

Криворізький національний університет  
Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ПЕРЕСУНЬКО ІГОР ІГОРОВИЧ**

УДК 621.313-57, 621.313.32

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГООРІЄНТОВАНИХ ПУСКОВИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА  
ВЕНТИЛЯТОРІВ ГОЛОВНОГО ПРОВІТРЮВАННЯ ШАХТ**

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ І. І. Пересунько

Науковий керівник: Сінчук Ігор Олегович, кандидат технічних наук, доцент

Кривий Ріг – 2021

## АНОТАЦІЯ

*Пересунько І. І.* Формування енергоорієнтованих пускових характеристик синхронного електропривода вентиляторів головного провітрювання шахт. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи». – Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2021. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2021.

**Наукова новизна отриманих результатів** і положень, що виносяться на захист, полягає у підвищенні енергоефективності електромеханічних комплексів вентиляторів головного провітрювання шахт, шляхом розробки і запровадження в практику їх функціонування ефективних методів плавного пуску приводних синхронних двигунів із роботою останніх в енергоорієнтованих межах пускових характеристик.

В роботі отримано наукові результати:

1. Вперше оптимізовано й адресно формалізовано складові теорії синтезу електромеханічних систем з обґрунтуванням і пропозицією для практичної реалізації підходу до вибору варіантів підвищення енергоефективності функціонування електроприводів вентиляторів головного провітрювання шахт;

2. Розроблено метод, що передбачає використання в обмотках кола статора синхронного двигуна IGB транзисторного багаторівневого перетворювача частоти для енергоефективного частотного пуску з функціонуванням на проміжних пускових позиціях, що дозволяє мінімізувати похідні негативні фактори впливу перехідних пускових струмів в обмотках статора двигуна, а також нормалізувати роботу електропривода вентилятора головного провітрювання при глибоких просадках напруги живлення високовольтної мережі;

3. Досліджено електромеханічні процеси і запропоновано метод роздільного регулювання величини і частоти вихідної напруги багаторівневого перетворювача частоти при квазічастотному пуску синхронного електропривода, що обмежує до допустимих значень пускові струми;

4. Доопрацьовано відомий метод формування оптимальної кривої напруги статора синхронного двигуна в новому форматі, що забезпечує підвищення електроенергетичних показників електропривода як електромеханічного комплексу в цілому.

Проведені дослідження дозволили встановити, що підвищення енергоефективності вентилятору головного провітрювання має значний потенціал у зниженні енерговитрат даних видів енергоємних споживачів електричної енергії залізрудних шахт. При цьому вектор вирішення проблеми лежить у системі пуску синхронного електродвигуна цих видів електромеханічних комплексів. Підтверджено, що основною версією забезпечення економікоенергетичного функціонування вентилятору головного провітрювання є використання в їх комплексах систем електропривода із плавним пуском, з необхідним діапазоном зміни частоти обертання синхронного електродвигуна при незначному зменшенні коефіцієнта корисної дії вентилятора.

Виходячи з цього, встановлені основні вимоги до системи електропривода вентилятора головного провітрювання:

- мінімальні зміни в режимах роботи вентилятора установки від номінального;
- мінімальне можливе споживання електричної енергії в заданому режимі;
- мінімальний час переходу з одного на інший режим роботи.

Визначено, що досягти потрібного рівня ефективності функціонування вентиляторів головного провітрювання можливо шляхом створення електроенергоефективного і надійного варіанта синхронного електропривода

вентилятора головного провітрювання з полегшеною системою пуску синхронного електродвигуна, у якій будуть використані напівпровідникові перетворювачі в статорному колі, котрі забезпечують плавний і квазічастотний спосіб регулювання.

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає у підвищенні енергоефективності електромеханічних комплексів вентиляторів головного провітрювання шахт. Розроблена енергоефективна система пуску синхронного двигуна з використанням принципу циклічного почергового управління блоками IGBT транзисторного перетворювача частоти, в комплексі синхронного електропривода, дозволяє комплексно формувати вхідні криві струму та напруги в максимальному наближенні до синусоїдальних видів, що дозволяє поліпшити енергетичні показники електромеханічного комплексу. Додатком до позитиву розробок є зменшення пускових струмів синхронного електричного двигуна і зменшення в цілому споживання електричної енергії в процесі пуску вентиляторів головного провітрювання залізрудних шахт.

В умовах тенденції зростання цін на електричну енергію і збільшення при цьому питомої ваги енергосегмента в комплексі собівартості видобутку корисних копалин, обгрунтовано і запропоновано варіативний підхід до зменшення цього негативного процесу шляхом зменшення енергоємності функціонування одного з найбільш вагомих споживачів електричної енергії шахт – головних вентиляторних установок, шляхом розробки і впровадження в структури електроприводів даних споживачів енергоефективних методів і засобів керування режимами пуску в межах енергоорієнтованих характеристик приводних синхронних двигунів.

В роботі обгрунтована і запропонована тактика підвищення енергоефективності функціонування електромеханічних систем, як і всього комплексу вентиляційних систем у цілому, шляхом формування енергоефективних пускових характеристик і відповідного режиму функціонування в їх межах приводних синхронних двигунів, дозволяє досягти поставлених енергоорієнтованих цілей.

Розроблена принципово нова математична модель для дослідження й оцінювання рівня енергоефективності функціонування високовольтного синхронного електропривода у варіативності структури та методів керування процесом пуску приводних двигунів, дозволяє як наочно, так і в цифровому виразі, вибрати оптимальний варіант.

Зформована математична модель синхронного двигуна в складі електромеханічного комплексу для систем оберткових і нерухомих координат, що орієнтуються по току і потокозчепленню статора, дозволяє комплексно виконувати розрахунки і проводити дослідження електропривода з урахуванням електричних, електромагнітних і механічних процесів за миттєвим і середнім значенням величин, а також з урахуванням насичення магнітної системи синхронного двигуна.

Методи і алгоритми керування пусковими режимами СД дозволяють запропонувати схемотехнічний варіант вихідного LC фільтра модулюючої частоти до виходу ШІМ-го блоку, що дозволяє мінімізувати масу і об'єм елементів фільтрокомпенсуючого пристрою з відповідною економічною ефективністю.

Метод регулювання величини і частоти вихідної напруги циклоконвертора, шляхом роздільного керування цими процесами, дозволяє зменшити перехідні значення струмів до рівнів допустимого при квазічастотному регулюванні.

В процесі досліджень доведена необхідність сталості опору зовнішнього пускового резистора в колі ротора при частотному пуску синхронної машини. Розроблені рекомендації щодо суміщення резисторів пускових і гасіння поля, дозволяють зменшити насичення сталі двигуна, що, в свою чергу, призводять до виникнення високочастотних коливань, модульованих низькочастотними коливаннями, при яких амплітуда піків моменту і струмів, без прийняття належних заходів, може сягати 40-90% номінальних значень.

Результати моделювання свідчать про наявність високочастотних складових у струмах синхронного двигуна при трапецеїдальній і ступінчастій формі формування фазної напруги, що створює додаткові складності при реалізації сигналів зворотних зв'язків, тому що при цьому потрібна наявність фільтрокомпенсуючих пристроїв, що підвищує порядок системи регулювання і знижує швидкодію замкнутої системи регулювання частотою обертів приводного двигуна. Використання запропонованих схемотехнічних рішень у сукупності з розробленим методом управління дозволяє реалізувати системи векторного керування для пуску потужних синхронних двигунів без додаткових матеріальних витрат.

Розрахункові співвідношення та характеристики для визначення меж ефективного управління процесом пуску синхронного двигуна за критеріями мінімуму енергоспоживання, котрі відрізняються від відомих можливістю ефективно використовувати весь діапазон регулювання без ускладнення самої системи і залучення для цього додаткових силових елементів, рекомендуються для використання у нових енергоефективних системах керування електроприводами шахтних вентиляторних установок. При використанні всіх запропонованих нововведень можемо отримати значний економічний ефект, та зменшити споживання електричної енергії вентиляторами головного провітрювання залізрудних шахт на 30 – 20 % від загального споживання.

