

# ТЕХНІЧНІ НАУКИ

DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2019-2-66-50>

УДК 336.72

Гого В.Б., Михайлов О.І.

Індустріальний інститут Донецького національного технічного університету

## ОБГРУНТУВАННЯ НАПРЯМУ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ШАХТНИХ ПІДЙОМНИХ УСТАНОВОК

**Анотація.** Досліджено питання визначення напрямку підвищення ефективності роботи систем шахтних підйомних установок (ШПУ) на основі модернізації засобів та алгоритмів управління. Викладено сутність алгоритмізації дій ШПУ у разі виникнення аварій у виробках вугільної шахти. Обґрунтовано визначальні характеристики для підвищення ефективності ШПУ із застосуванням варіацій частотних характеристик силових електродвигунів. Також досліджено питання визначення та обґрунтування напрямку підвищення ефективності системи управління ШПУ із застосуванням варіацій частотних характеристик силових електродвигунів. Обґрунтовано найбільш перспективні для ШПУ системи управління на основі регулювання кутової швидкості зміною частоти напруги, що живить, а також головні переваги обраної нами системи у порівнянні з іншими системами.

**Ключові слова:** шахтна підйомна установка, електричний двигун, система управління, частотні характеристики, кутова швидкість.

Gogo Volodymyr, Mihaylov Oleksii

Industrial Institute of Donetsk National Technical University

## JUSTIFICATION OF THE DIRECTION OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF SYSTEMS OF MINE HOUSING PLANTS

**Summary.** The question of determining the direction of increase in the efficiency of the operation of the systems of mine hoisting installations based on the modernization of tools and control algorithms is investigated. The essence of algorithmization of silos based on thyristor converters is described. Reasonably defining characteristics to improve the efficiency of silos with the use of variations in the frequency characteristics of power motors. Also, the problem of definition and substantiation of the direction of increasing the efficiency of the control system of mine lifting installations with the use of variations of the frequency characteristics of power electric motors is researched. The most promising for mine lifting installations control system based on angular speed regulation by changing the frequency of supply voltage and the main advantages of the system chosen by us in comparison with other systems is substantiated. Was highlighted that the main part of the identified problem is the inappropriate use of electric energy by the main lifting systems of the mine and the use of outdated control means, mainly based on the "generator – engine" system (G – E) and that old management system has some disadvantages, namely: low energy efficiency; low  $\cos\varphi$ ; the inertia of the regulatory process, etc., as well as certain incidents in operation. Substantiated why the thyristor converter is the main type of converters used in the conditions of the operation of the ESS in the coal industry, in a controlled electric drive of a direct current. Also substantiated why precisely the synchronous electric motors (SEM) in the system of the "frequency converter – synchronous electric motor" (FC – SEM) have higher energy indices than asynchronous electric motors (AED) and why they are used in unregulated electric and high-power electric motors with a long operating mode. It is substantiated how significant electric energy consumption by modern coal mines of Ukraine falls on the most important mine lifting installations. The actual directions for improving their efficiency are determined by improving the systems of control of mine lifting installations.

**Keywords:** mine lifting installation, electric motor, control system, frequency characteristics, angular velocity.

**Постановка проблеми.** Значні витрати електричної енергії сучасними вугільними шахтами України припадають на головні шахтні підйомні установки, а тому визначення напрямків для підвищення їх ефективності шляхом удосконалення систем управління ШПУ на основі застосування функціональних груп «тиристорний перетворювач – електричний двигун» (ТП-ЕД) та «перетворювач частоти електричного струму – синхронний електричний двигун» (ПЧ-СЕД) є актуальним як у науковому, так і в техніко-економічному аспектах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відомо, що основним недоліком сучасних систем управління ШПУ є загальна низька енергетична ефективність, особливо у показнику кінцевого зна-

чення коефіцієнту корисної дії всієї системи, на що вказує низка наукових праць, зокрема, результати досліджень, викладених у роботах [1–6, с. 10].

