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.

\_\_\_\_\_ I. I. 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 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.

В роботі отримано наукові результати:

1. Вперше оптимізовано й адресно формалізовано складові теорії синтезу електромеханічних систем з обгрунтуванням 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 двигуна IGB транзисторного багаторівневого статора синхронного енергоефективного частотного перетворювача частоти для пуску 3 функціонуванням проміжних пускових позиціях, на 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 i вихілної роздільного регулювання величини частоти 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 залізорудних 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 ïx комплексах систем електропривода із плавним пуском, з необхідним діапазоном зміни частоти обертання снхронного 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 y підвищенні енергоефективності електромеханічних комплексів вентиляторів головного провітрювання шахт. Розроблена енергоефективна система пуску синхронного двигуна з використанням принципу циклічного почергового управління блоками IGB 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 залізорудних 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.

i В роботі обгрунтована запропонована тактика підвищення енергоефективності функціонування електромеханічних систем, як і всього комплексу вентиляційних цілому, формування систем V шляхом енергоефективних пускових характеристик i 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, вибирати оптимальний варіант.

Зформована математична модель синхронного двигуна в складі електромеханічного комплексу для систем обертових 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 використані всіх запропонованих нововендень можемо отримати значний економичний ефект, та зменьшети споживання електричної енергії вентиляторами головного провітрювання залізорудних 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 05.09.03 "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 залізорудних 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 – *PEMS 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) Е21С41/16, №147076 UA, опубліковано Квіт.08, 2021.

#### **3MICT**

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

2.2.7 Вибір способу оптимального регулювання процесу пуску синхронного електродвигуна
2.3 Висновки до розділу 275
РОЗДІЛ З АНАЛІЗ ТА ВИБІР БАЗОУТВОРЮЮЧИХ СИСТЕМ ПУСКУ І ЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ВЕНТИЛЯТОРІВ ГОЛОВНОГО ПРОВІТРЮВАННЯ
3.1. Обґрунтування вимог до систем пуску і збудження синхронних електродвигунів
3.2 Основні топології промислових перетворювачів середньої напруги 78
3.3. Аналіз систем синхронного електроприводу з IGB транзисторним перетворювачем частоти у ланці статора двигуна
3.3.1. Схема IGB транзисторного перетворювача частоти
3.3.2. Формування оптимальної кривої вихідної напруги перетворювача 82
3.3.3. Керування блоками перетворювача частоти
3.3.4. Спосіб почергового керування блоками перетворювача та схема підключення фільтра частоти модуляції
3.4. Аналіз системи синхронного електропривода з циклоконвертером у ланці статора двигуна
3.5. Аналіз системи збудження синхронної машини з трансформатором та тиристорним керуванням випрямлячем
3.6. Аналіз системи збудження синхронних двигунів з діодним випрямлячем та IGB транзисторними чопперами
3.7. Синтез системи синхронного електропривода 108
3.8 Висновки до розділу 3 110
РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У СИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ ДВИГУНІ З РІЗНИМИ СИСТЕМАМИ ПУСКУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ВЕНТИЛЯТОРА ГОЛОВНОГО ПРОВІТРЮВАННЯ ШАХТ
<ul> <li>4.1 Моделювання перехідних процесів при прямому пуску синхронного електричного двигуна з вентиляторним навантаженням</li></ul>
4.3 Оцінювання зміни енергетичних параметрів синхронного електродвигуна при різних варіантах пуску

4.4. Складання системи диференціальних рівнянь синхронного двигуна для задач моделювання
4.5 Математична модель явнополюсного синхронного двигуна для встановлення впливових факторів при формуванні енергоефективних режимів функціонування електроприводів вентиляторів головного провітрювання
4.6. Особливості моделювання перехідних процесів в синхронному двигуні з урахуванням насичення сталі137
4.7. Моделювання пуску синхронного двигуна з широтно-імпульсним перетворювачем частоти
4.8. Способи модуляції при формуванні фазної напруги у синхронному двигуні із застосуванням ШІМ 143
4.9. Моделювання пуску синхронного двигуна з широтно-імпульсним перетворювачем частоти
4.10 Висновки до розділу 4160
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ165
ДОДАТКИ
Додаток А Експерементальні дані добового погодинного споживання активної енергії вентиляторами головного провітрювання залізорудних шахт Криворізького регіону179
Додаток Б Порівняльний аналіз систем пуску синхронних електричних двигунів в складі електромеханічних комплексів
Додаток В Акти впровадження результатів досліджень
Додаток Г Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

16

#### 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 вентильний 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].

Обгрунтування 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 знаходилось 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 переформатизації.