*Ключові слова:* електромеханічні комплекси і системи, пускові характеристики, синхронний електричний двигун, вентилятор головного провітрювання, імпульсний перетворювач, плавний пуск, електрична енергія.

## ABSTRACT

*Peresunko I.* Formation of energy-oriented starting characteristics of synchronous electric drive of fans of the main ventilation of mines. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of a candidate of technical sciences in specialty "Electrotechnical complexes and systems". – Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, 2021. - Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2021.

The scientific novelty of the obtained results and the provisions submitted for protection is to increase the energy efficiency of electromechanical complexes of main ventilation fans of mines, by developing and implementing in their operation effective methods of smooth start-up of synchronous motors with the latter within energy-oriented limits.

The scientific results are obtained in the work:

1. For the first time, the components of the theory of synthesis of electromechanical systems are optimized and targeted formalized with substantiation and proposal for practical implementation of the approach to the choice of options for increasing energy efficiency of electric drives of main ventilation of mines;

2. A method has been developed for the use of a transistor multilevel frequency converter for energy-efficient frequency starting in the stator windings of the IGB synchronous motor with operation at intermediate starting positions, which allows minimizing the negative effects of transient starting currents in the motor stator windings the fan of the main ventilation at deep sags of supply voltage of a high-voltage network;

3. Electromechanical processes are investigated and the method of separate regulation of size and frequency of output voltage of the multilevel frequency converter at quasi-frequency start of the synchronous electric drive that limits to admissible values starting currents is offered;

4. The known method of forming the optimal voltage curve of the stator of a synchronous motor in a new format has been improved, which provides an increase in the electric power indicators of the electric drive as an electromechanical complex as a whole.

The conducted researches allowed to establish that the increase of energy efficiency of the fan of the main ventilation has considerable potential in reduction of energy consumption of these types of energy-intensive consumers of electric energy of iron ore mines. The vector for solving the problem lies in the starting system of the synchronous electric motor of these types of electromechanical complexes. It is confirmed that the main version of ensuring the economic operation of the main ventilation fan is the use in their complexes of electric drive systems with smooth start, with the required range of speed of the synchronous motor with a slight decrease in the efficiency of the fan.

Based on this, the basic requirements for the electric drive system of the main ventilation fan are set:

- minimal changes in the operating modes of the installation fan from the nominal;
- the minimum possible consumption of electricity in a given mode;
- the minimum time of transition from one to another mode of operation.

It is determined that to achieve the desired level of efficiency of main ventilation fans is possible by creating an energy-efficient and reliable version of synchronous electric drive of the main ventilation fan with a light starting system of synchronous motor, which will use semiconductor converters in the stator mode.

The practical significance of the obtained results of the work consists in increase of energy efficiency of electromechanical complexes of fans of the main ventilation of mines. The developed energy-efficient synchronous motor starting system using the principle of cyclic alternating control of IGB units of the transistor frequency converter, in the complex of synchronous electric drive, allows generating input current and voltage curves as close as possible to sinusoidal types, which will improve power. In addition to the positive



developments is the reduction of starting currents of the synchronous electric motor and the reduction of the overall consumption of electric energy in the process of starting the fans of the main ventilation of iron ore mines.

Given the growing trend of electricity prices and increasing the share of the energy segment in the complex cost of mining, substantiated and proposed a variable approach to reduce this negative process by reducing the energy consumption of one of the most important consumers of electricity mines - main fans. Development and implementation in the structure of electric drives of consumer data of energy-efficient methods and means of control of start-up modes within the energy-oriented characteristics of drive synchronous motors.

The paper substantiates and proposes tactics to increase the energy efficiency of electromechanical systems, as well as the whole complex of ventilation systems in general, by forming energy-efficient starting characteristics and the corresponding mode of operation within their drive synchronous motors, allowing achieving energy-oriented goals.

A fundamentally new mathematical model has been developed to study and evaluate the level of energy efficiency of high-voltage synchronous electric drive in the variability of structure and control methods of starting motors, allowing both visually and digitally to choose the best option.

The formed mathematical model of the synchronous motor as a part of an electromechanical complex for the systems of rotating and motionless coordinates oriented on current and flux coupling of a stator allows carrying out complex calculations and to carry out researches of the electric drive taking into account electric, electromagnetic and mechanical processes on instantaneous, and also average values. Taking into account the saturation of the magnetic system of the synchronous motor.

Methods and algorithms for controlling the starting modes of the SD allow it to offer a circuit version of the output LC filter of the modulating frequency to the output of the PWM unit, which minimizes the mass and volume of the elements of the filter-compensating device with appropriate economic efficiency.

The method of regulating the magnitude and frequency of the output voltage of the cycloconverter, by separately controlling these processes, allows to reduce the transient values of currents to the levels allowed for quasi-frequency control.

In the course of research, the necessity of constancy of resistance of the external starting resistor in a rotor circuit at frequency start of the synchronous car is proved. Developed recommendations for combining starting and quenching resistors, reduce the saturation of the motor steel, which, in turn, lead to high-frequency oscillations modulated by low-frequency oscillations, in which the amplitude of the torque and current peaks, without appropriate measures, can reach 40-90 % of nominal values.

The simulation results indicate the presence of high-frequency components in the currents of a synchronous motor in trapezoidal and stepped form of phase voltage formation, which creates additional difficulties in the implementation of feedback signals, because it requires filtering devices that increase the order of the control system and reduce closed drive motor speed control systems. The use of the proposed circuit solutions in conjunction with the developed control method allows implementing vector control systems for starting powerful synchronous motors without additional material costs.

The calculated ratios and characteristics for determining the limits of effective control of the synchronous motor start-up process according to the criteria of minimum power consumption, which differ from the known ability to effectively use the entire control range without complicating the system and involving additional power elements, are recommended for use in new energy-efficient control systems fan installations. Using all the proposed innovations, we can get a significant economic effect, and reduce electricity consumption by fans of the main ventilation of iron ore mines by 30 - 20% of total consumption.

*Keywords:* electromechanical complexes and systems, starting characteristics, synchronous electric motor, main ventilation fan, pulse converter, smooth start, electric energy.

**СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

- [1] І. Пересунько, та А. Антоненко, "Влияние отклонения напряжения питающей сети на работу асинхронного электропривода в горнорудных предприятиях", *Вісник Харківського політехнічного інституту*, № 12, с. 288-292, 2015.
- [2] І. Пересунько, О. Сінчук та Д. Михайличенко, "Використання безпосереднього перетворювача частоти для пуску потужних синхронних електродвигунів", *Мікросистеми, електроніка та акустика*, т. 23, № 3, с. 38-42, 2018.
- [3] І. Пересунько, Д. Кравченко, А. Браславський, та Ю Шерстньов, "Вплив змін напруги і частоти мережі живлення на роботу синхронних двигунів", *Гірничий вісник*, № 103, с. 178-182, 2018.
- [4] І. Пересунько, "Можливості застосування потужних симетричних багаторівневих каскадних інверторів в електроприводі вентилятора головного провітрювання", *Гірничий вісник*, № 104, с.153-157, 2018.
- [5] І. Пересунько, О. Сінчук, Д. Кальмус, В. Горшков, та Д. Михайличенко, "Вплив різних форм напруги силового перетворювача в комплексі вентиляторів головного провітрювання", *Мікросистеми, електроніка та акустика*, т. 24, № 3, с. 57-63, 2019, doi: 10.20535/2523-4455.2019.24.3.172680.
- [6] I. Sinchuk at al., *Brief commentaries on the problem of power consumption management at iron ore underground mines*. Warsaw, Poland, iScience, 2019.
- [7] І. Пересунько, І. Сінчук, І. Козакевич, М. Барановська, та Т. Берідзе, "Превентивна оцінка і основні напрями підвищення енергоефективності підземних залізородних підприємств", *Вісник Криворізького національного університету*, № 50, с.142-147, 2018.
- [8] I. Peresunko, O. Sinchuk, A. Kupin, I. Sinchuk, and I. Kozakevych, "Development of algorithms for fuzzy control of energy flows in the conditions of underground iron ore extraction", *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, № 56, с. 77-86, 2020.