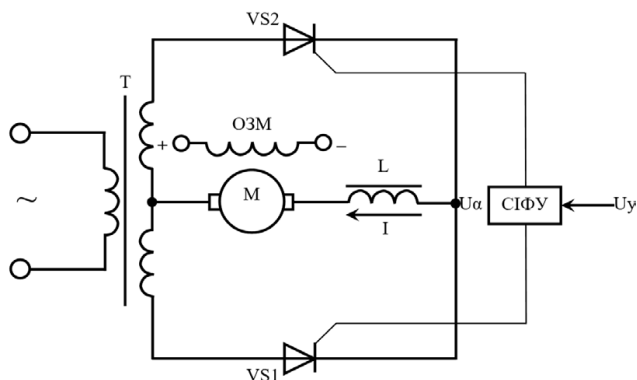
На жаль, у відомій інформації недостатньо викладено матеріалів стосовно підвищення ефективності роботи систем шахтних підйомних установок та напрямків модернізації алгоритмів управління.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** За нашим переконанням, основною частиною означеної проблеми є нерациональне використання електричної енергії системами головного підйому шахти та застосування застарілих засобів управління, головним чином, на основі системи «генератор – двигун» (Г-Д). Стара система управління має наявні

недоліки, а саме: низький енергетичний ККД; низький показник «cosφ»; інерційність процесу регулювання тощо, а також певна аварійність у функціонуванні.

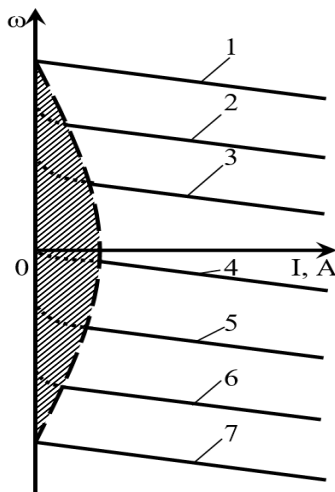
**Мета статті** полягає у визначенні та обґрунтуванні напрямку підвищення ефективності системи управління ШПУ із застосуванням варіацій частотних характеристик силових електродвигунів.

**Виклад основного матеріалу.** Діюча система ТП-ЕД для ШПУ має у складі тиристорний перетворювач (ТП) та електричний двигун (ЕД), наприклад потужністю до 4 тис. кВт з робочою напругою до 6 кВ. Як варіант існує схема електричного однофазного кола «система ТП-Д», що наведена на рис. 1 [2].



**Рис. 1. Схема електричного однофазного кола «Система ТП-Д»:**

T – трансформатор напруги; VS1, VS2 – тиристри; L – дросель, що згладжує; ОЗМ – обмотка збудження мотора (двигуна); М – мотор (двигун); СІФУ – система імпульсно-фазового управління;  $U_a$  – напруга, що залежить від кута затримки відкриття тиристорів  $\alpha$ ;  $U_y$  – напруга, що подається на СІФУ;  $I$  – сила електричного струму, що подається на двигун, А



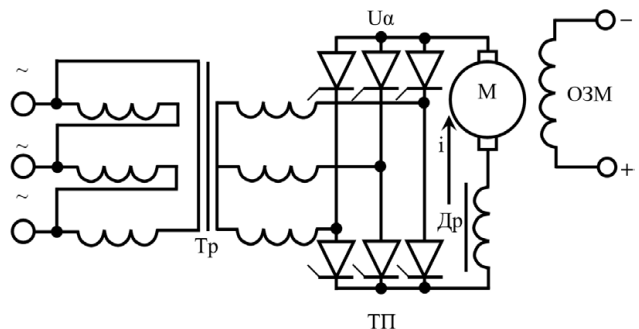
**Рис. 2. Графічна інтерпретація електромеханічної характеристики залежності кутової швидкості холостого ходу двигуна  $\omega$  від сили електричного струму якоря двигуна ( $I$ ) в системі ТП-Д:**