Тим паче, що, опосереднена частка витрат на провітрювання в

<sup>&</sup>lt;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 залізорудних шахт у більшості своїй встановлені та застосовується системи прямого пуска СД, що несе в собі системоутворюючі недоліки:

- 5-10-кратні кидки струмів статора і ротора, відповідно моменту двигуна;

- затяжна 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 області використання лосягнень напівпровідникової ставка на В перетворювальної техніки, а також на власні пропозиції дисертанта в частині способів розробки методів i 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 підприємствах залізорудної промисловості". на 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 (Nº промисловості" НДР 0114U003457); НДР "Розроблення енергозберігаючих захолів підприємствах гірничодобувної на промисловості" (№ НДР 0115U003180); НДР "Спосіб зниження струмів витоку в електричних комбінованих мережах залізорудних шахт" (№ НДР 0116U1788); НДР "Аспекти теорії та практики оцінки електроенергетичної залізорудних підприємств" НДР конкурентноспроможності (<u>N</u>⁰ 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 залізорудних 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 залізорудних 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

Для аналізу перетворювальної техніки. електромагнітних процесів синхронного електропривода використано елементи математичного аналізу. Аналіз електромагнітних процесів у колі синхронного електричного двигуна вентиляторним навантаженням проведено i3 залученням методів 3 математичного та фізичного моделювання.

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

• вперше оптимізовано і адресно формалізовано складові теорії синтезу електромеханічних систем з обгрунтуванням 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 синхронного IGB транзисторного багаторівневого статора двигуна перетворювача енергоефективного частотного частоти для пуску 3 проміжних функціонуванням пускових позиціях, на 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 IGB 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 залізорудних 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 **B**).

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 залізорудних шахт шляхом упровадження регульованого електроприводу вентилятора головного розглянуто можливість застосування багаторівневих провітрювання, 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 залізорудних шахтах; [81] – розглянуто комплекс напрямків підвищення енергоефективності в сучасних умовах при сталій технології видобутку залізорудної сировини: зниження втрат електричної енергії в комплексі енергопостачання-енергоспоживання, реструктуризація систем електропостачання, можливої створення умов для максимально 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 науковотехнічних 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 внесенні до міжнародної науковометричної 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 залізорудних шахт України, акти впровадження результатів роботи, список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

#### РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРІВ ГОЛОВНОГО ПРОВІТРЮВАННЯ НА ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ ІЗ ПІДЗЕМНИМ СПОСОБОМ ДОБУТКУ ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ

1.1 Загальні відомості про технологію вентиляції підземних гірничих виробок залізорудних шахт.

Залізорудні шахти відносяться до енергоємних підприємств з обмеженою кількістю енергоємних споживачів (рис.1.1).



Рисунок 1.1 – Діаграми споживання електричної енергії з основних видів споживачів залізорудних підприємств Криворізького залізорудного басейну

Інтенсифікація процесів підземного виробництва, впровадження високопродуктивного гірничого обладнання і технології видобування руди, перехід ведення гірничих робіт на більш глибокі горизонти (1500 – 2000 метрів) призводять до необхідності значного збільшення надходження в шахти свіжого повітря [7].

Оцінка стану вентиляції діючих шахт визначається за ступенем забезпеченості підземних виробок і зони гірничих робіт горизонтів нормованими рівнями витрат свіжого повітря та швидкістю повітряних струменів, а також необхідною продуктивністю ВГП.

Основні вентиляційні параметри ряду вітчизняних залізорудних шахт за результатами комплексного обстеження їх вентиляційної мережі станом на 2018 рік наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Вентиляційні параметри залізорудних шахт станом на 2018 рік