- [9] І. Пересунько, І. Сінчук, та А. Сьомочкин, "Модельні дослідження з виявлення енергоефективних режимів функціонування головних вентиляційних установок шахт", *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. № 2 (54), с. 8-15, 2021.
- [10] I. Peresunko, O. Sinchuk, I. Sinchuk, and V. Stepanenko, "Formation of integrated energy efficiency indicator for mining industry companies", *Mining of Mineral Deposits*, vol. 11, no. 4, pp. 71-78, 2017.
- [11] И. Персунько, "Влияние несимметрии напряжения на промышленные потребители", на *XIII міжн. наук.-техн. конф. Молодих учених і спеціалістів Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації*, Кременчук, 2015, с. 176-177.
- [12] І. Пересунько, та І. Сінчук, "До проблем керування рівнем електроспоживання залізорудних підприємств", на *IV міжн. наук.-практ. конф. Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS 17*, м. Київ, 2017, с. 53-55.
- [13] І. Пересунько, "Аналіз систем пуску синхронного електропривода на залізорудних шахтах Криворізького залізорудного басейну", in *International research and practice conference. Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences*, Radom, Poland, 2017, pp. 65-69.
- [14] І. Пересунько, "Коментар щодо підвищення енергетичної ефективності головних вентиляційних установок залізорудних шахт", на *VI міжн. наук.-техн. конф. Сучасні технології розробки рудних родовищ. Еколого-економічні наслідки діяльності підприємств ГМК*, м. Кривий Ріг, 2019, с. 95-96.
- [15] І. Пересунько, І. Сінчук, І. Козакевич, М. Барановська, Т. Берідзе, та В. Барановський, "До проблеми пошуків напрямків підвищення енергоефективності підземних залізорудних підприємств", на *міжн. наук.-техн. конф. Розвиток промисловості та суспільства*, м. Кривий Ріг, 2020, - с. 219.

- [16] І. Пересунько, Ю. Осадчук, О. Учитель, та інші. "Спосіб підвищення енергоефективності технічних систем технологічних агрегатів з синхронними приводами шляхом регулювання їх реактивної потужності", МПК (2006.01) E21C41/16, №147076 UA, опубліковано Квіт.08, 2021.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	17
ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРІВ ГОЛОВНОГО ПРОВІТРЮВАННЯ НА ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ ІЗ ПІДЗЕМНИМ СПОСОБОМ ДОБУТКУ ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ.....	28
Загальні відомості про технологію вентиляції підземних гірничих виробок залізорудних шахт.....	28
Варіативність досліджень та розробок методів і засобів пуску синхронних електродвигунів в електромеханічних комплексах.....	31
Порівняння енергетичної ефективності способів регулювання продуктивності вентиляторів головного провітрювання шахт.....	33
Аналіз електроенергетичних режимів функціонування вентиляторів головного провітрювання шахт.....	39
Аналіз та оцінювання систем пуску синхронних двигунів для умов вентиляторів головного провітрювання залізорудних шахт.....	45
1 5.1 Основні обмеження та недоліки пуску синхронного електропривода	45
1.5.2 Порівняльний аналіз систем полегшеного пуску СД.....	46
Формування мети та задач і наукового пошуку.....	48
Висновки до розділу 1.....	49
РОЗДІЛ 2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З АНАЛІЗУ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА В УМОВАХ ВЕНТИЛЯТОРІВ ГОЛОВНОГО ПРОВІТРЮВАННЯ.....	50
Вибір математичного апарату для дослідження процесів в синхронному електроприводі.....	50
Вибір та обґрунтування математичного апарату для аналізу режимів роботи синхронного електропривода.....	57
Загальні положення.....	57
Аналіз процесів при пуску синхронних електродвигунів.....	59
Процес входження в синхронізм синхронних електродвигунів.....	62
Аналіз процесів при самозапуску синхронних електродвигунів.....	65
Процеси при короткому замиканні в живлячій мережі.....	67
Аналіз процесу гасіння поля в синхронному двигуні.....	69

	15
2.2.7 Вибір способу оптимального регулювання процесу пуску синхронного електродвигуна.....	71
2.3 Висновки до розділу 2.....	75
<b>РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ТА ВИБІР БАЗОУТВОРЮЮЧИХ СИСТЕМ ПУСКУ І ЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ВЕНТИЛЯТОРІВ ГОЛОВНОГО ПРОВІТРЮВАННЯ .....</b>	<b>77</b>
3.1. Обґрунтування вимог до систем пуску і збудження синхронних електродвигунів.....	77
3.2 Основні топології промислових перетворювачів середньої напруги .....	78
Аналіз систем синхронного електроприводу з IGB транзисторним перетворювачем частоти у ланці статора двигуна .....	80
Схема IGB транзисторного перетворювача частоти.....	80
Формування оптимальної кривої вихідної напруги перетворювача.....	82
Керування блоками перетворювача частоти.....	86
Спосіб почергового керування блоками перетворювача та схема підключення фільтра частоти модуляції.....	89
Аналіз системи синхронного електроприводу з циклоконвертером у ланці статора двигуна .....	93
Аналіз системи збудження синхронної машини з трансформатором та тиристорним керуванням випрямлячем.....	98
Аналіз системи збудження синхронних двигунів з діодним випрямлячем та IGB транзисторними чопперами .....	100
Синтез системи синхронного електроприводу .....	108
3.8 Висновки до розділу 3.....	110
<b>РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У СИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ ДВИГУНІ З РІЗНИМИ СИСТЕМАМИ ПУСКУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ВЕНТИЛЯТОРА ГОЛОВНОГО ПРОВІТРЮВАННЯ ШАХТ.....</b>	<b>112</b>
Моделювання перехідних процесів при прямому пуску синхронного електричного двигуна з вентиляторним навантаженням. ....	112
Моделювання перехідних процесів при покроковій зміні величини напруги та частоти при пуску синхронного електричного двигуна з вентиляторним навантаженням. ....	119
Оцінювання зміни енергетичних параметрів синхронного електродвигуна при різних варіантах пуску.....	124

4.4. Складання системи диференціальних рівнянь синхронного двигуна для задач моделювання.....	126
4.5 Математична модель явнополюсного синхронного двигуна для встановлення впливових факторів при формуванні енергоефективних режимів функціонування електроприводів вентиляторів головного провітрювання .....	126
Особливості моделювання перехідних процесів в синхронному двигуні з урахуванням насичення сталі .....	137
Моделювання пуску синхронного двигуна з широтно-імпульсним перетворювачем частоти.....	140
Способи модуляції при формуванні фазної напруги у синхронному двигуні із застосуванням ШІМ. ....	143
Моделювання пуску синхронного двигуна з широтно-імпульсним перетворювачем частоти.....	151
4.10 Висновки до розділу 4.....	160
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	162
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	165
ДОДАТКИ .....	178
Додаток А Експериментальні дані добового погодинного споживання активної енергії вентиляторів головного провітрювання залізрудних шахт Криворізького регіону .....	179
Додаток Б Порівняльний аналіз систем пуску синхронних електричних двигунів в складі електромеханічних комплексів .....	205
Додаток В Акти впровадження результатів досліджень.....	214
Додаток Г Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	218



## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

КК – корисні копалини;

ЗРС – залізорудна сировина;

ВГП – вентилятори головного провітрювання;

СЕП – синхронний електропривод;

СД – синхронний двигун;

АД – асинхронний двигун;

Д – двигун;

ДПС – двигун постійного струму;

ТПД – тиристорний перетворювач двигун;

РВУ – реакторний випрямний пристрій;

ОЗ – обмотка збудження;

ВД – вентиляльний двигун;

ЕЕ – електрична енергія;

ТРН – тиристорний регулятор напруги;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;

IGBT – біполярні транзистори з ізольованим затвором (Insulated Gate Bipolar Transistors).