$\omega$  – кутова швидкість холостого ходу двигуна, об/хв;  $I$  – сила електричного струму якоря двигуна, А; 1, 7 – кутова швидкість холостого ходу двигуна номінальна; 2, 6 – кутова швидкість холостого ходу двигуна при збільшенні магнітного потоку і жорсткості механічних характеристик двигуна в 1,5 рази; 3, 5 – кутова швидкість холостого ходу двигуна при збільшенні магнітного потоку і жорсткості механічних характеристик двигуна в 2 рази; 4 – кутова швидкість холостого ходу двигуна, коли напруга дорівнює нулю

Результати аналізу якісних залежностей сили змінного електричного струму ( $I$ ) та циклічної частоти ( $\omega$ ) для системи ТП-Д у характеристиці потужності електричного двигуна приведена на рис. 2.

Враховуючи наведене на рис. 2, визначаємо, що у функціональній групі ТП-Д для двигуна сталого струму тієї ж потужності з незалежним збудженням має рацію створити тиристорний перетворювач струму.

Отже, функціональна схема кола для трифазного електричного струму у групі «система ТП-Д» має бути такою, що наведено на рис. 3 [3].



**Рис. 3. Схема електричного трифазного кола «Система ТП-Д»:**

$T_p$  – трансформатор напруги; ТП – тиристорний перетворювач;  $L_p$  – дросель, що згладжує; ОЗД – обмотка збудження електричного двигуна; М – двигун;  $U_a$  – напруга, що залежить від кута затримки відкриття тиристорів  $\alpha$ ;  $I$  – сила електричного струму, що подається на двигун, А

Відомо, що середнє значення випрямленої напруги для тиристорного перетворювача аналітично визначається за формулою:

$$U_d = \sqrt{2} \cdot U_2 \cdot \sin \frac{m}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{m} \cdot \cos \alpha = U_{d0} \cos \alpha,$$

де  $U_2$  – діюче значення фазної напруги вторинної обмотки живильного трансформатора;  $m$  – число пульсацій випрямленої напруги;  $\alpha$  – кут затримки відкриття тиристорів;  $U_{d0}$  – максимальне значення середньої випрямленої напруги при  $\alpha = 0$ .

Отже, використовуючи рівняння динаміки ТП, рівняння рівноваги ЕРС у якірному колі, рівняння механічної характеристики двигуна у системі ТП-Д, а також рівняння руху електроприводу при жорстких механічних зв'язках, обґрунтовуємо структурну блок-схему системи ТП-Д, компоновка якої буде мати вигляд, що наведений на рис. 4.

В цій блок-схемі позначено:

$K_n = \frac{E_d}{U_y} = const$  – коефіцієнт посилення ТП по напрузі, що характеризується відношенням ЕРС ТП  $E_d$  до напруги керування  $U_y$ ;

$T_n = \frac{L_{dp}}{R_{dp}}$  – електромеханічна постійна часу ТП,

що враховує дискретність, запізнювання і наявність фільтрів в СІФУ – характеризується відношенням індуктивності дроселя, що згладжує  $L_{dp}$  до його активного опору  $R_{dp}$ ;

$p = -\frac{1}{T_n}$  – корінь характеристичного рівняння;

$e_d$  – діюче значення ЕРС ТП;

$e$  – амплітудне значення ЕРС ТП;

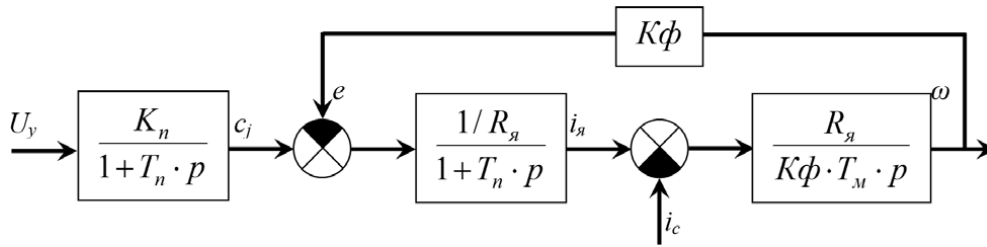


Рис. 4. Блок-схема електричного кола «Система ТП-Д»