Шахта	Глибина робочих	Витрати повітря, м <sup>3</sup> /с				Тип ВГП	Ступінь викори-	Статич ний исиси	Кіль- кість
	горизонтів, м	Що надхо-	Що вида-	Продуктивність ВГП			стання продук- тивнос-	ККД вентиля торів	пус- ків ВГП
		дять у шахту	ються із шахти	Факт	Необх.		ті ВГП	-	на рік
Ім. Артема	1040	264,6	286,6	339,2	450	ВРЦД-	0,64	0,7	24
№1, ПАТ	1135					4,5			
«Арселор»	1225								
«Батьківщи- на», КЗРК	1315	233,1	174,9	181,7	400	ВРЦД- 31,5	0,37	0,64	28
	1390		81,9	135,2		ВРЦД- 3,3		0,24	28
«Жовтнева»,	1340	190,6	83,7	129,2	400	ВЦ-5с	0,46	0,40	30
КЗРК	1415		191,6	214,0		ВЦ-5		0,47	30
Ім. Фрунзе, ЄВРАЗ	1285	174,4	92,8	108,5	350	ВЦД- 2,2	0,56	0,44	24
	1360		108,2	126,6		ВЦД- 2,2		0,54	24
«Ювілейна»,	1285	218,5	156,4	166,4	400	ВЦ-5	0,64	0,49	28
ЄВРАЗ	1360		99,6	107,1		ВЦД- 31,5		0,39	28
«Гвардійська	1272	127,0	182,6	217,3	350	ВЦ-5	0,32	0,39	35
», КЗРК	1432								
«Тернівська» КЗРК	1350	242,1	227,5	242,2	450	ВЦД- 31,5	0,54	0,42	32
	1425		123,3	129,1		ВЦ-5с		0,37	32
«Експлуатаці йна», ЗЗРК	740	681,0	213,4	229,9	950	ВЦД- 3,3	0,72	0,55	24
	840		259,4	268,6		ВЦД- 3,3		0,54	24
	940		183,0	193,3		ВЦД- 31,5		0,37	28

Невисока ефективність використання продуктивності діючих на шахтах ВГП, яка згідно наведених (у табл. 1.1) даних для різних шахт знаходиться в межах від 0.3 до 0.6, і не дозволяє забезпечити гірників необхідними об'ємами повітря, також знижує загальний коефіцієнт корисної дії вентиляційних установок і їх електромеханічних систем загалом.

Як правило, ВГП комплектуються електроприводом у більшості з синхронними електричними двигунами (табл. 1.2). Із загальних даних (табл. 1.2) очевидно, що к.к.д. електродвигунів приблизно дорівнює 0,95, загальний к.к.д. сягає 0,87, а статичний к.к.д. ВГП на різних шахтах знаходиться в межах від 0,4 до 0,6.

Таблиця 1.2 – Основні параметри привідних електродвигунів головних вентиляторних установок шахт

Тип ВГП	Потуж-	Напруга	Швидкість	К.К.Д.	Струм	Іпуск/	Тип
	ність кВт	В	ел. двигуна	%	статор	Іном	електродвигуна
			об/хв		а		
					А		
ВРЦД-31,5	1250	6000	500	95,3	141	7	СДВ 15-64-10
ВРЦД-3,3	1600	6000	600	95,5	179	5,5	СДВС 15-64-
							10УЗ
ВЦ-5	1250	6000	300	94,7	141	6	СДН 17-39-20

З цих даних можемо зробити висновок, що рівень електроенергоспоживання ВГП (рис. 1.1) складає майже третину від загального обсягу споживання гірничорудним підприємством і це вагома частка, при тому, що максимальна ефективність використання має значення 0,7 (табл. 1.1) [8].

Тобто, вже в превентивному баченні, вочевидь, що потрібна розробка дієвих методів і заходів для підвищення ефективності використання енергії у комплексах ВГП за рахунок потенціалу існуючих технологій та режимів роботи обладнання з метою енергозбереження і підвищення енергоефективності технологічного процесу їх функціонування.

## 1.2 Варіативність досліджень та розробок методів і засобів пуску синхронних електродвигунів в електромеханічних комплексах.

Проблематикою, а точніше, шляхами вирішення проблеми ефективного пуску СД, займалися дослідники з перших моментів створення таких видів електродвигунів. Фундаторами даного наукового спрямування є вчені різних країн і різних епох. У їх числі вчені, праці котрих вирізняються глибиною та універсальністю пошуку: Адкінс Б., Абрамовіч Б.М., Бірюков Ю.О., Букович Н.В., Вольдек А.І., Венніков В.О., Важнов А.І., Горев А.А., Глібов І.А., Грузов Л.Н., Газовська Є.Я., Гречко А.М., Давідян Ж.Д., Ковач К.П., Казовський Е.Я., Костенко М.П., Копилов І.П., Корнілов Г.П., Клепіков В., Кіріченко В.І., Ковач К.Г., Ключев В.І., Лайбл Т.Т., Меньшов Б.Г., Мазуренко Л.І., Нізімов Р.В., Овчинніков І.Е., Пересада С.П., Постніков І.М., Півняк Г.Г., Піотровський Л.М., Родькін Д.Й., Рац І., Сьянов А.М., Сиромятников І.А., Синьолиций А.Ф., Сивокобиленко В.Ф., Трещев І.І., Титюк В.К., Хабігер Е., Чорний О.П., Шенфельд Р., Шакарян Ю.Г. [10]-[73] та ряд інших пошукачів.

