота живлення напруги статора двигуна; $K_{зк}$ – відносний коефіцієнт завантаження конвеєрної стрічки. З урахуванням розглянутих у літературі ККД систем приводу за різних режимів роботи [1, 2, 3, 5] наведемо залежності складових потужності від відносного коефіцієнта завантаження конвеєрної стрічки та згаданого закону регулювання швидкості двигуна. На рис. 2 зображено залежності споживаної реактивної потужності за першою гармонікою, потужності викривлення (для некерованого мережного перетворювача у складі ПЧ) та повної потужності від коефіцієнта завантаження конвеєрної стрічки для випадку $P_{хх}=40\%$ номінальної потужності двигуна при живленні його безпосередньо від мережі – $Q_{д(1)}$ та $S_{д}$, від ПЧ з некерованим мережним перетворювачем – $Q_{не кер пч(1)}$, $T_{не кер пч}$ та $S_{не кер пч}$, від ПЧ з САК – $Q_{пч з САК(1)}$ та $S_{пч з САК}$. Усі залежності побудовані у відсотках від номінальної активної споживаної потужності двигуна з урахуванням ККД усіх ланок регульованого приводу. Залежності наведені для приводу конвеєра 1л100к з двигуном 2ЭДКЛЮФ250LB4У2,5.

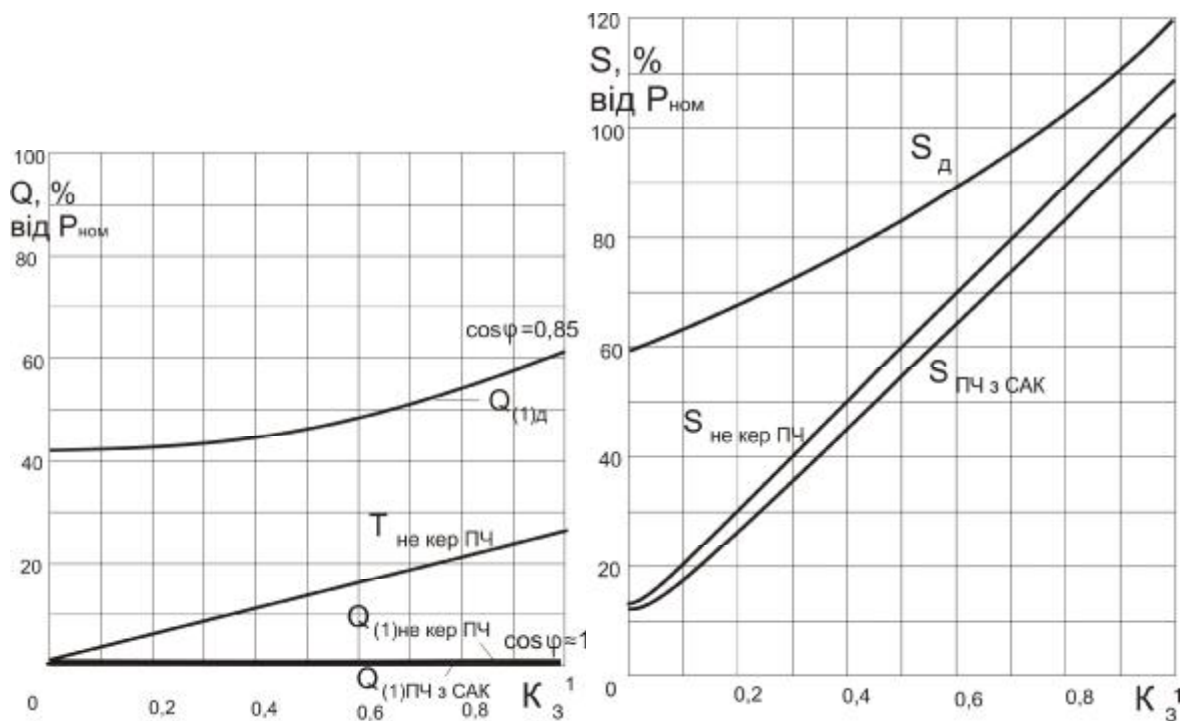


Рис. 2. Залежності складових споживаної потужності від коефіцієнта завантаження конвеєрної стрічки

За допомогою наведених розрахункових співвідношень визначимо споживання активної та реактивної електроенергії впродовж часу, достатнього для отримання достовірного статистичного результату (для даних умов це 10 діб, що розраховано для отримання результату з помилкою не більше 3% з ймовірністю 0,95) діючими на шахті магістральними конвеєрами з асинхронним нерегульованим приводом і регульованим приводом на базі АД з ПЧ з АІН. Результати розрахунків наведемо у табл. 1, 2 та 3.

