

УДК 621.86

Григоров О.В., д.т.н., Стрижак В.В., Зюбанова Д.М.

ОЦІНКА ЗМЕНШЕННЯ ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ПРИВОДУ

Постановка проблеми. Вантажопідйомні крани, які обладнані асинхронними двигунами з фазним ротором є не економічними з точки зору споживання енергії. Рішенням цієї проблеми може стати заміна в кранових механізмах асинхронних двигунів з фазним ротором на короткозамкнені з живленням від частотного перетворювача (частотно-регульований) привід. Однак застосування частотно-регульованого приводу пов'язане з відносно великими капітальними витратами, що може бути виправдано зменшенням витрат енергії. Тому є актуальною оцінка витрат енергії частотно-регульованого приводу в механізмах вантажопідйомних машин і порівняння їх з витратами асинхронного приводу з фазним ротором.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Енергетична ефективність частотно-регульованого приводу докладно досліджена і доведена в загальній теорії електроприводу [1, 2]. Дослідження економії енергії в частотно-регульованому приводі механізмів вантажопідйомних машин можна знайти в роботах [3-7]. Ці дослідження проведені переважно для ліфтів і механізмів підйому, оскільки ці механізми мають можливість рекуперативного гальмування при спуску. Застосування частотно-регульованого приводу в механізмах горизонтального переміщення і повороту також можуть зменшити витрати енергії за рахунок тривалих пуско-гальмівних процесів і використання рекуперативного гальмування [8].

Мета і задачі досліджень. Метою дослідження є оцінка зменшення витрат енергії в механізмах пересування з частотно-регульованим приводом порівняно з асинхронним приводом з фазним ротором і визначення закономірності зміни співвідношення витрат енергії обох типів приводів для різних робочих циклів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- 1) експериментальним шляхом на стенді механізму пересування визначити характер зміни витрат енергії при частотно-регульованому приводі;
- 2) порівняти характер змін витрат енергії при частотно-регульованому приводі і асинхронному приводі з фазним ротором на різних етапах робочого циклу;
- 3) встановити закономірність зміни ККД на етапі розгону для обох типів приводів;
- 4) порівняти еквівалентну потужність за цикл обох типів приводів.

Виклад основного матеріалу. Дослідження енергетичних характеристик руху частотно-регульованого приводу кранового механізму проводилося на стенді механізму пересування візка мостового крану в/п 32/5 т прогоном 22,5 м (рис. 1), характеристики якого приведені в табл. 1.

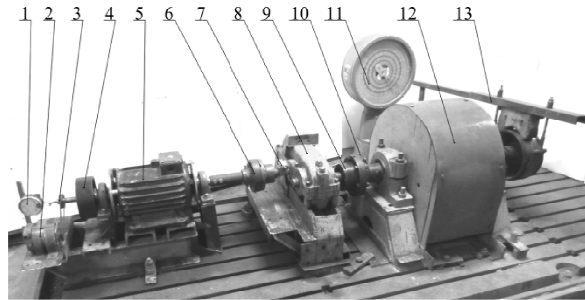


Рис. 1. Стенд для випробування механізму пересування візка мостового крану з частотно-регульованим приводом

1 - стрілковий тахометр, 2 – тахогенератор, 3 - пасова передача, 4 – шків гальмівний, 5 – електродвигун, 6 – з’єднувальна муфта, 7 – тензодатчики та блок живлення тензодатчиків і підсилення сигналу, 8 – редуктор, 9 – з’єднувальна муфта, 10 - струмознімач, 11 – ваги, 12 – махові маси, 13 – важіль

Табл. 1. Характеристики механізму пересування кранового візка і стенду

Параметр	Величина	Натура	Модель
Маса візка	кг	12000	-
Маса вантажу	кг	32000	-
Двигун:	-	-	-
- тип		MTF 112-6	МТК 112-6
- номінальна потужність при ПВ 25%	кВт	5,8	5,0
- швидкість обертання	об/хв	915	890
Передавальне число редуктора		31,5	2,5
Статичний момент, приведений до валу двигуна з номінальним вантажем:	Нм	42,7	42,7
Момент інерції механізму приведений до валу двигуна	кгм ²	2,18	2,18
Час розгону	сек	4,2	4,2
Час гальмування	сек	3	3

Вибір апаратури для реєстрації витрат енергії виконувався виходячи з умов експерименту. Під час випробувань двигун може переходити в генераторний режим. Оскільки частотний перетворювач не має рекуператора, реєстрація потужності відбувалась на ділянці між двигуном та частотним перетворювачем. При цьому виникли певні труднощі, пов'язані з тим, що струм на цій ділянці має не синусоїдальний характер, а представляє собою набір коротких імпульсів. Тому для реєстрації потужності було використано аналізатор мережі Diris A40 (рис. 2.а), який здійснює глибокий аналіз індивідуальних гармонік струму і розраховує їх дійсне середньоквадратичне значення (True RMS).