## ВСТУП

В ході технологічних процесів при підземній розробці корисних копалин у шахтну атмосферу виділяються токсичні гази, пари, пил, а при роботі на глибоких горизонтах необхідна ще і нормалізація мікрокліматичних умов праці гірників [1].

У зв'язку з цим технологія ведення робіт у підземних умовах нероздільна з необхідністю вентиляції зазначених видів виробок. Цей процес в шахтах реалізується так званими вентиляторами головного провітрювання і частково вентиляторами місцевого дільничного функціонування [2]. Згідно розподілення функцій ВГП залізорудних шахт, забезпечують повітрям більше 90% підземних виробок.<sup>1</sup>

У вугільних, рудних й інших споріднених видах шахт ВГП встановлюються у спеціальній виробці нижче нульової відмітки шахтного ствола. Електромеханічні комплекси вентиляторів базуються, як правило, на 2-х агрегатах один робочий, а другий резервний з синхронними електродвигунами, в яких потужність сягає від 600 до 1600 кВт [3],[4].

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Аналізуючи історію розвитку електромеханічних систем і комплексів енергоємних (стаціонарних) споживачів ЕЕ підземних залізорудних підприємств, реальним, як факт, твердженням є те, що найменше уваги дослідників з цього спрямування приділялось вентиляторам головного провітрювання. Це спрямування в підвищенні електроенергоефективності підземних підприємств знаходилося в «сірій площині» даної проблеми. Така позиція декларувалась рядом скоріше необґрунтованих, ніж обґрунтованих причин. Більш того, з позицій електроенергетичного сьогодення гірничих підприємств, це в значному сенсі надумана ситуація потребує своєї найскорішої перереформатизації.

Тим паче, що, опосереднена частка витрат на провітрювання в

---

<sup>1</sup> Стосовно вугільних шахт, котрі за категорійністю безпеки відносяться до підприємств, шкідливих по газу, пилу, то ця пропорція там відрізняється.

собівартості видобутку залізорудної сировини (руди) у шахтах постійно зростає і на період 2020 року дорівнювала 25%.

Якщо станом на 1990 рік підземні залізорудні підприємства на вентиляцію витрачали до 15% від всього загального споживчого обсягу, в період 2015 – 2020 років ця цифра сягає 30%. ВГП залізорудних шахт – лідери серед всіх енергоємних споживачів в обсягах споживання електричної енергії. Більше того, цей показник буде зростати, оскільки глибини видобутку ЗРС збільшуються і потреби в обсягах повітря для провітрювання підземних виробок зростають. Уже на період 2015 року обсяги повітря в більшості залізорудних шахт України не відповідали нормам [7].

Залишаючи для науковців-гірників вирішення проблеми зменшення енерговитрат на видобуток ЗРС шляхом застосування новітніх технологій, зупинимось на електроенергетичному аспекті рішення.

Як встановлено [5], умови функціонування електромеханічних системи вентиляторів головного провітрювання залізорудних шахт характеризуються наявністю протяжних електричних мереж живлення і різноманітністю навантажувальних діаграм.

Важливо зазначити і те, що ВГП належать до споживачів 1-ї категорії і від безперебійності та якості їх функціонування залежить безпека роботи гірників у підземних виробках і життєдіяльність шахти в цілому. Все це доповнює проблему енергетики, проблемою забезпечення безперебійності функціонування ВГП в цілому і їх електромеханічного комплексу в тому числі.

Надійність електромеханічної системи ВГП в значній мірі залежить від надійності роботи СД, що, у свою чергу, визначається надійністю функціонування головного збудника СД [6]. Встановлено, що близько 70% від загальної кількості відмов СД є результатом руйнування саме їх пускових обмоток. Незважаючи на факт, що в загальній гамі кількості електричних двигунів, що ремонтуються, СД становлять близько 30%, але в матеріальних

витратах підприємств на їхній ремонт суми в десятки разів перевищують такі витрати на ремонт інших типів ЕД.

Таким чином, формування пускових характеристик є одним із важливих завдань у системі електропривода вентилятора головного провітрювання гірничорудних підприємств. Тим паче, що на дійсний період часу, в електромеханічних комплексах ВГП вітчизняних залізрудних шахт у більшості своїй встановлені та застосовується системи прямого пуску СД, що несе в собі системоутворюючі недоліки:

- 5-10-кратні кидки струмів статора і ротора, відповідно моменту двигуна;
- зatoryжна тривалість процесу пуску;
- ускладнення втягування в синхронізм.

Все це створює комплекс негативних проблем як в структурі самої електромеханічної частини СД, а саме перегрів обмоток, так і в роботі внутрішньої мережі живлення підприємства через “просідання” напруги в ній.

Крім того, можливості існуючих систем регулювання СЕП обмежені, оскільки здійснюються тільки за системою збудження двигуна, тобто тільки шляхом зміни величини напруги статора, не її частоти. Така система збудження СД енергетично малоефективна і громіздка.

Окрім цього, як додатковий негатив існуючих систем, відзначимо такий факт, як необхідність і недостатня ефективність компенсації реактивної потужності в шахтних електричних мережах, де саме високовольтні синхронні електричні двигуни в комплексі відповідних електромеханічних систем ВГП є основним засобом для її компенсації.

Тому створення СЕП, позбавленого зазначених недоліків шляхом удосконалення електромеханічних комплексів вентиляторів головного провітрювання для підприємств гірничої промисловості, є завданням актуальним.

Пріоритетним напрямком у вирішенні вищезазначеної проблеми є ставка на використання досягнень в області напівпровідникової перетворювальної техніки, а також на власні пропозиції дисертанта в частині розробки методів і способів пуску та керування синхронним електроприводом ВГП на проміжних позиціях.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Основний зміст роботи базується на результатах досліджень, що проводились на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем у промисловості та транспорті Криворізького національного університету у відповідності до наукового напрямку „Розроблення комплексу заходів по енергозбереженню на підприємствах залізорудної промисловості”. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до „Програми наукових досліджень і розробок Міністерства освіти і науки України за пріоритетними напрямками розвитку науки та техніки” у рамках науково-дослідних робіт № 30-114-21 „Інтеграція розумних технологій побудови електроенергетичних систем у контексті підприємств гірничо-металургійної галузі”. Результати дисертаційної роботи одержано під час виконання НДР „Розроблення комплексу заходів по енергозбереженню на підприємствах залізорудної промисловості” (№ НДР 0114U003457); НДР „Розроблення енергозберігаючих заходів на підприємствах гірничодобувної промисловості” (№ НДР 0115U003180); НДР „Спосіб зниження струмів витоку в електричних комбінованих мережах залізорудних шахт” (№ НДР 0116U1788); НДР „Аспекти теорії та практики оцінки електроенергетичної конкурентноспроможності залізорудних підприємств” (№ НДР 0118U006520).

**Мета і завдання дослідження.** *Метою* роботи є підвищення енергоефективності електромеханічних комплексів вентиляторів головного провітрювання шахт, шляхом розробки і запровадження в практику їх функціонування ефективних методів плавного пуску приводних синхронних

двигунів із роботою останніх в енергоорієнтованих межах пускових характеристик.

Для досягнення мети були поставлені та вирішені такі задачі:

- аналіз методів і засобів пуску синхронних двигунів з позицій функціональності їх у комплексі електроприводів вентиляторів головного провітрювання шахт за рівнем процесу енергоефективності;
- обґрунтування та розробка, для формату подальших досліджень, превентивних варіантів структур енергоефективних синхронних електроприводів і способів керування ними для умов вентиляторів головного провітрювання залізрудних шахт;
- модернізація методу циклічного почергового управління блоками багаторівневого IGBT транзисторного перетворювача електричної енергії для живлення синхронних двигунів електромеханічних комплексів вентиляторних установок шахт і порівняльна оцінка режимів їх роботи з урахуванням запропонованого принципу роздільної зміни величини й частоти вихідної напруги;
- розробка принципу та методу формування оптимальної кривої вихідної напруги перетворювача частоти та імплементація його в структури енергоефективних систем збудження синхронних двигунів електроприводів вентиляторів головного провітрювання шахт.