Таблиця 1

Споживання електроенергії конвеєрами з асинхронним нерегульованим приводом

Магістральні конвеєри	Активна енергія, кВт·год	Реактивна енергія, квар·год	$\cos \varphi_{(1)}$
1л100к №1	17619	17525	$\frac{0.53...0.79}{0.66}$
1л100к №2	16252	16129	$\frac{0.51...0.79}{0.68}$
1л100к №3	10703	11049	$\frac{0.51...0.78}{0.63}$

Таблиця 2

Споживання електроенергії конвеєрами з асинхронним регульованим приводом (АД з ПЧ з АІН та НМП (некерованим мережним перетворювачем))

Магістральні конвеєри	Активна енергія, кВт·год	Реактивна енергія, квар·год	$\cos \varphi_{(1)}$
1л100к №1	15091	3772	0,99/0,99
1л100к №2	13282	3320	0,99/0,99
1л100к №3	7631	1907	0,99/0,99

Таблиця 3

Споживання електроенергії конвеєрами з асинхронним регульованим приводом (АД з ПЧ з АІН та САК)

Магістральні конвеєри	Активна енергія, кВт·год	Реактивна енергія, квар·год	$\cos \varphi_{(1)}$
1л100к №1	15091	0	1/1
1л100к №2	13282	0	1/1
1л100к №3	7631	0	1/1

Зважаючи на викладені вище положення, проаналізуємо потоки реактивної потужності та втрати ЕЕ у шахтній мережі при впровадженні ЧР приводу за даними промислового експерименту на магістральних конвеєрах, отриманих на шахті ім. М.І. Сташкова. Принципова схема для аналізу наведена на рис. 3.

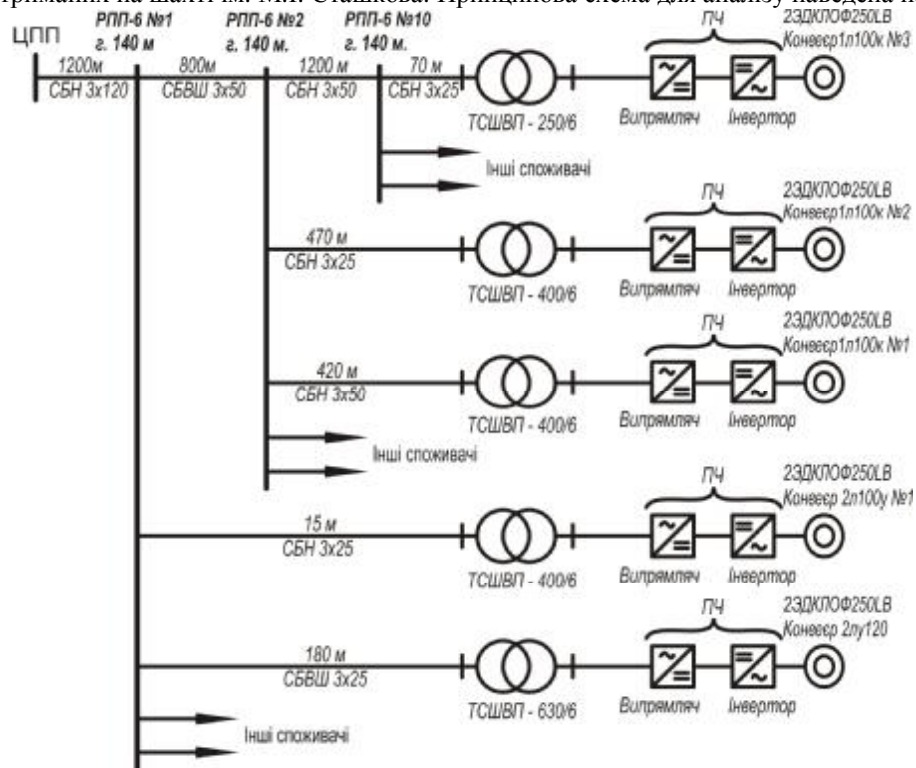


Рис 3. Принципова схема шахтної мережі для живлення магістральних конвеєрів з регульованим приводом магістральних конвеєрів

Магістральні конвеєри з привідними двигунами типу 2ЭДКЛОФ250LB живляться від перетворювачів частоти з ланкою постійного струму. Асинхронний регульований привід живиться від трансформаторних підстанцій ТСШВП котрі живляться від розподільних пунктів РПП 6 кВ на горизонті 140 м за допомогою броньованих кабелів СБН та СБВШ.