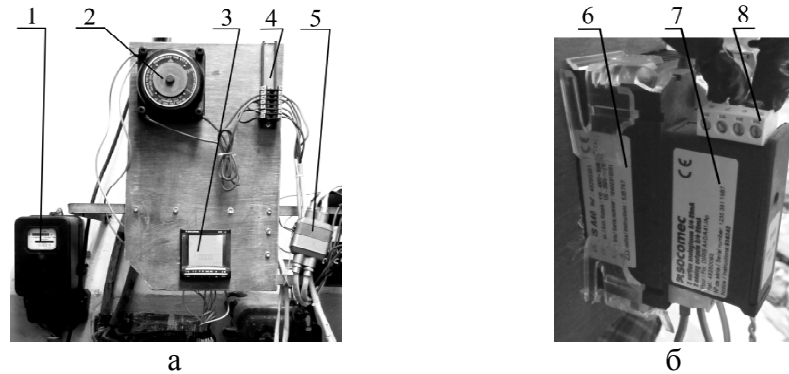


Рис. 2. Розташування пристроїв для вимірювання потужності
а – установка аналізатора мережі; б – розташування модуля аналогових виходів

1 – трьохфазний лічильник потужності, 2- трансформатор струму, 3 – аналізатор мережі Diris A40, 4 – клемна колодка, 5 – з'єднувальний роз'єм, 6 – зворотна сторона аналізатора мережі, 7 – модуль аналогових виходів, 8 – клемна колодка модуля аналогових виходів

Інформація про потужність передається у вигляді аналогового сигналу, який формує модуль аналогових виходів (рис. 2.б) з періодом оновлення даних 1 сек. Тобто модуль формує постійний аналоговий сигнал, величина якого змінюється один раз за секунду в залежності від середнього значення потужності виміряного за цей час. Через інтерфейс приладу програмуються значення потужності в кВт, які відповідають найменшій і найбільшій амплітуді вихідного сигналу. Зважаючи на лінійну залежність величини амплітуди сигналу від вимірюваної величини потужності, формується шкала для обробки експериментальних даних.

Підключення ватметра до мережі здійснювалось за схемою з симетричним навантаженням фаз (рис. 3).

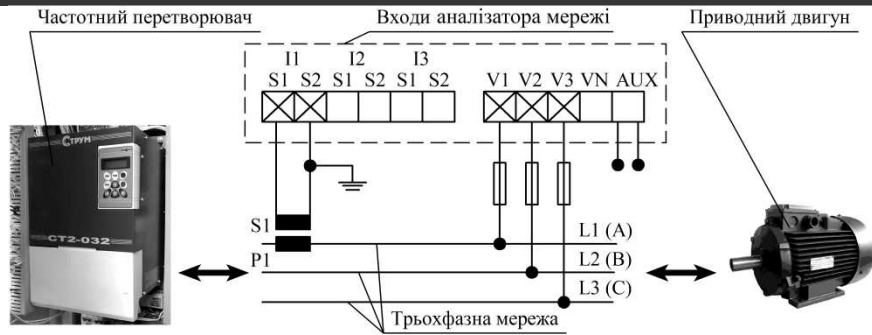


Рис. 3. Схема підключення аналізатора мережі

При цьому струм вимірюється лише в одній фазі, за допомогою трансформатора струму 50/5 А, первинна обмотка якого підключається в розріз цієї фази.

На рис. 4 приведено графіки зміни споживаної і рекуперованої потужності частоти струму живлення, швидкості двигуна і крутного моменту впродовж робочого циклу, при якому візок переміщується на відстань характерного робочого ходу з максимальним вантажем.