Проте, аналізуючи з позицій сьогодення, стверджувати, що вирішення даної проблеми близьке до свого завершення, буде не зовсім коректним висновком. У певній мірі ця невирішеність пов'язана з деякою обмеженістю географії застосування цих видів електричних машин, бо, як правило, це потужні електроприводи з напругою живлення більше 1000 В. Значний вплив на хід досліджень сприяв і факт – для яких умов (для яких видів споживачів) СД планується використовувати. Відсутність такого еквіполентування внесло як свої «плюси», так і «мінуси» в кінцеві дослідницькі рішення. Головним «мінусом» при цьому була відсутність універсальності методів пуску СД. Проте, ця теза все ж таки досить умовна, оскільки в ідеалі необхідності та варіантів можливостей це навряд чи взагалі можливо. Незважаючи на те, що теоретичні основи для наукового пошуку в цьому аспекті були закладені ще в 20-х – 30-х роках минулого століття, пошуки нових методів і засобів пуску СД для тих чи інших умов продовжується і зараз. В роботах [11]-[22] було закладено загальні принципи та певні варіації розбудови структур систем збудження СД. Технічною базою при цьому були існуючі на той час елементи перетворювальної техніки.

Узагальнені питання пуску СД викладені також у наукових працях [41]-[57]. Результати їх, як і ряду інших досліджень, відкрили перспективу для процесу адресних пошуків для конкретних структур і типів електроприводів.

Цікавими, згідно своїх рішень, виглядають дослідження [58]-[60] спрямовані на вирішення проблеми пуску синхронних приводів барабанних млинів збагачувальних фабрик.

В розрізі досліджень [61]-[64] аналізувались процеси для пуску СД кар'єрних екскаваторів.

У роботі [65] детально аналізувалися способи пуску СД, наведено їх класифікацію, оцінено варіанти способів та їх доцільність для умов конкретних видів електроприводів. У ході досліджень дослідниками були розроблені конкретні схемотехнічні рішення. Проте, згідно мети дослідження цей етап окреслювався специфікою синхронних перетворювачів екскаваторних електроприводів, а це звузило можливість імплементації досліджень, що аналізуються, на інші електромеханічні комплекси.

Аналізуючи сучасний стан досліджень у питаннях управління функціонування функціями СД, згідно формату рішення даної проблеми, автор дійшов висновку, що процес пошуку у напрямку розробки ефективних систем пуску СД в складі синхронного електропривода в останні 5-10 років активізувався в науковій сфері закордонних дослідників.

Так, у роботі [66] розглянуто питання оптимального управління зворотнім зв'язком СД згідно його стану, що дає можливість оптимально «стабілізувати» збудження та вхідну потужність машини. В [67] запропоновано інноваційну модель для насичених СД. В [68] наведено результати моделювання перехідних процесів у СД при його збудженні в різних навантажувальних режимах. У [69] пропонується нова система управління СД з регулюванням частоти обертів на основі детермінованого спостерігача, представлено порівняльний аналіз із нелінійним методом управління. В [70]-[73] наведено пропозиції щодо лінійки систем управління СД.

Віддаючи дані якості вищезгаданих досліджень, у черговий раз зазначимо, що вони (дослідження), як правило, були адресно орієнтовані на конкретний об'єкт.

Окрім цього, більшість розробок даних систем переслідували мету полегшеного пуску як превентивний захист СД від ушкоджень в реально можливих умовах затяжного пуску.

При цьому не менш важлива складова функціонування синхронного електропривода – енергетична, розглядалась по дотичній. Проте, в умовах сьогодення саме ця складова є першочерговою проблемою. І квінтесенцією нового, доповненого до існуючих форматів рішень, повинна стати можливість реалізації процесу пуску СД в межах енергоефективних характеристик усього електромеханічного комплексу ВГП.

# 1.3 Порівняння енергетичної ефективності способів регулювання продуктивності вентиляторів головного провітрювання шахт

В додатку Б наведено аналіз існуючих систем пуску та збудження СД. Критеріями для порівняння взято класичні показники.

Між тим, згідно мети наукового дослідження авторі [88], [89], [98], [99], наряду з існуючими нас цікавить критерії енергоефективності [100].

Основними параметрами вентиляторів є:

- продуктивність (витрата) *Q*<sub>*a*</sub>, м3 / с;
- депресія або тиск  $H_a$ , Па;
- аеродинамічна потужність  $P_a = H_a \cdot Q_a$ , Вт;
- потужність на валу  $P_n$ , Вт;

- ККД, рівний відношенню аеродинамічної потужності до потужності на валу  $\eta = P_{a'} P_{n}$ ;

- швидкість обертання колеса  $\omega$ ;
  - кут установки лопаток робочого колеса і направляючого апарата  $\alpha$ .

