

# Удосконалення безпосереднього перетворювача частоти для пуску потужних синхронних електродвигунів

Сінчук О. М., д.т.н, проф., ORCID [0000-0002-7621-9979](https://orcid.org/0000-0002-7621-9979)  
e-mail [speet@ukr.net](mailto:speet@ukr.net)

Пересунько І. І., ассис., ORCID [0000-0002-4901-0061](https://orcid.org/0000-0002-4901-0061)  
e-mail [iperesynko@gmail.com](mailto:iperesynko@gmail.com)

ДВНЗ «Криворізький національний університет»  
Кривий Ріг, Україна

Михайличенко Д. А., ст.викл.,  
e-mail [emdenn@mail.ru](mailto:emdenn@mail.ru)

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
Кременчук, Україна

**Реферат**— У роботі проведено дослідження систем пуску потужних синхронних електродвигунів та визначено їхні основні недоліки. Одним із головних недоліків систем є пускові пікові струми, що сягають 5 – 10-кратних значень. Нами запропоновано спосіб роздільного керування напругою та частотою при пуску потужного синхронного електроприводу, що дозволить уникнути великих пускових струмів при формуванні електричних параметрів живлення синхронного електродвигуна. У даному способі здійснюється ступінчатий перехід між напругою та частотою, що дозволить зменшити пускові струми потужних перетворювачів та синхронних двигунів на 30% та отримати форми кривих струму і напруги на виході з меншою гамою гармонічних складових.

Бібл. 10, рис. 2, табл. 1.

**Ключові слова** — синхронний електропривод; безпосереднього перетворювача частоти; циклокоінвертор.

## I. ВСТУП

Основні напрямки підвищення електроефективності видобутку корисних копалин широко відомі. Однак вони, як правило, стосуються заново проєктованих або переобладнаних гірничих підприємств – і то, в більшій своїй частині, вугільновидобувних виробництв. У розрізі реалізації напрямками підвищення електроефективності діючих залізрудних шахт є: модернізація застарілого за всіма показниками обладнання, модернізація установок з електроприводом з метою зменшення споживання електричної енергії, модернізація систем електропостачання і оптимізація процесів електроенергоспоживання з можливістю адаптивного управління цими процесами [1].

Якщо розглядати споживачів електричної енергії в промисловості, а зокрема у залізрудних шахтах (рис. 1), то тут домінують електричні двигуни технологічного обладнання, вони споживають в середньому до 94% всієї ЕЕ. У свою чергу, серед електричних двигунів виділяються синхронні, які становлять понад 40% від усього обсягу встановлених потужностей всіх видів електродвигунів і споживають майже 60% від загального обсягу енергії, споживаної електродвигунами різних типів і видів [1].

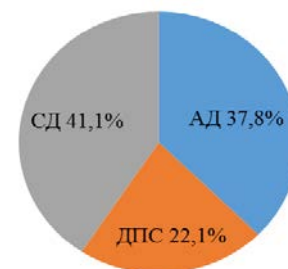


Рис. 1 - Діаграма співвідношень встановлених потужностей за видами електричних двигунів по шахтах Криворізького залізрудного басейну (2010 - 2016 роки).

*Метою даної статті є визначення недоліків (а саме великі пускові струми) систем пуску та реалізація нового підходу до керування роздільною змінною величиною напруги та частоти для уникнення великих пускових струмів в потужних синхронних двигунах.*

## II. МАТЕРІАЛ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Синхронні електродвигуни, як правило, використовуються для приводу механізмів, в котрих не є обов'язковим регулювання швидкості: таких, як потужні насоси, компресори, вентилятори головного повітрювання, скіпові підйомні установки тощо.



Використання синхронного електроприводу як приводного дуже заманливо в багатьох механізмах.

Однак ряд недоліків стримує застосування синхронного електроприводу. Однією з головних проблем є пуск і втягування в синхронізм двигуна [2]–[4]. Використовувани в теперішній час способи пуску, – прямий, реакторний, трансформаторний, – супроводжуються 5 - 10-кратними піками струмів статора і ротора двигуна, затягуванням процесу пуску, складнощами при входженні в синхронізм двигуна, просіданням напруги високовольтної мережі живлення, перегрівом і значними електродинамічними напругами обмоток [5].