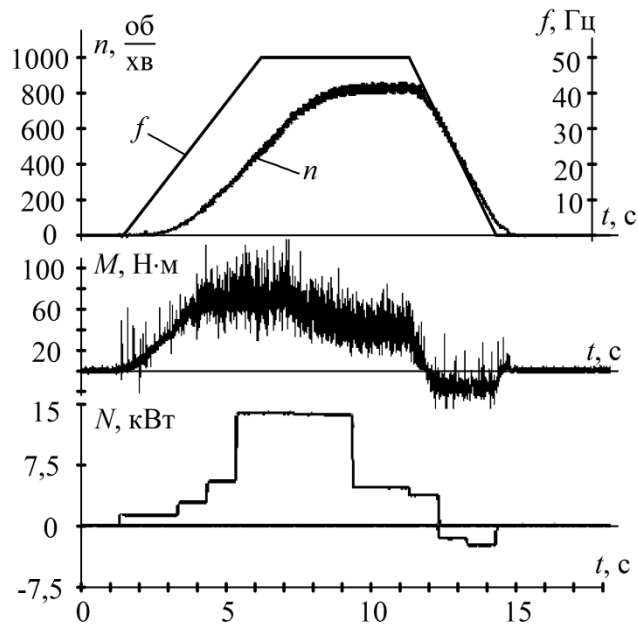


Рис. 4. Графіки зміни частоти струму, швидкості обертання валу двигуна, крутного моменту і споживаної енергії при стендових випробуваннях механізму пересування візка мостового крану з частотно-регульованим приводом при повному завантаженні

час розгону $t_{розг} = 4,2$ с, час рекуперативного гальмування $t_2 = 3$ с, загальний час циклу $t_{ц} = 13,5$ с, вага вантажу $Q = 320$ кН

За осцилограмою рис. 4 побудована наближена схема зміни потужності, що споживається і рекуперується двигуном впродовж робочого циклу механізму за частотно-регульованого приводу (рис. 5.а).

Нижче побудована теоретична схема зміни потужності, що споживається для того ж самого механізму, обладнаного асинхронним приводом з фазним ротором (рис. 5.б). Для зручності проведення порівняльного аналізу, контури схем рис. 5.а і 5.б накладені один на одного на рис. 5.в.

Потужність, що споживається частотно-регульованим приводом, пропорційна потужності на валу рушійного органу з урахуванням ККД двигуна $\eta_{\text{дв}}$ і частотного перетворювача $\eta_{\text{пер}}$ і відповідає ломаній $0_1-2''-3''-4''-5''-0_2$ (рис. 5, б), а також позначена суцільною лінією на рис. 4, в. В частотно-регульованому приводі енергія споживається також, коли механізм знаходиться в стані спокою, і витрачається на роботу частотного перетворювача і становить приблизно 1,5% потужності двигуна, тому наближено нею можна знехтувати.

Спожита асинхронним двигуном з фазним ротором потужність визначається площею, обмеженою горизонтальною віссю і ломаною $0_1-1'-2'-3'-4'-5'-6'-0_2$ на рис. 4, а і пунктирною лінією на рис. 4, в.

З рис. 4 видно, що частотно-регульований привід має перевагу на етапі розгону і гальмування і програє приводу з фазним ротором під час рівномірного ходу, через витрати в частотному перетворювачі. Тому зменшення витрат енергії при застосуванні частотно-регульованого приводу буде варіюватись в широкому діапазоні і залежить від частки пуско-гальмівних етапів в загальному часі робочого циклу механізму.