Діаметр робочого колеса відноситься до конструктивних параметрів і не може бути змінений протягом терміну служби. Діапазон діаметрів для вентиляторів головного провітрювання становить 1-5 м.

Швидкість обертання колеса вентилятора обмежується механічною міцністю конструкції в діаметрі робочого колеса 4-5 м, до швидкості  $\omega = 3000 \ of$ . / xв. для вентиляторів місцевого провітрювання.

Робочі характеристики вентилятора в залежності від залежності депресії  $H_a(Q_a)$  повної потужності  $P_n(Q_a)$  і ККД вентилятора  $\eta(Q_a)$  від його продуктивності  $Q_a$  при заданих значеннях кута  $\alpha$  і частоти обертання  $\omega$ . Залежність депресії вентилятора  $H_a$  від його залежної продуктивності  $H_a(Q_a, \omega, \alpha)$  називають напірною характеристикою вентилятора. Залежно споживаної потужності  $P_n(Q_a, \omega, \alpha)$  і ККД вентилятора  $\eta(Q_a, \omega, \alpha)$ відображають витрати енергії та ефективність роботи вентилятора для різних режимів роботи.

Робочі характеристики вентилятора визначаються за результатами випробувань промислового зразка і надаються компаніями-виробниками. У разі аеродинамічного способу регулювання паспортні дані містять робочі характеристики для ряду кутів α при постійній швидкості обертання, для вентиляторів із частотним способом регулювання – робочі характеристики для ряду швидкостей обертання ω при заданому куті α.

Можливі режими роботи вентилятора, для яких ККД становить не менше 60%, утворюють на площині депресія-продуктивність так звану робочу область або зону промислового використання.

Проаналізувавши режим роботи вентилятора ВЦД-32М з параметрами номінального режиму  $\alpha = 0^{\circ}$ ,  $H_0 = 4700$  Па,  $Q_0 = 200$  0 м<sup>3</sup>/с,  $P_{n0}$  1,6 МВт,  $\eta = 84\%$  при аеродинамічному способі управління, графіки характеристик представлені на рис. 1.2.

Максимальне значення ККД  $\eta = 84\%$  (рис. 1.2 а) має місце тільки в номінальному режимі роботи. З графіка залежності ККД вентилятора від продуктивності  $\eta(Q_a)$  (рис. 1.2 б) видно, що при аеродинамічному способі регулювання режимом провітрювання збільшення кута  $\alpha$  призводить до падіння ККД за рахунок зростання аеродинамічних витрат.



Рисунок 1.2 - Напірні характеристики відцентрового вентилятора ВЦД-32М при аеродинамічному способі регулювання - а), потужність на валу - б) і ККД - в)

При роботі вентилятора на аеродинамічну мережу режим роботи характеризуються робочою точкою  $Q_a$ ,  $H_a$ , яка визначається перетином напірної характеристики вентилятора і характеристики мережі, як показано на рис. 1.3. Робочу характеристику мережі прийнято представляти в такому вигляді:

$$H_a(Q_a) = R_a \cdot Q_a^2, \tag{1.1}$$

де *R<sub>a</sub>* - еквівалентний аеродинамічний опір вентиляційної мережі.



Рисунок 1.3 - Визначення робочої точки при роботі вентилятора на мережу

Робоча точка змінює своє положення як при зміні характеристики мережі  $H^{\text{мережi}}_{\alpha}(Q_{\alpha})$  а мережі а за рахунок зміни аеродинамічного опору  $R_{a}$ , так і при зміні характеристики вентилятора  $H^{\text{вент}}_{\alpha}(Q_{\alpha})$  за рахунок зміни кута  $\alpha$ . Управління вентиляційною установкою аеродинамічним способом полягає в такій зміні характеристики вентилятора  $H_{a}(Q_{a}, \alpha)$  за рахунок зміни кута  $\alpha$ , при якому робоча точка займає положення з необхідною продуктивністю.

Через те, що положення лопаток змінюється дискретними кроками, домогтися точної відповідності фактичної і заданої робочої точки, як правило, не вдається. Внаслідок цього вентилятор змушений працювати із завищеною продуктивністю, що недоцільно з економічної точки зору. Необхідний кут нахилу лопаток вибирається таким чином, щоб забезпечити задану продуктивність із мінімальним надлишком повітря, що подається.