$R_я$  – електричний опір якорного кола двигуна;  
 $i_я$  – струм якорного кола двигуна;  
 $i_c$  – струм кола статора двигуна;  
 $Kφ$  – коефіцієнт, що характеризує кут зміщення фази напруги  $φ$ ;  
 $T_м$  – механічна постійна часу ТП;  
 $ω$  – швидкість холостого ходу двигуна.  
 При поданні рівняння

$$K_n \cdot U_y = e_d (1 + T_n \cdot p)$$

у вигляді

$$K_n^1 \cdot U_y = e_d (1 + T_n \cdot p) \cdot \omega_0,$$

де  $K_n = \frac{E_d}{U_y} = const$ ;  $K_n^1 = K_n \cdot \omega_0$  – коефіцієнти посилення ТП по напрузі, що характеризується відношенням ЕРС ТП  $E_d$  до напруги керування  $U_y$ ;  $e_d$  – діюче значення ЕРС ТП;  $T_n = \frac{L_{op}}{R_{op}}$  – мала постійна часу ТП, що враховує дискретність, запізнювання і наявність фільтрів у СІФУ – характеризується відношенням індуктивності дроселя, що згладжує  $L_{op}$  до активного опору  $R_{op}$ ;

$p = -\frac{1}{T_n}$  – корінь характеристичного рівняння;

$\omega_0$  – швидкість ідеального холостого ходу двигуна, то структурна блок-схема прийме вигляд, що на рис. 5.

У блок-схемі 5 позначено:

$\omega_2$  – швидкість холостого ходу двигуна при збільшенні магнітного потоку і жорсткості механічних характеристик двигуна в 1,5 рази;

$\beta$  – кут між віссю вала двигуна і обмоткою статора двигуна;

$M$  – обертовий момент двигуна;

$M_c$  – момент обертання магнітного поля статора двигуна.

Важливо зазначити, що, як відомо, тиристорний перетворювач являє собою напівпровідниковий статичний перетворювач і є основним типом перетворювачів, що використовується в умовах дії ШПУ у вугільній промисловості, у регульованому електроприводі постійного струму.

Тиристорний перетворювач має узгоджувальний трансформатор (Т), який має дві вторинні обмотки, два тиристири VS1 і VS2, згладжувач реактор L і систему імпульсно-фазового управ-

ління тиристорами (СІФУ). Тиристорний перетворювач забезпечує регулювання напруги на двигуні М потужністю до 4 тис. кВт з напругою до 6 кВ за рахунок зміни середнього значення ЕРС перетворювача  $E_w$ . Це досягається регулюванням за допомогою системи СІФУ по сигналу  $U_y$  кута  $\alpha$  управління тиристорами. Кут  $\alpha$  також є кутом затримки відкриття тиристорів VS1 і VS2 щодо моменту, коли напруга на їх анодах стає позитивною.

Коли кут  $\alpha$  мінімальний, тобто тиристири VS1 і VS2 здійснюють двонапівперіодне випрямлення, до якоря двигуна М прикладається повна напруга. Якщо за допомогою СІФУ кут  $\alpha$  збільшувати, то ЕРС тиристорного перетворювача зменшуватиметься і обороти двигуна М знизяться.

Зважаючи на пульсуючий характер ЕРС перетворювача струм в колі якоря також є пульсуючим. Такий характер струму надає шкідливий вплив на роботу двигуна М, приводячи до погіршення умов роботи його колектора, додаткових втрат енергії і нагріву. Для зменшення пульсацій струму в коло якоря зазвичай включається згладжувач реактор, індуктивність L якого вибирається залежно від допустимого рівня пульсацій струму.

Зазначимо, що головні переваги системи ТП-Д у порівнянні з іншими системами такі: висока енергетична ефективність, визначувана високим ККД трансформаторів (0,93÷0,98) електроприводу; плавність регулювання; значний діапазон регулювання швидкості; жорсткість отримуваних штучних характеристик; стабільна дія тиристорного керування потужними електродвигунами потужністю до 4 тис. кВт і напругою до 6 кВ на клітьових та скіпових підйомних установках тощо.