Розглянуті вимоги до системи пуску [6]–[8] і збудження синхронного електроприводу, проаналізовані відомі системи і способи управління ними, також описані переваги і недоліки цих систем в табл. 1. [2], [3], [6].

Дійшли висновку, що синхронний привод на залізородних підприємствах вимагає удосконалення схем пуску промислових установок.

Розглянуто традиційні схеми частотних перетворювачів для електроприводів, які здебільшого побудовані за схемою з ланкою постійного струму. Також деяке поширення набули безпосередні перетворювачі частоти (циклоінвертори) [9]. Остання схема має високий коефіцієнт корисної дії, є можливість реалізації рекуперації; також вона має низьку реактивну потужність через відсутність фільтруючих елементів.

Проте безпосередні перетворювачі мають ряд недоліків: вихідна частота перетворювача буде менше частоти мережі живлення, неможливо плавне регулювання частоти, перетворена напруга має

низьку якість, є перевищення допустимого значення струму при пуску електродвигуна.

Схема циклоінвертора (безпосереднього перетворювача частоти БПЧ) наведена на рис. 2 [10]. Циклоінвертор формує вихідну напругу на півхвилі вхідної напруги, він реалізує закон частотного регулювання  $U_S/f_S = const$  ступінчастою зміною частоти вихідної напруги. Фіксовані частоти  $f_n = f_S/n$ , де  $n=1, 2, 3, \dots$ .

Проблема полягає в тому, що підвищення напруги та частоти за законом  $U_S/f_S = const$  супроводжується великим стрибком струму, а саме при зміні частоти з  $0,5f_S$  на  $1,0f_S$  та напруги з  $0,5U_S$  на  $1,0U_S$  значення струму при спрощеному розрахунку буде дорівнювати:

$$I_{\max} = \frac{1,0}{0,5} I_{\text{ном}} = 2,0 I_{\text{ном}} \quad (1).$$

З розрахунку (1) видно, що пропорційне зростання напруги і частоти на останньому рівні  $0,5 \rightarrow 1,0$  супроводжується неприпустимою величиною струму, який дорівнює  $\geq 1,5 I_{\text{ном}}$ .

Для вирішення даної проблеми, а саме зниження величини струму, пропонується роздільне керування величинами  $f_S$  та  $U_S$ , а саме виконувати ступінчатий перехід: спочатку підвищувати напругу до проміжного рівня  $U''_{\Delta}$ , після чого підвищувати частоту до наступного допустимого значення, з досягненням якого напруга підвищується з проміжного рівня до значення  $U_S$  відповідно встановленій частоті  $f_S$ .

Таблиця 1. Порівняння характеристик систем полегшеного пуску

Способи пуску	Переваги	Недоліки
З спеціальної розщепленої ОЗ [4]	Значно підвищено електромагнітний момент	Не усувається негативне явище при пуску
З накопичувачем енергії в ОЗ [4]	Значно підвищено електромагнітний момент	Не усувається негативне явище при пуску
Реакторний [4]	Простота реалізації і пуску	Мало усуваються негативні явища при пуску
ЕМПЧ за схемою «АД - СД» [4]	Мала потужність розгінного двигуна	Складність управління пуском. Погані масогабаритні показники
ЕМГТЧ за схемою «СД - АД» [4]	Простота процесу пуску	Не усувається негативне явище при пуску. Погані масогабаритні показники
ЕМГТЧ за схемою «СД - АД» [4]	Можливість включення в мережу за допомогою регулювального резистора	Потрібні валобертвовий пристрій і потужний регулювальний реостат. Погані масогабаритні показники
Частотний [4]	Пуск і точна синхронізація. Хороші масогабаритні показники	Потрібні датчики положення ротора і пристрій точної синхронізації
Звичайний пуск за допомогою АД з фазним ротором [4]	Пуск і точна синхронізація з мережею	Потрібні потужний регулювальні реостати і пристрій точної синхронізації
Каскадний пуск за допомогою АД з фазним ротором [4]	Пуск і точна синхронізація. Пристрій точної синхронізації не потрібен	Потрібні потужні регулювальні реостати. Погані масогабаритні показники
Розгін за допомогою ДПС в системі з РВУ [4]	Простота процесу пуску. Добірні масогабаритні показники	Не усуваються негативні явища в кінці пуску
Розгін за допомогою ДПС в системі ТПД [4]	Пуск і точна синхронізація. Добірні масогабаритні показники	Необхідний пристрій точної синхронізації
Частотно-імпульсний [4]	Точна синхронізація з мережею відбувається природно. Добірні масогабаритні показники	Не усуваються негативні явища на початку пуску