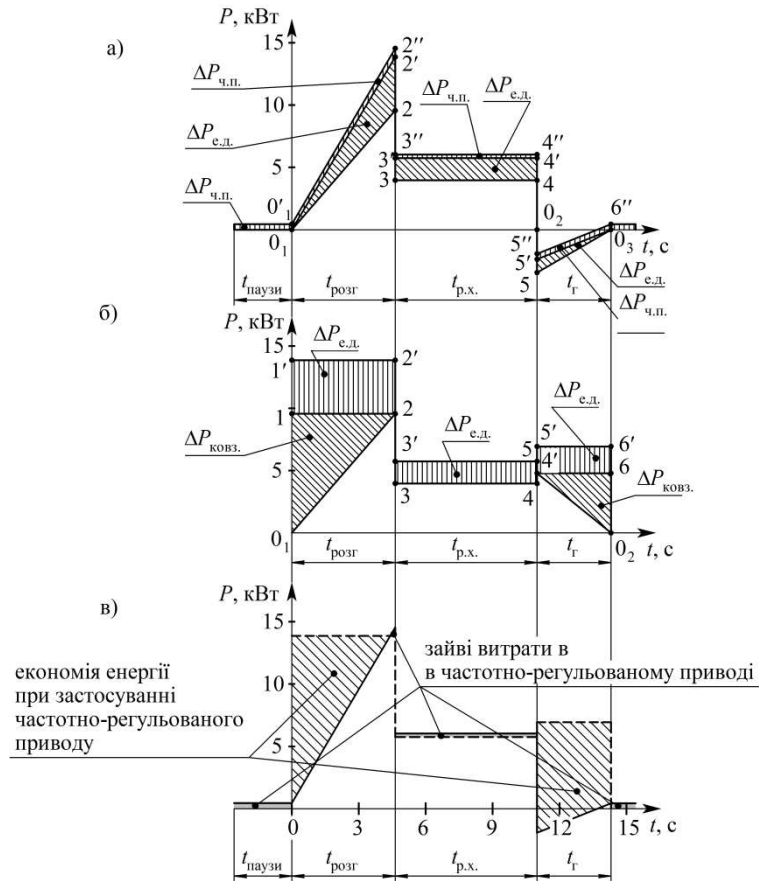


Рис. 5. Схема зміни потужності, що споживається з мережі і рекуперується під час гальмування в механізмі пересування візка мостового крану 32/5 т прогоном 22,5 м при транспортуванні максимального вантажу на відстань характерного технологічного циклу:

а – схема споживання і рекуперації енергії при частотно-регульованому приводі, побудована на основі стендових випробувань; б – теоретичне споживання енергії при асинхронному приводі з фазним ротором і гальмуванні противключенням; в – накладення діаграм потужності обох типів приводів (заштрихована зона зайві витрати енергії в асинхронному двигуні з фазним ротором, зафарбована зона зайві витрати енергії в частотно-регульованому приводі)

$\Delta P_{\text{ковз.}}$ – втрати потужності в реостаті;

$\Delta P_{\text{ед.}}$ – втрати потужності в двигуні з урахуванням $\eta_{\text{дв}}$;

$\Delta P_{\text{ч.п.}}$ – втрати в потужності в частотному перетворювачі при рухомих механізмі

На першому етапі, дослідимо миттєвий ККД частотно-регульованого приводу на етапі розгону за результатами експериментальних даних. Як видно з рис. 4, він складається з ККД електродвигуна і ККД перетворювача частоти. За даними огляду досліджень в галузі електротехніки, ККД сучасних перетворювачів інверторного типу можна прийняти $\eta_{\text{пер}} = 0,96$. Розраховуємо ККД двигуна, розділяючи механічну потужність на валу двигуна на електричну потужність, що споживається двигуном, і помножуючи на ККД частотного перетворювача за виразом:

$$\eta = \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{пер}} = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot \frac{M}{N} \cdot \eta_{\text{пер}}, \quad (1)$$

де n – швидкість обертання валу двигуна; M – момент на валу електродвигуна; N – потужність, що споживається двигуном; $\eta_{\text{пер}} = 0,96$ – ККД перетворювача.

Результат обробки експериментальних даних представлений на графіках (рис. 5) зміни миттєвого ККД частотно-регульованого приводу η впродовж розгону за різної відносної швидкості $\omega^* = \omega / \omega_{\text{ном}}$ (відношення поточної швидкості до номінальної).

Відомо, що в асинхронному приводі з фазним ротором залежність миттєвого ККД від відносної швидкості під час розгону змінюється пропорційно величині ковзання. Крива 3 характеризує теоретичну зміну ККД асинхронного двигуна з фазним ротором при повному навантаженні.

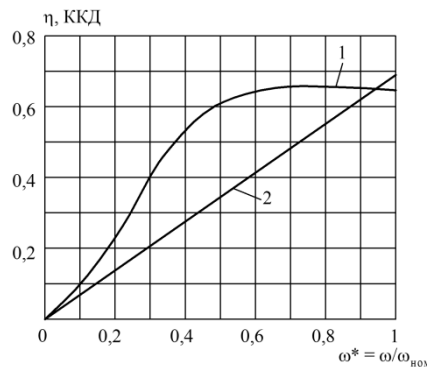


Рис. 6. Графіки зміни миттєвого ККД в частотно-регульованому і асинхронному приводі з фазним ротором впродовж розгону
 1 - частотний пуск, повне навантаження; 2 – теоретична крива для електромеханічного приводу з фазним ротором

Аналізуючи криві 1 і 2, можна порівняти характер зміни ККД при частотному керуванні і двигуні з фазним ротором. З графіків видно, що на протязі майже всього періоду розгону механізму пересування візка миттєвий ККД частотного приводу вищий, а при досягненні $\omega^* = 0,9$, буде вищий миттєвий ККД асинхронного приводу з фазним ротором.