Плавне регулювання продуктивності частотним способом дозволяє домогтися відповідності заданої і фактичної робочої точки. При зміні частоти обертання напірна характеристика вентилятора змінюється таким чином, щоб її точка перетину з характеристикою мережі збіглася із заданою робочою точкою.

Графіки робочих характеристик вентилятора ВЦД-32М при куті  $\alpha = 0^{0}$  представлені на рис. 1.4. З рис. 1.4 а видно, що при зміні швидкості обертання напірні характеристики виходять у результаті паралельного перенесення характеристики  $H_{a}(Q_{a})$ , отриманої для номінальної швидкості і кута  $\alpha = 0^{0}$ . Як випливає (рис. 1.4 в), максимальне значення ККД  $\eta_{max}$  для кривих  $\eta(Q_{a})$  при швидкостях  $\omega_{k} = const$  не залежить від швидкості обертання і дорівнює номінальному значенню ККД вентилятора  $\eta = 84\%$ .

З порівняння становища середньорічних точок провітрювання щодо областей постійного значення ККД для аеродинамічного і частотного способу регулювання продуктивністю видно, що область промислового використання вентилятора з умови  $\eta \ge 60 \%$  для частотного способу більша, ніж для аеродинамічного способу.


Рисунок 1.4 - Напірні характеристики відцентрового вентилятора ВЦД-32М при частотному способі регулювання - а), потужність на валу - б) і ККД - в)

Розглянемо для порівняння енергетичних характеристик аеродинамічного, частотного і комбінованого методу управління продуктивністю вентилятора відцентрового типу.

Регулювання продуктивності вентилятора ВЦД-32М здійснюється частотним способом або аеродинамічним способом за допомогою зміни кута нахилу направляючого апарата з 8 положеннями лопаток від 0° до 70°. Номінальна швидкість обертання становить 600 об./хв.

Аналіз енергетичних показників роботи вентиляторів зроблений для наступних способів регулювання продуктивністю:

- ВЦД-32М з аеродинамічним регулюванням,
- ВЦД-32М з частотним регулюванням.

Результати розрахунків режимів роботи для вентиляторів ВЦД-32М показані в табл. 1.3 і 1.4. Сумарна витрата електроенергії за весь термін служби вентилятора знайдена за формулою:

$$E = \sum_{i=1}^{n} P_n \cdot T$$
, кВт · год. (1.2)

де T = 8760 годин - кількість годин роботи вентилятора за рік.

Таблиця 1.3 – Режими роботи вентилятора ВЦД-32М з аеродинамічним

Рік	Кут а	Qаф,	Наф,	Рп, кВт	η, %	$\Delta Pa, \%$	Е, МВтч
		м3/с	кПа				
1	70°	160,46	200,27	835,33	50,54	68,57	7317,5
2	70°	160,90	198,66	834,95	50,27	63,05	7314,1
3	70°	180,99	251,36	834,95	50,27	57,19	7314,1
4	70°	181,39	250,32	834,71	50,10	51,15	7312,0
5	60°	200,01	302,23	850,31	58,77	45,55	7448,7
6	50°	201,52	299,64	863,09	65,61	39,49	7560,6
7	40°	202,20	298,45	905,00	73,65	35,46	7927,8
8	40°	217,20	339,12	904,28	73,43	28,46	7921,4
9	20°	227,86	326,49	971,99	78,86	26,10	8514,6
10	10°	229,63	364,56	1004,71	79,86	21,61	8801,2

регулюванням частоти обертів робочого органа

Таблиця 1.4 – Параметри режимів роботи вентилятора з частотним способом регулювання частоти обертів робочого органа

ВЦД-32М α=0°								
Рік	ω, ο.e.	Рп, кВт	η, %	Е, МВт•ч				
1	0,651	322,59	81,37	2825,9				
2	0,687	379,61	81,25	3325,4				
3	0,721	439,82	81,25	3852,8				
4	0,754	502,28	81,18	4400,0				
5	0,787	570,78	81,11	5000,0				
6	0,819	645,60	80,89	5655,5				
7	0,851	722,90	80,78	6332,6				
8	0,880	802,29	80,62	7028,1				
9	0,912	893,48	80,38	7826,9				
10	0,941	981,86	80,20	8601,1				

Розрахунки також дозволили визначити діапазон регулювання швидкості для частотно-регульованого електропривода. Для всіх варіантів він знаходиться в межах 0,65-1.

На рис. 1.5 показано порівняння витрат енергії за 10-річний термін служби вентиляторів для аеродинамічного і частотного способів регулювання продуктивністю. Аеродинамічний спосіб провітрювання програє частотному способу. Помаранчевим кольором виділено відмінність у витратах енергії в МВт\*год, в дужках вказано процентну відмінність.