Руховому режиму відповідає область в 1 і 3 квадратах, режиму динамічного гальмування відповідає характеристика, що проходить через початок координат при  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ . Режиму противключення відповідає область, укладена між віссю моментів і характеристикою динамічного гальмування. Режиму рекуперації відповідає область між віссю ординат у 2 і 4 квадратах і характеристикою динамічного гальмування, що підтверджено у роботі [4].

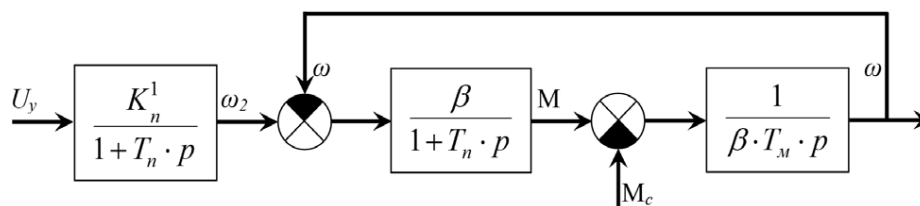


Рис. 5. Блок-схема електричного кола «Система ТП-Д»

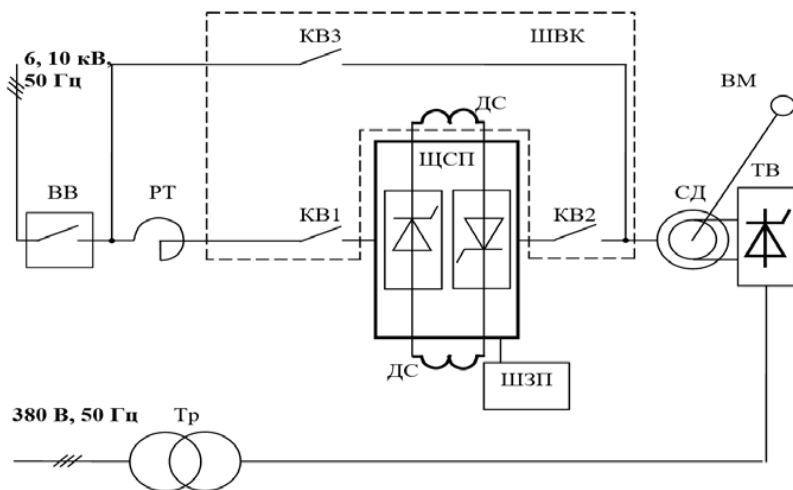


Рис. 6. Схема електричного кола «Система ПЧ-СЕД»:

ВВ – високовольтний вимикач КРУ; РТ – реактор, що сам обмежує струм; КВ1+КВ3 – контактори високовольтні; ЩСП – щит силовий перетворювальний із системою управління і регулювання; ДС – дросель, що згладжує; ШЗП – шафа захисту від перенапруг; ШВК – шафа високовольтних контакторів; ТВ – тиристорний збудник; Тр – трансформатор живлення збудника; СД – синхронний двигун; ІМ – механізм виконання (вентилятор, насос тощо)

За нашим дослідженнями, найбільш перспективним для ШПУ є застосування системи ПЧ-СЕД на основі регулювання швидкості зміною частоти напруги, що живить. Цей спосіб зв'язку та розробка напівпровідникових перетворювачів частот на базі тиристорів має найбільшу перспективу широкого застосування.

Для реалізації цього способу має сенс застосовувати статичні перетворювачі частоти (ПЧ), що розділяються на дві групи: 1) ПЧ без зведеного постійного струму з безпосереднім зв'язком живильної мережі та навантаження (безпосередній ПЧ); 2) ПЧ з проміжним зірковим сталим електричним струмом (двома ланками ПЧ).