Тому оцінка енергетичної ефективності застосування частотно-регульованого приводу повинна проводитися, беручи до уваги весь робочий цикл механізму з етапами розгону, рівномірного ходу і гальмування.

Провести таку оцінку можна скориставшись методом розрахунку еквівалентної потужності P_e [9].

$$P_e = \sqrt{\frac{\int_0^t P^2 dt}{t}} \tag{2}$$

де P - поточна миттєва потужність на валу електродвигуна; t - час.

Еквівалентна потужність відображає величину середньої потужності, яку споживає привід за робочий цикл. Співставлення її значення для двох приводів за однакового циклу покаже, в якому приводі середня еквівалентна потужність і, відповідно, витрати енергії за цей цикл були більше.

В застосуванні до електроприводів вираз (4) може бути представлений у вигляді:

$$P_e = \sqrt{\frac{\Sigma P_p^2 \cdot t_p + \Sigma P_{p.x}^2 \cdot t_{p.x} + \Sigma P_r^2 t_r}{t_p + t_{p.x} + t_r}}, \tag{3}$$

Враховуючи діаграму споживання потужності (рис. 4), вираз (3) прийме наступний вигляд: для частотно-регульованого приводу з урахуванням його роботи по трапецієподібній тахограмі, урахуванням втрат в перетворювачі і рекуперативним гальмуванням, нехтуючи витратами в перетворювачі, коли механізм нерухомий:

$$P_{e \text{ част}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{3}(1,05 \cdot P_{p.\max})^2 \cdot t_p + (1,05 \cdot P_{p.x.\max}) \cdot t_{p.x} - \frac{1}{3}(P_{z.\max} / 1,05)^2 \cdot t_r}{t_p + t_{p.x} + t_r}}, \tag{4}$$

а для асинхронного приводу з фазним ротором:

$$P_{e \text{ фазн.рот.}} = \sqrt{\frac{P_{p.\max}^2 \cdot t_p + P_{p.x.\max}^2 \cdot t_{p.x.} + P_{z.\max}^2 \cdot t_z}{t_p. + t_{p.x.} + t_z.}}, \quad (5)$$

де: $P_{p.\max}$ – максимальна потужність, що споживається двигуном з мережі в період розгону, $P_{p.x.\max}$ – максимальна потужність що споживається з мережі при рівномірному русі; $P_{z.\max}$ – максимальна потужність що споживається з мережі в період гальмування.

Під час рекуперативного гальмування в частотно-регульованому приводі, двигун повертає частину енергії, що витратилася, тому за такого випадку перед останнім членом чисельника необхідно поставити знак «-». Якщо гальмування відбувається за допомогою механічних гальм, то $P_{z.\max} = 0$. При гальмуванні противключенням, коли величина потужності що споживається двигуном з мережі буде сталою, можна прийняти $P_{z.\max} = P_z = 0,5 \cdot P_{p.\max}$.

Для порівняння витрат енергії в обох приводах введемо величину e :

$$e = \frac{P_{e \text{ фазн.рот.}}}{P_{e \text{ част}}}, \quad (6)$$

зміст якої буде відображати співвідношення споживання енергії асинхронним приводом з фазним ротором і частотно-регульованим за однокового робочого циклу.

На прикладі досліджуваного механізму пересування візка мостового крану, знайдемо закономірність зміни співвідношення витрат енергії в обох приводах в залежності від тривалості етапу рівномірного руху. Для кожного приводу розрахуємо середню потужність за виразами (4) і (5) для різних значень часу рівномірного ходу. Величини максимальних значень потужності і тривалості розгону та гальмування прийнемо за результатами експерименту.

Відношення e розраховано для випадку транспортування максимального вантажу за різних режимів гальмування. Характер зміни відношення e від часу рівномірного ходу представлений на рис. 7.