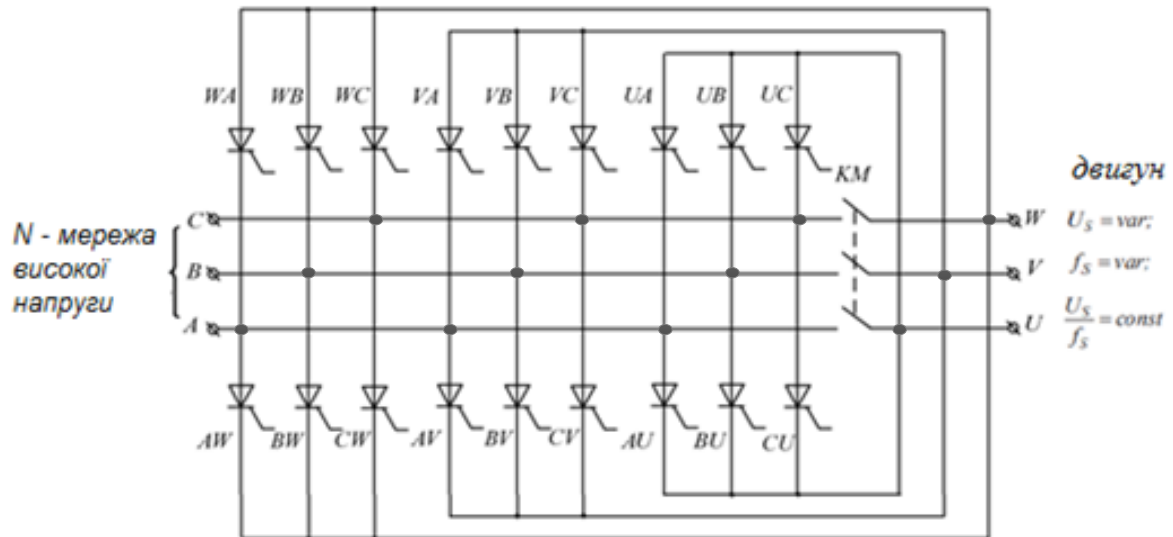


Рис. 2 Схема циклоінвертора (безпосереднього перетворювача частоти БПЧ).

При ступінчатому переході на останньому рівні відбудеться перехід з частоти 0,5 в.о. на 1,0 в.о.

$$\frac{U''_{\Delta}}{0,5} = \frac{1,0}{U''_{\Delta}}; U''_{\Delta} = \sqrt{0,5 \times 1,0} = 0,707.$$

Струм при цьому

$$I_{\max}(\Delta \rightarrow 1,0) = 1,0/0,707 \times I_{\text{ном}} = 1,414 I_{\text{ном}}. \quad (2)$$

З розрахунку (2) видно, що при ступінчатому зростанні напруги і частоти на останньому рівні 0,5  $\rightarrow$  1,0 супроводжується допустимим значенням струму.

Отже, при використанні ступінчатого керування ми можемо знизити пускові струми на 30 % в порівнянні з пропущеною системою.