**Об'єкт дослідження** - дисертаційної роботи є електромагнітні та електроенергетичні процеси в синхронному електроприводі з напівпровідниковими перетворювачами в колах статора і ротора в електроприводів вентиляторів головного провітрювання залізрудних шахт.

**Предмет дослідження** - є енергоорієнтовані пускові характеристики синхронного електропривода вентиляторів головного провітрювання шахт.

**Методи дослідження.** Теоретичні положення дисертаційної роботи засновані на складових теорій електропривода та напівпровідникової

перетворювальної техніки. Для аналізу електромагнітних процесів синхронного електропривода використано елементи математичного аналізу. Аналіз електромагнітних процесів у колі синхронного електричного двигуна з вентиляторним навантаженням проведено із залученням методів математичного та фізичного моделювання.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у тому, що:

- вперше оптимізовано і адресно формалізовано складові теорії синтезу електромеханічних систем з обґрунтуванням і пропозицією для практичної реалізації підходу до вибору варіантів підвищення енергоефективності функціонування електроприводів вентиляторів головного провітрювання шахт;
- розроблено метод, що передбачає використання в обмотках кола статора синхронного двигуна IGB транзисторного багаторівневого перетворювача частоти для енергоефективного частотного пуску з функціонуванням на проміжних пускових позиціях, що дозволяє мінімізувати похідні негативні фактори впливу перехідних пускових струмів в обмотках статора двигуна, а також нормалізувати роботу електропривода вентилятора головного провітрювання при глибоких просадках напруги живлення високовольтної мережі;
- досліджено електромеханічні процеси і запропоновано метод роздільного регулювання величини і частоти вихідної напруги багаторівневого перетворювача частоти при квазі частотному пуску синхронного електропривода, що обмежує до допустимих значень пускові струми;
- доопрацьовано відомий метод формування оптимальної кривої напруги статора синхронного двигуна в новому форматі, що забезпечує підвищення електроенергетичних показників електропривода як електромеханічного комплексу в цілому.

**Практичне значення отриманих результатів.** Практична цінність роботи полягає у підвищенні енергоефективності електромеханічних комплексів вентиляторів головного провітрювання шахт. Розроблена енергоефективна система пуску синхронного двигуна з використанням принципу циклічного почергового управління блоками IGBT транзисторного перетворювача частоти, в комплексі синхронного електропривода, дозволяє комплексно формувати вхідні криві струму та напруги в максимальному наближенні до синусоїдальних видів, що дозволяє поліпшити енергетичні показники електромеханічного комплексу. Додатком до позитиву розробок є зменшення пускових струмів синхронного електричного двигуна і зменшення в цілому споживання електричної енергії в процесі пуску вентиляторів головного провітрювання залізородних шахт.

Одержані наукові результати, а саме: методологія підвищення енергоефективності гірничорудних підприємств шляхом застосування енергоефективних видів електроприводів для стаціонарних установок шахт, у т.ч. для головних вентиляційних установок, впроваджено в ТОВ «НВК Криворіжелектромонтаж», що підтверджено актом про впровадження від 07.03.2020 р. Результати роботи також використовуються у Криворізькому національному університеті на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем у промисловості та транспорті для підготовки фахівців за спеціальністю 141 – “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”, довідка про впровадження від 07.04.2020 р. (див. Додаток В).

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові положення та результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві, такий: [92] – показано вплив відхилень напруги в межах від -10% до +10% на роботу електропривода стаціонарних установок гірничорудних підприємств; [93] – запропоновано спосіб роздільного керування напругою і частотою при пуску потужного синхронного



електропривода за допомогою багаторівневого перетворювача частоти; [74] – дослідження впливу зміни напруги і частоти мережі живлення на роботу синхронних двигунів і виявлення аварійного режиму, щоб в подальшому модернізувати електромеханічну систему та забезпечити стійку роботу обладнання із СД; [82] – підвищення енергоефективності залізрудних шахт шляхом упровадження регульованого електроприводу вентилятора головного провітрювання, розглянуто можливість застосування багаторівневих каскадних схем інверторів; [8] – запропоновано підхід для підвищення енергоефективності комплексу вентиляторів головного провітрювання шахт за рахунок застосування багаторівневого силового перетворювача частоти. Проведено аналіз, яким чином будуть впливати прямокутна, трапецеїдальна та синусоїдальна форми напруги, які сформовані багаторівневим силовим перетворювачем частоти, на основні параметри синхронного двигуна; [9] – досліджено споживанням електроенергії стаціонарними установками на залізрудних шахтах; [81] – розглянуто комплекс напрямків підвищення енергоефективності в сучасних умовах при сталій технології видобутку залізрудної сировини: зниження втрат електричної енергії в комплексі енергопостачання-енергоспоживання, реструктуризація систем електропостачання, створення умов для максимально можливої продуктивності електромеханічних систем гірничих машин і механізмів, організаційні заходи; [101] – показано актуальність автоматизованого управління енергетичними потоками в умовах підземного видобутку залізної руди. Визначено вектор стану об'єкта, основні інформаційні параметри, керуючий вплив та обурення; [103] – при моделюванні проведено дослідження прямої системи пуску та пуску з покроковою зміною величини напруги і частоти й отримано експериментальні дані для оцінювання енергоефективності варіативних методів пуску електроприводів синхронного електропривода головних вентиляторних установок шахт; [5] – проведено моніторинг електропостачання гірничорудних підприємств із застосуванням економіко-математичних методів, що дозволило оцінити і спрогнозувати

зміни показників енерговитрат підприємства; [91] – проаналізовано рівні споживання електричної енергії стаціонарними установками залізорудних підприємств; [80] – розглянуто вимоги до систем пуску і збудження синхронного електропривода, проаналізовані відомі системи і способи управління ними, також описані переваги і недоліки цих систем; [90] – виконано аналіз енергетичної ефективності вентиляторів головного провітрювання залізорудних шахт і запропоновані нові методи підвищення ефективності їх використання. Результати теоретичних досліджень були отримані у Криворізькому національному університеті (КНУ).

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні положення роботи та її результати доповідались, обговорювались та були схвалені на таких науково-технічних конференціях та семінарах:

- на XIII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених і спеціалістів “Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації”, (КрНУ, Кременчук, 2015);

- на IV Міжнародній науково-практичній і навчально-методичній конференції “Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS’17”, (КПІ, м. Київ, 2017);

- International research and practice conference “Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences”, (Radom, Poland, 2017);

- на VI Міжнародній науково-технічній конференції “Сучасні технології розробки рудних родовищ. Еколого-економічні наслідки діяльності підприємств ГМК”, (м. Кривий Ріг, 2019);

- на Міжнародній науково-технічній конференції “Розвиток промисловості та суспільства”, (КНУ, м. Кривий Ріг, 2018, 2019, 2020).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 16 робіт, з яких 1 монографія, 4 статей у наукових фахових виданнях, 1 статті у міжнародних періодичних виданнях, які внесені до міжнародної науково-метричної бази даних Scopus, 4 статті у наукових журналах і збірниках