Важливо зазначити, що синхронні електричні двигуни (СЕД) у складі системи ПЧ-СЕД мають більш високі енергетичні показники, ніж асинхронні, і застосовуються у регульованих електроприводах великої і середньої потужності з тривалим режимом роботи. До того ж СЕД здійснює компенсацію реактивної потужності інших електроспоживачів, так званого синхронного компенсатора, та є джерелом енергоємності реактивної потужності, що дозволяє отримати економію енергії. Характерною особливістю СЕД є постійне скорочення враження ротора у синхронному режимі поза залежністю від навантаження, що, зокрема, доводять результати роботи [5].

Як можлива функціональна схема електричного кола системи ПЧ-СЕД наведена на рис. 6.

Важливо звернути увагу на те, що високовольтні тиристорні перетворювачі частоти серії СМП-М-Р призначені для регулювання частоти обертання механізмів з приводними синхронними двигунами напругою 6 і 10 кВ і потужністю від 1 до 10 МВт. Використання ШВК з контакторами КВ1+КВ3 дозволяє включити систему ПЧ-СД у розтин (між наявною високовольтним осередком КРУ і синхронним двигуном). При цьому не потрібно додаткового осередку КРУ для живлення ПЧ-СД, тому що контактори КВ1 і КВ2 вклю-

чаються на вході і виході перетворювача, а третій КВ3 є шунтувальним і включається при переводі двигуна на живлення від мережі [6].

За нашими дослідженнями, головні переваги системи ПЧ-СЕД у порівнянні з іншими системами двигуна постійного струму, з точки зору регульованих характеристик, з достоїнствами синхронного двигуна, тобто: простота побудови та управління; практично лінійні механічна і регульовальна характеристики двигуна; просте регулювання частоти обертання двигуна; великий пусковий момент, особливо з послідовним збудженням; більша компактність у порівнянні з іншими двигунами; можливість використання як у руховому, так і в генераторному режимах; можливість досягнення оптимального режиму при наявності реактивної енергії тощо. До того ж, синхронний двигун може

діяти без споживання реактивної енергії і не видає її в мережу (коефіцієнт потужності  $\cos\phi$  дорівнює одиниці).

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у тому, що аналітично обґрунтовано напрям прийняття важливих рішень щодо побудови систем управління потужними енергетичними та механічними установками на основі застосування тиристорних перетворювачів частоти електричного струму для підвищення енергетичної ефективності роботи, як наприклад, комплексами ШПУ у вугільній промисловості України.

**Очікуваний ефект** від отриманих результатів досягається шляхом застосування систем управління потужними комплексами з тиристорними перетворювачами частоти електричного струму, що дозволяють економити витрати електричної енергії в межах 10-15% від традиційних систем.

#### Узагальнення результатів дослідження

1. Умовою для підвищення ефективності роботи комплексних ШПУ вугільної промисловості України є напрям повної модернізації енергетичних систем управління із застосуванням ТП-СД та ПЧ-СД.

2. Ефективність систем управління енергетичними комплексами на основі тиристорних перетворювачів частоти зростає з підвищенням надійності і безперебійності роботи окремих елементів ШПУ, незважаючи на термін їх експлуатації, а також у загальному підвищенні безпеки роботи систем.

**Висновки і пропозиції.** Таким чином, нові системи управління комплексними ШПУ на основі тиристорних перетворювачів мають бути базою для енергетичної модернізації вугільної промисловості та інших енергоємних галузей в Україні. Тому для подальшого прогресу цього напрямку планується продовжити дослідження, особливо стосовно раціональної компоновки та оптимізації систем ТП-ЕД та ПЧ-ЕД.