Для розрахунку зміни перетоків реактивної потужності та втрат у кабельній шахтній мережі будемо використовувати математичний опис шахтної мережі за допомогою матричного методу (рис. 4).

Кожен елемент матриці відповідно інкапсулює набір параметрів певного вузла.

Під вузлом будемо розуміти електроспоживача та живильний його кабель, або комплектну трансформаторну підстанцію та живильний кабель. Так як при дослідженні ми вносимо зміни лише у вузли навантаження, що являють собою приводи магістральних конвеєрів із живильними кабелями, то інше навантаження будемо зводити до точки приєднання приводу конвеєрів як вузла з узагальнено прийнятими за експериментальними даними параметрами. Вузол з приводом конвеєра буде відрізнятися для трьох різних варіантів розрахунку типом приводу. Складові потужності у вузлі будемо визначати для отриманого за експериментальними даними коефіцієнта завантаження конвеєрної стрічки. Кожному вузлу надамо певні вхідні, вихідні та внутрішні параметри для зв'язку за допомогою графів певних вузлів між рівнями для передачі вихідних параметрів від елементів на нижчому рівні до елементів на вищому. Параметрами вузла вважатимемо: вхідні – коефіцієнт завантаження (тільки для конвеєрів), діючі значення повної потужності та її складових (описані раніше), модульне значення напруги; внутрішні – активний та індуктивний опори живильного кабелю та трансформаторної підстанції, коефіцієнт трансформації КТП (за відсутності у вузлі КТП тільки опір живильного кабелю); вихідні – діючі значення повної потужності та її складових (описані раніше), модульне значення напруги. Вхідні параметри відповідного за схемою елемента більш високого рівня є алгебраїчною сумою відповідних параметрів елементів нижчого рівня.

За допомогою ЕОМ та пакету MatLAB розрахуємо параметри кожного вузла, прийнявши вхідні експериментальні дані або розрахувавши їх для конвеєрного транспорту за попередніми викладками відповідно до коефіцієнта завантаження. У розрахунках приймаємо такі припущення:

1. Потужність спотворення від некерованих випрямлячів проходить з незмінним значенням по всім транзитним елементам мережі. Тому для аналізу подамо її як середньоквадратичне діюче значення, що піддається алгебраїчним операціям як і інші складові.
2. При визначенні втрати напруги у елементах приймаємо її модульне значення.
3. Усі складові потужності визначаємо як середньоквадратичні за період, якого достатньо, щоб за допустимої похибки 5% розрахувати втрати активної потужності у елементах та визначити змінення складових потужності.

Приймаючи за експериментальними даними змінний за часом коефіцієнт завантаження конвеєрів та наведену аналітичну схему розрахунку, знаходимо значення вхідних та вихідних параметрів елементів графу.

Висновки. Впровадження АД з прийнятими ПЧ до всіх магістральних конвеєрів шахти ім. М.І. Сташкова ВАТ "Палоградвугілля" дозволить зменшити активні втрати у підземній електричній мережі:

- при ПЧ з АІН та МНП більш ніж на 260 кВт/год за добу, що за рік складе більш ніж 95000 кВт/год (1% у питомих одиницях від загального споживання);
- при ПЧ з АІН та САК більш ніж на 280 кВт/год за добу, що за рік складе більш ніж 102000 кВт/год, за умов нормального функціонування шахти (1,05% у питомих одиницях від загального споживання).