Проведена порівняльна оцінка аеродинамічного і частотного способу регулювання продуктивності вентилятора. Підтверджено, що зона промислового використання вентилятора при частотному способі більша, ніж при аеродинамічному способі регулювання. Максимальний ефект від частотного способу управління продуктивністю на інтервалі терміну служби вентилятора досягається при збігу робочих точок провітрювання з лінією максимального значення ККД.

На прикладі розрахунку динаміки зміни потужності і ККД вентилятора на інтервалі терміну служби відцентрового вентилятора ВЦД-32М номінальною потужністю 1200 кВт для однієї із шахт зроблена оцінка зниження витрат енергії при переході на частотний спосіб регулювання, яка склала  $\Delta W = 2*10^7$  кВт\*год.

## 1.4 Аналіз електроенергетичних режимів функціонування вентиляторів головного провітрювання шахт.

Напрямки з підвищення електроенергоефективності функціонування ВГП, враховуючи технологічні режими їх роботи, на перший погляд виглядають вкрай прісно. Для оцінювання реального стану електроенергоефективності функціонування ВГП з метою отримання достатнього за обсягом інформативного матеріалу для дослідницького процесу, автором у складі наукової групи кафедри автоматизованих електромеханічних систем у промисловості та транспорті Криворізького національного університету під керівництвом проф. Сінчука О.М. протягом близько 10-ти років фіксувались графіки рівнів добового споживання електричної енергії в різні періоди року на ряді вітчизняних підземних залізорудних підприємств [74]-[79].

До аналізу підпали залежності рівнів споживання електроенергії енергоємними споживачами, частка котрих у загальних обсягах сягає біля 90% від загального споживання ЕЕ підземними залізорудними підприємствами (Додаток А).

Як свідчать результати [9], то найбільші рівні коливань у споживанні ЕЕ ВГП характерні в годинах доби.

На рис. 1.6 – 1.9 для прикладу наведені певні добові графіки споживання ЕЕ рядом залізорудних шахт. Як свідчить аналіз наведених графіків, то режими споживання ЕЕ ВПГ у годинах доби носять незначний коливальний характер. Це результат того, що режим функціонування залізорудних шахт безперервний цілодобовий. Для вентиляторів характерний спокійний режим роботи, але можливі й поштовхи навантаження. Наприклад, при відкритті і закритті вентиляційних дверей, ляд і т.п. Проте при цьому існує і певна енергетична проблема, котра в кінцевому варіанті несе матеріальне навантаження на економіку підприємства. Як свідчить все той же аналіз енергоефективності ВГП, значний потенціал у зниженні енерговитрат даних видів енергоємних споживачів ЕЕ шахт лежить у системі пуску СД. Логічно й відомо, що основною, хоча і не єдиною умовою забезпечення економічного функціонування ΒΓΠ. £ використання В ïх комплексах систем електропривода із плавним пуском, при необхідному діапазоні зміни частоти обертання при незначному зменшенні к.к.д. вентилятора.



Рисунок 1.6 – Споживання активної електричної енергії вентиляторами головного провітрювання на 1 лютого 2017 р. шахт Криворізького залізорудного басейну



Рисунок 1.7 – Споживання активної електричної енергії вентиляторами головного провітрювання на 1 лютого 2018 р. шахт Криворізького залізорудного басейну



Рисунок 1.8 – Споживання активної електричної енергії вентиляторами головного провітрювання на 1 лютого 2019 р. шахт Криворізького залізорудного басейну



Рисунок 1.9 – Споживання активної електричної енергії вентиляторами головного провітрювання на 1 лютого 2020 р. шахт Криворізького залізорудного басейну

Виходячи з цього, можна встановити такі основні вимоги до системи електропривода:

- мінімальні зміни в режимах роботи вентилятора установки від номінального;
- мінімальне споживання електричної енергії в заданому режимі;
- мінімальний час переходу між різними режимами роботи.

Окрім вищезгаданих вимог, зазначимо, що система електропривода повинна забезпечувати стійку роботу на заданій швидкості при скидах і накидах навантаження, коливаннях напруги в мережі, а також оперативне автоматичне регулювання продуктивності вентилятора в залежності від зміни еквівалентного опору вентиляційної мережі, змісту вибухонебезпечних сумішей у вихідному струмені, характеру змін, днів і т.п.

## 1.5 Аналіз та оцінювання систем пуску синхронних двигунів для умов вентиляторів головного провітрювання залізорудних шахт.