**Список літератури:**

1. Донець О.В. Система «генератор – двигун» (Г-Д). *Теорія електропривода*. 2011. № 3. С. 32. URL: [http://4exam.info/book\\_152\\_glava\\_32\\_3.11.\\_Sistema\\_«generator\\_-\\_dvigun»\\_\(G-D\).html](http://4exam.info/book_152_glava_32_3.11._Sistema_«generator_-_dvigun»_(G-D).html) (дата звернення: 05.02.2019).
2. Донець О.В. Система «тиристорний перетворювач-двигун». *Теорія електропривода*. 2011. № 3. С. 33. URL: [http://4exam.info/book\\_152\\_glava\\_33\\_3.12.\\_Sistema\\_«tiristornijj\\_peretvorjuvach\\_-\\_dvigun»\\_html](http://4exam.info/book_152_glava_33_3.12._Sistema_«tiristornijj_peretvorjuvach_-_dvigun»_html) (дата звернення: 08.02.2019).
3. Донець О.В. Система тиристорний перетворювач – двигун (ТП – Д). *Теорія електропривода*. 2011. № 3. С. 19. URL: [https://studopedia.ru/4\\_77327\\_sistema-tiristorniy-preobrazovatel--dvigatel-tp--d.html](https://studopedia.ru/4_77327_sistema-tiristorniy-preobrazovatel--dvigatel-tp--d.html) (дата звернення: 11.02.2019).
4. Борисов Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н. Электротехника : монография / под ред. Л.Е. Алекина. Москва : Печатный двор, 1984. 553 с.
5. Иванов В.В. Электроприводы з двигунами змінного струму. *Електричний привід*. 2009. № 1. С. 8. URL: <https://studfiles.net/preview/2828707/page:8/> (дата звернення: 14.02.2019).
6. Иванов В.В. Перетворювач частоти синхронний високовольтний типу СМП-М-Р. *Електричний привід*. 2011. № 1. С. 1. URL: <http://www.technoros.spb.ru/vvpc-pcsv.html> (дата звернення: 17.02.2019).

**References:**

1. Donets O.V. (2011). Systema «henerator – dvyhun» (H-D) [System "generator – engine" (G – E)]. *Teoriya elektropryvoda*, vol. 3, no. 1, p. 32. Available at: [http://4exam.info/book\\_152\\_glava\\_32\\_3.11.\\_Sistema\\_«generator\\_-\\_dvigun»\\_\(G-D\).html](http://4exam.info/book_152_glava_32_3.11._Sistema_«generator_-_dvigun»_(G-D).html) (accessed 05 February 2019).
2. Donets O.V. (2011). Systema «tyrystornyy peretvoryuvach – dvyhun» ["Thyristor Transducer – Engine" System]. *Teoriya elektropryvoda*, vol. 3, no. 1, p. 33. Available at: [http://4exam.info/book\\_152\\_glava\\_33\\_3.12.\\_Sistema\\_«tiristornijj\\_peretvorjuvach\\_-\\_dvigun»\\_html](http://4exam.info/book_152_glava_33_3.12._Sistema_«tiristornijj_peretvorjuvach_-_dvigun»_html) (accessed 08 February 2019).
3. Donets O.V. (2011). Systema tyrystornyy peretvoryuvach – dvyhun (TP – D) [System thyristor converter – engine (TC – E)]. *Teoriya elektropryvoda*, vol. 3, no. 2, p. 19. Available at: [https://studopedia.ru/4\\_77327\\_sistema-tiristorniy-preobrazovatel--dvigatel-tp--d.html](https://studopedia.ru/4_77327_sistema-tiristorniy-preobrazovatel--dvigatel-tp--d.html) (accessed 11 February 2019).
4. Borisov Yu.M., Lipatov D.N., Zorin Yu.N. (1984). Elektrotehnika. Uchebnoye posobiye [Electrical Engineering. Tutorial]. Moscow : Pечатnyy dvor. (in Russian)
5. Ivanov V.V. (2009). Elektropryvody z dvyhunamy zminnoho strumu [Electric drives with AC motors]. *Elektrychniy pryvid*, vol. 1, no. 1, p. 8. Available at: <https://studfiles.net/preview/2828707/page:8/> (accessed 14 February 2019).
6. Ivanov V.V. (2009). Peretvoryuvach chastoty synkhronnyy vysokovol'tnyy typu SMP-M-R [The synchronous high-voltage frequency converter type of SMP-M-R]. *Elektrychniy pryvid*, vol. 1, no. 2, p. 1. Available at: <http://www.technoros.spb.ru/vvpc-pcsv.html> (accessed 17 February 2019).