наукових праць, 5 – у матеріалах конференцій, за результатами дисертаційної роботи отримано 1 патент України на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 221 сторінок, з яких основний зміст викладений на 182 сторінках друкованого тексту, містить 96 рисунки, 8 таблиць. Список використаних джерел складається з 125 найменування. Додатки містять графіки електричних навантажень енергоємних споживачів електричної енергії залізрудних шахт України, акти впровадження результатів роботи, список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Правил безпеки під час розробки родовищ рудних та нерудних корисних копалин підземним способом. (2016, груд. 23) [Електронний ресурс]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0129-17#Text>.
- [2] А. Гришко. *Стационарные машины. Т. 2. Рудничные водоотливные, вентиляторные и пневматические установки: учеб. для вузов.* М.: Горная книга, 2007.
- [3] Г. Бабак, К. Бочаров, А. Волохев и др. *Шахтные вентиляторные установки главного проветривания: справочник.* М.: Недра, 1982.
- [4] И. Ивановский. *Шахтные вентиляторы: Учеб. пособие.* Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2003.
- [5] O. Sinchuk, I. Sinchuk, I. Peresunko, V. Stepanenko. “Formation of integrated energy efficiency indicator for mining industry companies”, *Mining of Mineral Deposits*, vol. 11 no 4, pp. 71-78, 2017.
- [6] А. Чёрный “Теория и практика анализа состояния параметров электрических машин электротехнических комплексов”, дис. на здоб. ступ. докт. техн. наук, м. Кременчуг, 2004.
- [7] І. Ошмянський, Л. Євстратенко. “Стан і проблеми підвищення ефективності функціонування вентиляційних систем глибоких рудних шахт”, *Гірничий вісник*, № 96, с. 219-222, 2013 .
- [8] І. Пересунько, О. Сінчук, Д. Кальмус, В. Горшков, Д. Михайличенко, “Вплив різних форм напруги силового перетворювача в комплексі вентиляторів головного провітрювання”, *Мікросистеми, електроніка та акустика*, т. 24, №3, с. 57-63, 2019.
- [9] I. Sinchuk, S. Voiko, M. Baranovska, I. Kozakevych, A. Somochkyn, D. Kalmus, I. Peresunko, M. Vinnik, N. Lokhman, V. Chorna. *Brief commentaries on the problem of power consumption management at iron ore underground mines.* iScience, Warsaw, Poland, 2019.
- [10] О. Брагстад *Теория машин переменного тока.* Ленинград, 1933.

- [11] А. Вольдек *Электрические машины*. Л.: Энергия, 1978.
- [12] И. А. Глебов *Научные основы проектирования систем возбуждения мощных синхронных машин*. Л.: Наука, 1988.
- [13] А. А. Горев *Переходные процессы синхронной машины*. М.: Госэнергоиздат, 1950.
- [14] Е. Я. Казовский *Переходные процессы в электрических машинах переменного тока*. М.-Л.: изд. АМ СССР, Ленинградское отд., 1962.
- [15] Е. Я. Казовский *Аномальные режимы работы крупных синхронных машин*. Л.: Наука, 1969.
- [16] М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. *Электрические машины. Ч.2. Машины переменного тока: издание 3-е*. Л.: Энергия, 1973.
- [17] *Электрические машины с полупроводниковыми устройствами в их цепях*. Сб. науч. тр. ВНИИ Электромаш, 1989.
- [18] И. А. Сыромятников. *Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей*. М.: ГЭИ, 1984.
- [19] Б. Адкинс. *Общая теория электрических машин*. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960.
- [20] Т. Лайбл. *Теория синхронной машины при переходных процессах*. М.-Л.: ГЭИ, 1957.
- [21] И. П. Копылов, Ф. А. Мамедов, Л. Н. Васильева “Электромеханические переходные процессы при асинхронном пуске синхронного двигателя”, *Электротехника*, №1, с. 6-8, 1977.
- [22] К. Павлюк, С. Беднарек. *Пуск и асинхронные режимы синхронных двигателей*. М.: Энергия, 1971.
- [23] В. Лайон. *Анализ переходных процессов в электрических машинах переменного тока метод симметричных составляющих*. М.-Л.: ГЭИ, 1958.
- [24] А. И. Важнов. *Переходные процессы в машинах переменного тока*. Л.: Энергия, 1980.
- [25] И. И. Трещев. *Электромеханические процессы в машинах переменного тока*. Л.: Энергия, 1980.

[26] Ю. Г. Шакарян. *Асинхронизированные синхронные машины*. М.: Энергоатомиздат, 1984.

[27] *Техническое описание и инструкция по эксплуатации тиристорных возбуждателей синхронных двигателей типа ВТ*. Березовский опытный з-д. Энергоцветмет, 1998.

[28] К. Б. Носов, Н. М. Дворак. *Способы и средства самозапуска электродвигателей*. М.: Энергоатомиздат, 1992.

[29] Б. Н. Абрамович, А. А. Круглый. *Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей*. Л.: Энергоатомиздат, 1983.

[30] *Проектирование и исследование систем возбуждения мощных синхронных машин*. Сб. научн. тр. ВНИИ Электромашиностроение. Л.: ВНИИ Электромаш, 1989.

[31] Н. В. Букович. *Авторизація процесу пуску та увімкнення на паралельну роботу синхронних машин*. Навч. посібник. Львівськ. Політехн. Ін-т. К.: НМК ВО, 1992.

[32] Ю. М. Голоднов. *Самозапуск электродвигателей*. М.: Энергоатомиздат, 1985.

[33] Ж. Д. Давидян, Л. Н. Поляга. “Управляемый импульсный пуск синхронных машин”, *Электротехника*, №10, с. 5-8, 1992.

[34] Н. Р. Ипатенко. *Автоматическое регулирование возбуждения синхронных двигателей средней мощности на постоянство  $\cos \varphi = 1$* . Брянск: Брянский ин-т транспортн. Машиностр., 1974.

[35] Ф. Н. Сарапулов, Н. С. Спунув. “Получение частотных характеристик синхронных машин с помощью физической модели”, *Сборник статей «Исследование параметров и цепей возбуждения машин переменного тока»*, труды Уральского политехнического института имени С.М. Кирова. Свердловск: изд. УПИ, с. 5, 1967.

[36] Д. М. Карышев. “К методике физического моделирования синхронных машин”, *Сборник статей «Исследование параметров и цепей возбуждения машин переменного тока»*, труды Уральского

*политехнического института имени С.М. Кирова*. Свердловск: изд. УПИ, с. 3, 1967.

[37] Р. В. Фильц, Н. Н. Лябук. *Математическое моделирование явнополюсных синхронных машин*. Львов: Свит, 1991.

[38] Дж. Мэрдон. *Тиристорное управление двигателями переменного тока*. М.: Энергия, 1979.

[39] Э. Н. Гречко, Д. И. Родькин, А. П. Черный, В. К. Тытюк, В. Е. Павленко. *Исследование и пути повышения эффективности пусковых систем синхронных двигателей в электровозах промышленных механизмов*. Препр. АН Украины. Институт проблем энергосбережения. К.: 1993.

[40] С. И. Малафеев, А. Г. Павлович, Н. А. Серебренников. “Тиристорные преобразователи для возбуждения синхронных двигателей и электропитания аппаратуры управления одноковшовых экскаваторов”, *Промышленная энергетика*, №2, с. 26-29, 1993.

[41] И. О. Синчук, А. А. Чернышев и др. *Полупроводниковые преобразователи электрической энергии в структурах электроприводов*. Схемотехника и принципы управления. Кременчуг: 2008.

[42] Г. П. Корнилов, Г. В. Шурыгина, Ю. А. Самохин. “Управление возбуждением синхронного двигателя преобразовательного агрегата с резкопеременной нагрузкой”, *Промышленная энергетика*, №3, с. 24-26, 1990.

[43] Л.Х. Дацковский, В.И. Роговой. “Электропривод шахтных стационарных установок. Современное состояние и перспективы”, *Электромашинобудування та електрообладнання*, №66, К.: Техника, с. 94 – 102, 2006.

[44] И. А. Сыромятников. *Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей*. - М.: Энергоатомиздат, 1984.

[45] Ю. М. Голоднов. *Самозапуск электродвигателей*. М.: Энергоатомиздат, 1985.

[46] Б. Г. Меньшов, Н. Н. Хайлов. “Работа синхронного электропривода при кратковременном глубоком снижении напряжения”, *Электричество*, №11, с. 19-20, 1984.

[47] D. Rodkin, T. Kurowski. “Elementy teorii ukladow dynamicznego obciazenia w stanowiskach diagnostycznych maszyn elektrycznych”. *Zeszyty Naukowe Nr 112, Elektryka 16, Zielona Gora*, 1997.