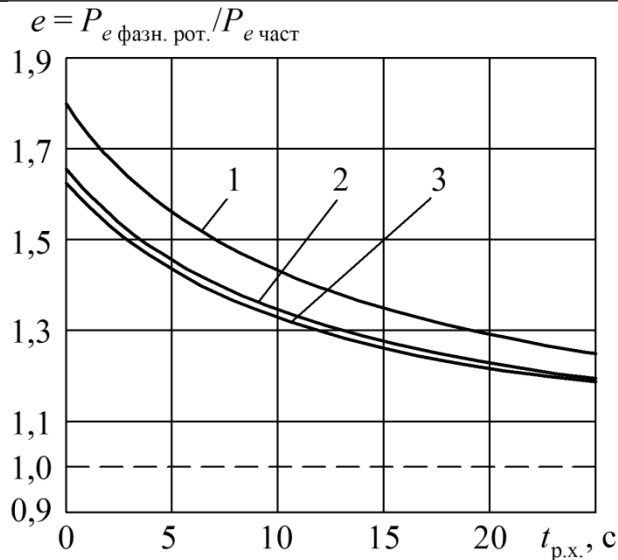


Рис. 7. Графіки залежності співвідношення витрат енергії $e = P_{e \text{ фазн. рот.}} / P_{e \text{ част}}$ в механізмі пересування візка мостового крану від часу рівномірного ходу при повному завантаженні і різних режимах гальмування:

- 1 – гальмування противключенням; 2 – гальмування механічним гальмом; 3 – гальмування обох приводів механічним гальмом

Графіки показують, що для розглядуваного випадку відношення витрат енергії $e \leq 1$ настає за такої тривалості рівномірного ходу $t_{р.х.}$, яка рідко зустрічається в практиці експлуатації кранів. Наприклад, для досліджуваного візка тривалість рівномірного ходу при пересуванні на відстань характерного робочого циклу становить $t_{р.х.} = 6,5 \text{ с}$.

Висновки. Проведені дослідження дали змогу оцінити зменшення витрат енергії в механізмах пересування з частотно-регульованим приводом порівняно з асинхронним приводом з фазним ротором і визначити закономірності зміни співвідношення витрат енергії обох типів приводів для різних робочих циклів. Експериментальним шляхом на стенді механізму пересування було визначено характер зміни витрат енергії при частотно-регульованому приводі і порівняно його з характером змін витрат в асинхронному приводі з фазним ротором на різних етапах робочого циклу. На основі досліджень встановлено закономірність зміни ККД на етапі розгону і зміни співвідношення еквівалентної потужності за робочий цикл для обох типів приводів. Розрахована залежність співвідношення еквівалентних потужностей обох типів приводів для досліджуваного механізму пересування візка мостового крану від тривалості

рівномірного ходу за різних способів гальмування. Встановлено, що частотно-регульований привід може споживати енергії в 1,25-1,9 разів менше ніж асинхронний з фазним ротором в залежності від тривалості рівномірного ходу. Найбільша перевага щодо витрат енергії виходить при використанні частотно-регульованого приводу в механізмах, які працюють тривалий час в пуско-гальмівних режимах за різних значень усталених швидкостей і незначний час у сталих режимах на номінальній швидкості при рекуперативному гальмуванні.

Література

1. Браславський І.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / І.Я. Браславський, З.Ш. Ішматов, В.Н. Поляков. – М.: «Академия», 2004. – 256 с.
2. Ключев В.І. Теория электропривода. / В.І. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
3. Браславський І.Я. Об эффективности применения частотно-регулируемого электропривода в подъёмно-транспортных машинах / І.Я. Браславський, З.Ш. Ішматов, Ю.В. Плотников // Проблемы автоматизации электропривода. Теория и практика. Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков, 2003. – №10. – Т.1. – С.144-145
4. Певзнер Є.М. Электрооборудование грузоподъёмных кранов / Є.М. Певзнер, Є.В. Попов, М.І. Аксьонов и др. – М.: Россельхозакадемия, 2009. – 360 с.
5. Андрущенко О.А., Бойко А.О., Бабийчук О.Б. Анализ энергетической эффективности электроприводов пассажирских лифтов // Вісник НТУ «ХПИ». Випуск 28. «Проблеми АЕП. Теорія і практика», 2010. – с. 503-504
6. Решетняк С.Н. К вопросу о применении частотно-регулируемого привода шахтных подъемных установок / С.Н. Решетняк // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – №5. – С.230-232
7. Grygorov, O.V. Realization of energy-saving control modes on cranes of great load- carrying capacity / O.V. Grygorov, Y.I. Zaytsev, V.P.Svirgun, V.V. Stryzhak // Revista Minelor – nr. 4/2010 – s.7-14.
8. О.В., Григоров Энергобережения шляхом застосування раціонального керування асинхронних електроприводів ВПМ / О.В.Григоров, В.П.Свіргун, В.В.Стрижак та ін. // Вісник НТУ "ХПИ" "Технології в машинобудуванні". – №49/2010.
9. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. - 6-е изд., доп. и перераб. - М.: Энергоиздат, 1981. - 576 с., ил.