Таким чином, упровадження частотного регульованого приводу на конвеєрному транспорті вугільних шахт, що являє собою необхідну ланку в процесі вуглевидобутку, показують перспективність використання АД з ПЧ і АІН як устаткування непрямої компенсації реактивної потужності на додаток до основної функції – зменшення непродуктивних витрат ЕЕ при транспортуванні гірничої маси. Крім того, підвищення коефіцієнту потужності на нижчих рівнях розподілу електроенергії, безпосередньо у струмоприймачів, дозволить уникнути розробки низьковольтних КУ спеціального виконання, а також розвантажити високовольтні мережі від потоків реактивної енергії, що приведе до зменшення втрат активної електроенергії в системі підземного електропостачання в цілому. Також це дозволить не встановлювати додаткові КУ на поверхні при збільшенні енергії, що споживається шахтою.

Список літератури

1. Жежеленко, И.В.. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий [Текст]/ И.В. Жежеленко. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 358 с.

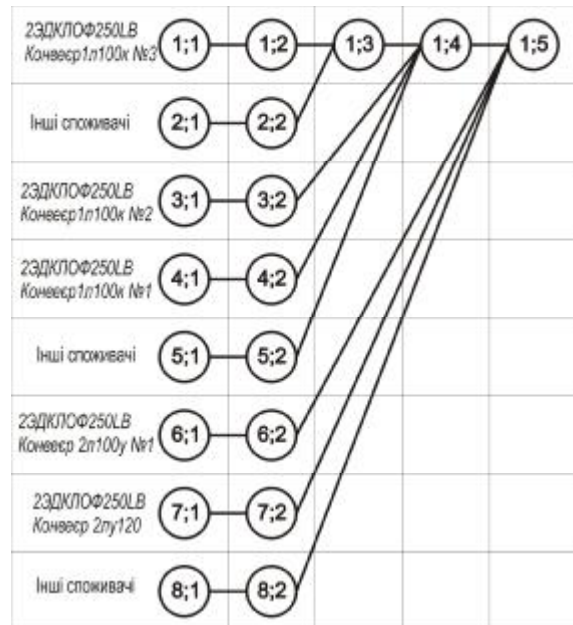


Рис 4. Аналітична розрахункова модель шахтної мережі з регульованим асинхронним частотним приводом шахтних конвеєрів

2. Вольдек, А. И. Электрические машины [Текст] : учеб. пособие / А. И. Вольдек. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
3. Півняк, Г.Г. Сучасні частотно-регульовані асинхронні електроприводи з широтно імпульсною модуляцією[Текст] : монографія / Г.Г.Півняк, О.В. Волков. – Д.: НГУ, 2006. – 470 с.
4. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод [Текст]: учеб. пособие / И.Я. Браславский, З.Ш.Ишматов, В.Н.Поляков; под. ред. И.Я. Браславского. – М.:АКАДЕМА, 2004. – 202 с.
5. Дзюбан, В.С. Справочник энергетика угольной шахты [Текст] : в 2 т./ В.С. Дзюбан, И.Г.Ширнин, Б.Н.Ванеев, В.М. Гостищев; под общ. ред. Б.Н. Ванеева. – 2-е изд. перераб. и доп. – Донецк: ООО "Юго-Восток ЛТД", 2001. – Т.2.– 440 с.
6. Півняк, Г.Г. Системи ефективного енергозабезпечення вугільних шахт [Текст]/ Г.Г. Півняк, Ф.П. Шкрабець, В.Т. Заїка, Ю.Т. Розумний; під ред. Г.Г. Півняка. – Д.: НГУ, 2004. – 206 с.
7. Півняк, Г.Г. Особливі режими електричних мереж [Текст]: навч. посіб. / Г.Г. Півняк, А.К. Шидловський, Г.А. Кігель, А.Я. Рибалко, О.І. Хованська – Д.:НГУ, 2009. – 376 с.
8. Рухлов, А.В. Энергетические характеристики магистрального конвейерного транспорта угольных шахт [Текст]/ А.В. Рухлов, Е.Д. Герман // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2010. – Вип. 84. – с. 45-50.
9. Колб, А.А. Багатофункціональна система корекції якості електроенергії в системах групового живлення електроприводів [Текст] / А.А. Колб // Наук. вісник НГУ – 2009. – №6. – с. 64 – 68.
10. Гаскевич, П.А. Особенности построения и расчета систем электроснабжения горных машин с тиристорными приводами [Текст] / П.А. Гаскевич // Вопросы электроснабжения горных предприятий: сб. науч. тр. ВНИИВЭ. – Донецк. 1983. – С.41-57.

Рекомендовано до друку: проф. Розумним Ю.Т.