[48] В. Ф. Сивокобыленко, В. И. Костенко. “Определение параметров и характеристик машин переменного тока из опытов пуска и выбега”. *Изв. ВУЗов., Энергетика*, № 5, 1978.

[49] A. Nabae, T. Tanake. “A new definition of instantaneous active-reactive current and power based on instantaneous space vectors on polar coordinates in three-phase circuits”, *IEEE/PES Winter Meeting*, pp. 96, 1996.

[50] V. Soares, P. Verdelho, G. D. Marques. “An instantaneous active and reactive current component method for active filters”, *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 15, pp. 660-669, July, 2000.

[51] А. М. Съянов, Р. В. Низимов. “Система облегченного пуска синхронного двигателя накопителем энергии в обмотке возбуждения”, *Проблемы создания новых машин и технологий: Научные труды КГПУ*, Вып.1, Кременчуг: КГПУ, с. 30-34, 2001.

[52] В. Б. Низимов, Р. В. Низимов. “Пусковые характеристики синхронного двигателя при дискретном управлении контуром возбуждения”, *Проблемы создания новых машин и технологий: Научные труды КГПУ*, №1, Кременчуг: КГПУ, с. 34-39, 2001.

[53] И. Е. Овчинников, Г. Н. Тергазарян, Ж. Д. Давидян, В. Н. Рябов. “Способы импульсного пуска синхронных машин”, *Электротехника*, №3, с. 33-36, 1987.

[54] Ж. Д. Давидян, Л. Н. Полюга. “Управляемый импульсный пуск синхронных машин”, *Электротехника*, №10, с. 5-8, 1992.

[55] В. С. Костянец, Режимы и надежность работы тиристорного возбуждения синхронной машины. Л.: Энергоатомиздат, 1990, с.125.



[56] И. П. Копылов, Ф. А. Мамедов, Л. Н. Васильева. “Электромеханические переходные процессы при асинхронном пуске синхронного двигателя”, *Электротехника*, №1, с. 6-8, 1977.

[57] А. П. Чёрный. “Особенности пуска синхронных двигателей агрегатов Г-д от импульсных пусковых систем”, *Известия вузов, Горный журнал*, №4, с. 10-16, 1992.

[58] И. А. Глебов, Н. В. Шулаков, Е. А. Крутяков. *Проблемы пуска сверхмощных синхронных машин*. Л.: Наука, 1988.

[59] В. И. Кириченко, В. С. Гомилко, В. А. Бородай. “Островский. Определение индуктивных сопротивлений и реактивностей взаимоиндукции специальной системы возбуждения синхронных двигателей”, *Тез. Докл. междунар. научн.-техн. конф. «Современные технологии экономичного и безопасного использования электроэнергии»*, г. Днепрпетровск, 28-30 октября, с. 110-119, 1997.

[60] В. И. Кириченко, В. С. Гомилко, В. А. Бородай. “О новом способе улучшения пусковых свойств синхронных двигателей мельниц”, *Тез. Докл. междунар. научн.-техн. конф. «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика»*, г. Алушта, с. 228-290, 1997.

[61] Г. Г. Пивняк, В. И. Кириченко, В. А. Бородай, В. В. Кириченко. “Про формирование эффективных режимов запуска синхронных приводов низкочастотных барабанных мельниц принудительного измельчения”, *Вестник ХГПУ*, №61, с. 155-156, 1999.

[62] А. В. Луговой, М. Н., Максимов, Д. И. Родькин, А. П. Черный, Г. Ю. Сисюк. “Эксплуатационная надежность электрических двигателей переменного тока и пути ее повышения”, *труды КГПИ «Проблемы создания новых машин и технологии»*, выпуск 1, 2000.

[63] Э. Н. Гречко, Д. И. Родькин, А. П. Черный, В. К. Тытюк, В. Е. Павленко. *Исследование и пути повышения эффективности пусковых систем синхронных двигателей в электроприводах промышленных*

*механизмов*. Препр. АН Украины. Институт проблем энергосбережения, К.: с. 48, 1993.

[64] Д. Й. Родькін, А. П. Калінов, О. П. Черний, В. Ф. Живора, А. М. Аміров. “Спосіб діагностики параметрів синхронного двигуна та пристрій для його здійснення”, *Деклараційний патент №50115 А, №2003042860; опубл. Бюл. №4, 15.04.2004*

[65] А. Б. Сьомочкин “Режими и системы облегченного запуска синхронных двигателей преобразовательных агрегатов карьерных экскаваторов в условиях сетей с отдаленным источником напряжения”, дис. на здоб. ступ. канд. техн. наук, Кривой Рог, 2004.

[66] E. Davison, R. Narayan. “The Optimal Output Feedback Control of a Synchronous Machine”, *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on. PAS-90. 2123 - 2134. 10.1109/TPAS.1971.293030, 1971.*

[67] N. C. Kar, A. M. El-Serafi. “A new model for the saturated synchronous machines using the intermediate-axis saturation characteristics”, *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. vol.1, pp. 172 – 177, 10.1109/CCECE.2002.1015194, 2002.*

[68] N. Banshchikov, D. Toporkov, R. Bakiev. “Investigation of transients during start-up of hybrid synchronous electric motor of submersible oil pump with permanent magnets”, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 194. 052003. 10.1088/1755-1315/194/5/052003, (2018).*

[69] M. Šundrica, M. Petrinić. “Observer-based Linear Control of Synchronous Machine with Damper and Excitation Winding”, *Acta Polytechnica Hungarica Vol. 17, No. 6, pp. 95 –114, 2020.*

[70] C. Szabo, M. Imecs, I. Incze. “Synchronous Motor Drive with Controlled Stator-Field-Oriented Longitudinal Armature Reaction”, *Computer Science IECON - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2007.*

[71] J. Kaukonen: "Salient pole synchronous machine modelling in a industrial direct torque controlled drive application", PhD Thesis, Lappeenranta University of Technology, Finland, 1999

[72] R. Marino, P. Tomei, C. M. Verrelli: "Adaptive Field-oriented Control of Synchronous Motors with Damping Windings", *European Journal of Control*, №3, pp. 177-195, 2008.

[73] M. Šundrica, "Synchronous Machine Nonlinear Control System Based on Feedback Linearization and Deterministic Observers", *In Control Theory in Engineering*, p. 145, <https://dx.doi.org/10.5772/intechopen.89420>, 2019.

[74] І. Пересунько, Д. Кравченко, А. Браславський, та Ю. Шерстньов, "Вплив змін напруги і частоти мережі живлення на роботу синхронних двигунів", *Гірничий вісник*, № 103, с. 178-182, 2018.

[80] І.І. Пересунько "Аналіз систем пуску синхронного електроприводу на залізорудних шахтах Криворізького залізорудного басейну", *Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences, Conference proceedings*, Radom, Poland, с. 65-69, 2017.

[81] І. Пересунько, І. Сінчук, І. Козакевич, М. Барановська, та Т. Берідзе, "Превентивна оцінка і основні напрями підвищення енергоефективності підземних залізорудних підприємств", *Вісник Криворізького національного університету*, № 50, с.142-147, 2018.

[82] І. Пересунько, "Можливості застосування потужних симетричних багаторівневих каскадних інверторів в електроприводі вентилятора головного провітрювання", *Гірничий вісник*, № 104, с.153-157, 2018.

[83] М. Макаренко, В. Сенько, М. Юрченко, *Системний аналіз електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах електроенергії модульного типу*. Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ, 2006, с.241.

[84] О. Сінчук "Розроблення комплексу заходів по енергозбереженню на підприємствах залізорудної промисловості", КНУ, м. Кривий Ріг, № НДР 0114U003457, 2014.

[85] О. Сінчук "Розроблення енергозберігаючих заходів на підприємствах гірничодобувної промисловості", КНУ, м. Кривий Ріг, № НДР 0115U003180, 2015.

[86] О. Сінчук "Спосіб зниження струмів витоку в електричних комбінованих мережах залізородних шахт", КНУ, м. Кривий Ріг, № НДР 0116U1788, 2016.