#### ВИСНОВКИ

- Сформовано стратегію та тактику усунення головного недоліку перевищення значень пускових струмів, що в подальшому призведе до розробки новітніх систем пуску для потужних синхронних електроприводів.
- Запропоновано рішення для уникнення великих пускових струмів основаного на законі частотного регулювання  $U_s/f_s = \text{const}$  в якому реалізована ступінчаста почергова зміна вихідної частоти та напруги що призведе до зниження пікових пускових струмів на 30%.

#### ЛІТЕРАТУРА

[1] О. М. Синчук, І. О. Синчук, Т. М. Берідзе, and А. М. Ялова, "Metod ocinyuvannya efektyvnosti spozhyvannya elektrychnoyi energiiyi zalizorudny'mu` pidpry'emstvamy` [Method of estimation of efficiency of electric energy consumption by iron ore enterprises]." *Elektrotexnichni ta komp'yuterni sy'stemy`*. — Odes'ky`j NPU, pp. 49–57, 2013.

[2] К. В. Nosov and N. М. Dvorak, *Sposoby i sredstva samozapuska elektrodvigatelay` [Methods and means of self-starting electric motors]*. Moskva, 1992, ISBN: 5-283-01162-3.

[3] В. N. Abramovich and A. A. Kruglyiy, *Vozbuzhdenie, regulirovaniye i ustoychivost` sinhronnykh dvigatelay` [Excitation, regulation and stability of synchronous motors]*. Leningrad: Energoatomizdat, 1983,

URL:

[https://books.google.com.ua/books/about/Vozbuzhdenie\\_regulirovaniye.html?id=EQ9MtQEACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.ua/books/about/Vozbuzhdenie_regulirovaniye.html?id=EQ9MtQEACAAJ&redir_esc=y).

[4] Y. A. Biryukov, *Proektirovaniye i issledovaniye sistem vozbuzhdeniya moschnykh sinhronnykh mashin [Designing and researching excitation systems for powerful synchronous machines]*. Leningrad: VNII Elektromash, 1989,

URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001520915>.

[5] О. Синчук and D. Mihaylichenko, "Issledovaniye puskа sinhronnogo dvigatelya s shirotno-impul'snym preobrazovatelem chastoty [Investigation of the start-up of a synchronous motor with a pulse-width frequency converter]," *TEKHNICHNA ELEKTRODYNAMIKA*, vol. 4, pp. 108–110, 2014,

URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/TED\\_2014\\_4\\_38](http://nbuv.gov.ua/UJRN/TED_2014_4_38).

[6] N. V. Bukovich, *Avtorizatsiya protsesu puskа ta uvimknennya na paralelnu robotu sinhronnykh mashin [Authorization to the process of launching that synchronization on the parallel robot of synchronous machines]*, NMK VO. Kiev, 1992.

[7] B. G. Menshov and N. N. Haylov, "Rabota sinhronnogo elektroprivoda pri kratkovremennom glubokom snizhenii napryazheniya [Operation of a synchronous electric drive with a short-term deep voltage drop]," *Elektrichestvo*, vol. 11, pp. 19–20, 1984,

URL: [https://www.booksite.ru/elektr/1984/1984\\_11.pdf](https://www.booksite.ru/elektr/1984/1984_11.pdf).

[8] Y. M. Golodnov, *Samozapusk elektrodvigatelay` [Self-starting electric motors]*, Energoatom. Moskva, 1985,

URL: <http://www.amac.md/Biblioteca/data/24/13/1/15.pdf>.

[9] I. O. Sinchuk, A. A. Chernyishev, I. I. Kiba, O. V. Pasko, O. E. Klyuchka, and O. E. Melnik, *Poluprovodnikovyye preobrazovateli elektricheskoy energii v strukturah elektroprivodov. Shemotehnika i printsipy upravleniya: uchebnoye posobie [Semiconductor converters of electrical energy in the structures of electric drives. Circuitry and management]*. Kremenchug, 2008.

[10] Y. P. Goncharov, V. G. Morozov, M. V. Panasenko, V. Y. Romashko, and R. Rudenko, *Volody'my`r Semenov'y`ch, Peretvoryval'na tehnika. Pidruchnyk [Converting technique. Textbook]*. Xarkiv, 2000, ISBN: 9660306970.

Надійшла до редакції 01 червня 2018 р.



УДК 621.31

# Усовершенствование непосредственного преобразователя частоты для пуска мощных синхронных электродвигателей

Синчук О. Н., д.т.н, проф., ORCID [0000-0002-7621-9979](https://orcid.org/0000-0002-7621-9979)

e-mail [speet@ukr.net](mailto:speet@ukr.net)

Пересунько И. И., ассис., ORCID [0000-0002-4901-0061](https://orcid.org/0000-0002-4901-0061)

e-mail [iperesyenko@gmail.com](mailto:iperesyenko@gmail.com)

ГВУЗ «Криворожский национальный университет»  
Кривой Рог, Украина

Михайличенко Д. А., ст.препод.,

e-mail [emdenn@mail.ru](mailto:emdenn@mail.ru)

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
Кременчуг, Украина

*Реферат*— В работе проведено исследование систем пуска мощных синхронных электродвигателей и определены их основные недостатки. Один из главных недостатков систем — пусковые пиковые токи, превышающие 5 - 10-кратные значения. Нами предложен способ раздельного управления напряжением и частотой при пуске мощного синхронного электропривода, что позволит избежать больших пусковых токов при формировании электрических параметров питания синхронного электродвигателя. Данный способ опирается на ступенчатый переход между напряжением и частотой, что позволит уменьшить пусковые токи мощных преобразователей и синхронных двигателей на 30% и получить формы кривых тока и напряжения на выходе с меньшей гаммой гармонических составляющих.

Библ. 10, рис. 2, табл. 1.

*Ключевые слова* - синхронный электропривод; непосредственного преобразователя частоты; циклоконвертор.

UDC 621.31

# Improvement a Direct Frequency Converter to Start Powerful Synchronous Motor

O. M. Sinchuk, Dr.Sc.(Eng.), Prof. ORCID [0000-0002-7621-9979](https://orcid.org/0000-0002-7621-9979)

e-mail [speet@ukr.net](mailto:speet@ukr.net)

I. I. Peresunko, assist., ORCID [0000-0002-4901-0061](https://orcid.org/0000-0002-4901-0061)

e-mail [iperesyenko@gmail.com](mailto:iperesyenko@gmail.com)

State University "Krivoy Rog National University"  
Kryvy Rih, Ukraine

D. A. Mikhailichenko, lecturer,

e-mail [emdenn@mail.ru](mailto:emdenn@mail.ru)

Kremenchutsky flying college of the National Aviation University  
Kremenchuk, Ukraine



**Abstract** — Synchronous motor is usually used in a high-power electric drive, especially for mining and metallurgical enterprises, where the synchronous electric drive capacity is 40%, it consumes of electrical energy and creates production problems at the time of the start-up of powerful synchronous electric drives. There are basic directions for improving the energy efficiency of mining and metallurgical enterprises. However, as a rule, they relate to newly designed or re-equipment of enterprises and then, in the most part, the mining and metallurgical complex. In the long run, modernization of outdated equipment for all indicators, modernization of electric-powered units in order to reduce electric power consumption, modernization of power supply systems and optimization of power consumption processes with the possibility of adaptive management of these processes are the real directions for increasing the efficiency of existing enterprises. The approach and implementation of a new system for starting and driving a synchronous electric drive is proposed, known systems and methods for controlling them are analyzed, and the advantages and disadvantages of these systems are described. During the analysis, it was established that when using a direct frequency converter in the starting system of a synchronous motor, starting currents exceeding the permissible values may occur at the time of starting. A method for separately varying the value of the output voltage and the modulation frequency of a cycloinverter during a transition from a low fixed frequency to a higher one when forming electric power parameters of a synchronous motor is proposed. This method allows a transition to a higher frequency with a smaller current of the converter, which will allow us to obtain the shape of the current and voltage curves at the converter output with a smaller gamut of harmonic components.

Ref. 10, fig. 2, tabl.1.

*Keywords* - synchronous electric drive; direct frequency converter; cycloinverter.