[87] І. Сінчук "Аспекти теорії та практики оцінки електроенергетичної конкурентноспроможності залізородних підприємств", КНУ, м. Кривий Ріг, № НДР 0118U006520, 2016.

[88] М. Пронин, А. Воронцов, "Качество напряжения электросетей при работе вентиляторов главного проветривания рудника «Северный Глубокий»", *Горное дело*, № 2, с. 42-45, 2006.

[89] В.С. Пронько, "Минимизация потерь в электроприводе вентиляторов главного проветривания шахт", *Труды международной конференции «Проблемы недропользования»*, Горный университет, с. 242. 2014.

[90] І.І. Пересунько "Коментар щодо підвищення енергетичної ефективності головних вентиляційних установок залізородних шахт", *Збірник наукових праць Сучасні технології розробки рудних родовищ. Еколого-економічні наслідки діяльності підприємств ГМК*, Кривий Ріг: Вид. Р.А. Козлов, с. 95-96, 2019.

[91] І.І. Пересунько, І.О. Сінчук "До проблем керування рівнем електроспоживання залізородних підприємств", *Збірник наукових праць «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'17»*, м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, с. 53-55. 2017.

[92] І.І. Пересунько, А.О. Антоненко, "Влияние отклонения напряжения питающей сети на работу асинхронного электропривода в горнорудных предприятиях", *Вісник НТУ «ХП»*, с. 288 – 292, 2015.

[93] О.М. Сінчук, І.І. Пересунько, Д.А. Михайличенко, "Використання безпосереднього перетворювача частоти для пуску потужних синхронних

електродвигунів", *Науково технічний журнал «Мікросистеми, електроніка та акустика»* Том 23, №3(104), с. 38 – 42, 2018.

[94] О. Синчук, Д. Михайличенко, "Исследование пуска синхронного двигателя с широтно-импульсным преобразователем частоты", *Технічна електродинаміка*, № 4, с. 108-110, 2014.

[95] О. Сінчук, В. Захаров, Д. Михайличенко, "Модельовання пуску неявнополюсного синхронного електричного двигуна", *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, № 8, с. 24-30, 2012.

[96] О. Синчук, О. Юрченко, Д. Михайличенко, В. Дяченко, "О формировании способами широтно-импульсной модуляции выходных форм кривых тока и напряжения для питания электродвигателей переменного тока", *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*, №9, с. 107-113, 2014.

[97] L. Tihanyi, *EMC in Power Electronics*. N.Y.: IEEE Press, 1995. 402 p.

[98] Б. Лезнов, *Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках*. М.: Энергоатомиздат, 2006.

[99] Н.Н. Петров, Д.В. Зедгенизов, "Управление вентиляцией шахт и рудников", *Горный информационно-аналитический бюллетень*, №7, с. 53-57, 2000.

[100] В. Пронько, "Структура и энергосберегающие алгоритмы управления частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов главного проветривания шахт", дис. канд. техн. наук., Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, 2016

[101] I. Peresunko, O. Sinchuk, A. Kupin, I. Sinchuk, and I. Kozakevych, "Development of algorithms for fuzzy control of energy flows in the conditions of underground iron ore extraction", *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, № 56, с. 77-86, 2020.

[103] І.О. Сінчук, І.І. Пересунько, А.Б. Сьомочкин, "Модельні дослідження з виявлення енергоефективних режимів функціонування головних вентиляційних установок шахт", *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, № 2 (54), с. 8-15, 2021.

[104] В. Соболев, "Энергосбережение электроприводов главного проветривания горнодобывающих предприятий", *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 7, с. 391-395, 2007.

[105] O. Sinchuk et al., "Development of the functional model to control the levels of electricity consumption by underground iron-ore enterprises", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, №6(3), с. 20-27, 2018.

[106] I. Sinchuk, "Harmonization of modeling systems for assessing the electric-power consumption levels at mining enterprises", *Mining of Mineral Deposits*, №12(4), pp. 100-107, 2018.

[107] O. Sinchuk, A. Kupin, I. Sinchuk, M. Rohoza, and P. Plieshkov, "Certain aspects concerning the development of a functioning scheme of the automated system to control energy flows of underground iron-ore enterprises", *Mining of Mineral Deposits*, №14(3), pp. 101-111, 2020.

[108] Ю. Вілкул, А. Азарян, В. Колосов, Ф. Караманиць, та А. Батареев, "Сучасний стан залізорудної галузі, прогноз розвитку та пропозиції", *Качество минерального сырья. Сб. науч. тр., т. 1*, с. 9-24, 2017.

[109] Ю. Капленко та Е. Янов, "Влияние глубины горных работ на технико-экономические показатели подземной добычи руды", *Вісник Криворізького національного університета*, №5(15), с. 25-28, 2006.

[110] А. Ковшуля, "Рациональная глубина разработки криворожских месторождений богатых железных руд", *Металлургическая и горнорудная промышленность Украины*, №4, с. 34-37, 1963.

[111] К. Ушаков, А. Бурчаков, Л. Пучков, И. Медведев, *Аэрология горных предприятий: Учебник для вузов, 3-е изд.* М.: Недра, 1987, с. 421.

[112] E. Witrant, A. D’Innocenzo, A. Isaksson, M. Di Benedetto, K. Johansson, F. Santucci, and M. Strand, "Mining ventilation control: a new industrial case for wireless automation", *Deliverable of the European Commission FP6 Network of Excellence HYCON*, pp. 1 – 6. 2008.

[113] L. Zhang, and S. J. Watkins, "Capacitor voltage balancing in multilevel flying capacitor inverters by rule-based switching pattern selection", *IET Electric Power Applications*, vol. 1, № 3, pp. 339-347, 2007.

[114] D. Soto, and T. Green, "A comparison of high-power converter topologies for the implementation of FACTS controllers", *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 49, № 5, pp. 1072-1080, 2002.

[115] D. Veas, and J. Dixon "A novel load current control method for a leading power factor voltage source PWM rectifier", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 9, №2, pp. 153-159, 2002.

[116] S. An, J. Wang, X. Sun, and Y. Zhong, "A new optimal space-vector modulation technique for three-phase voltage source inverters", *Proceeding of the Power and Energy Engineering Conference*, pp. 1-5, 2012.

[117] D. Dorrell, "A Review of the Methods for Improving the Efficiency of Drive Motors to Meet IE4 Efficiency Standards", *Journal of Power Electronics*, vol. 14, № 5, pp. 842-851, 2014.

[118] A.G. Gupta, and A.M. Khambadkone, "Simple space vector PWM scheme for 3-level NPC inverters including the overmodulation region", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, № 3, pp. 751-760. 2014.

[119] F. Herrera, M. Lozano, and A. Sanchez, "Hybrid Crossover Operators for Real-Coded Genetic Algorithms: An Experimental Study", *Soft Computing*, №9(4), pp. 280-298, 2005.

[120] M. Konghirun, "A three-phase space-vector based PWM rectifier with power factor control", *Proceeding of the Power Conversion Conference, Nagoya*, pp. 57 – 61, 2007.

[121] R. Krishnan, *Electric motor drives modelling, analysis and control*. NJ: Prentice-Hall, 2001, pp. 626.

[122] G. Lyle, K. Bullock, A. Dasys, and S. Hardcastle, "Evaluation of ventilation on demand (VOD) in Sudbury mines", *Proceedings of the MEMO Conference – Ontario*, pp. 1-9, 2010.

[123] Bin Wu. *High-power Converters and AC Drives*. John Willey & Sons, New Jersey, 2006. p. 112.

[124] J. Sen and N. Butterworth, "Analysis and Desing of a Three-Phase PWM Converter System for Railway Traction Applications", *IEEE Proceedings on Electric Power Applications*, vol. 144, no. 5, pp. 357–371, 1997.

[125] B. Branko, "New Trends in Efficiency Optimization of Induction Motor Drives", *New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems*, pp. 341-358, 2010.