# 1.5.1 Основні обмеження та недоліки пуску синхронного електропривода

В різних умовах експлуатації головних вентиляторних установок тих чи інших залізорудних шахт можуть бути сформовані відповідно різні обмеження в основних частинах електромеханічної установки, а саме з боку системи електроживлення, систем пуску та керування, привідного електродвигуна і робочого механізму.

До основних обмежень можна віднести такі [80], [81]:

- якість і втрата напруги в системі електропостачання повинна дотримуватись міждержавного стандарту ГОСТ 32144-2013;
- пришвидшення розгону механізму не повинне перевищувати допустимі паспортні значення;
- нагрів обмоток електродвигуна в процесі пуску та роботи не повинні перевищувати допустимі значення;
- вартість пускового та керуючого обладнання повинна бути мінімальною;

 відхилення від робочих характеристик електропривода вентилятора головного провітрювання не повинні перевищувати номінальні значення за вимогами технологічного процесу.

Як зазначалось раніше, в попередніх розділах даного дослідження в електромеханічних комплексах діючих ВГП використовуються синхронні електричні двигуни. До базоутворюючих позитивних якостей цих типів електродвигунів в електроприводі ВГП можна віднести те, що при невеликій зміні навантаження швидкість електродвигуна лишається незмінною. Однак, є і ряд недоліків, а саме:

- 5-10-кратні пікові значення струмів статора і ротора при використанні різних систем пуску;
- затягування процесу пуску;
- виникнення складнощів при входженні в синхронізм електродвигуна;
- просідання напруги високовольтної мережі живлення;
- перегрів обмоток електродвигуна.

Саме ці недоліки і є тими провідними віхами для розробки систем пуску СД та формування енергоефективних характеристик їх функціонування у складі електромеханічних комплексів.

Вибір системи пуску може здійснюватися на основі аналізу основних параметрів електротехнічного комплексу головних вентиляторних установок (системи електропостачання, привідного двигуна та робочого органу) з вищевказаними обмеженнями.

### 1.5.2 Порівняльний аналіз систем полегшеного пуску СД

Аналіз відомих методів та способів пуску СД в наближенні до умов електромеханічних комплексів ВГП викладено в Додатку (Б).

У табл. 1.5 наведена порівняльна характеристика, що дозволяє хоча й апріорно, але все ж із достатньою коректністю, говорити про достоїнства і недоліки використання різних пускових систем.

Проведений вище аналіз свідчить про те, що всі способи пуску СД, за винятком пуску за допомогою УВ-Д, в умовах тимчасових перетворювальних

комплексів із СД або занадто складні, або економічно невиправдані, або непридатні взагалі в принципі з ряду причин.

Для існуючих способів і систем пуску СД, вочевидь, реальною є можливість нового підходу (на відміну від традиційних схем пуску) в напрямку створення ефективних (в т. ч. енергоефективних) електромеханічних систем, які будуть вирішувати основні проблеми цього процесу та відповідати обмеженням, які накладаються на електромеханічний комплекс ВГП залізорудних шахт і рудників.

Таблиця 1.5 - Порівняльний аналіз систем полегшеного пуску синхроного електродвигуна

Способи пуску	Переваги	Недоліки	
1	2	3	
Зі спеціальної розщепленої ОЗ	Значно підвищено	Не усувається негативне явище	
	електромагнітний момент	при пуску	
З накопичувачем енергії в ОЗ	Значно підвищено	Не усувається негативне явище	
	електромагнітний момент	при пуску	
Реакторний	Простота реалізації і пуску	Мало усуваються негативні	
		явища при пуску	
ЕМПЧ за схемою	Мала потужність розгінного	Складність управління пуском.	
«АД - СД»	двигуна	Погані масогабаритні	
		показники	
ЕМГТЧ за схемою	Простота процесу пуску	Не усувається негативне явище	
«СД - АД»		при пуску. Погані	
		масогабаритні показники	
ЕМГТЧ за схемою	Можливість включення в	Потрібний валоповоротний	
«СД - АД»	мережу за допомогою	пристрій і потужний	
	регулювального резистора	регулювальний реостат. Погані	
		масогабаритні показники	
Частотний	Пуск і точна синхронізація.	Потрібні датчики положення	
	Хороші масогабаритні	ротора і пристрій точної	
	показники	синхронізації	
Звичайний пуск за допомогою	Пуск і точна синхронізація з	Потрібні потужні регулювальні	
АД із фазним ротором	мережею	реостати і пристрій точної	
		синхронізації	
Каскадний пуск за допомогою	Пуск і точна синхронізація.	Потрібні потужні регулювальні	
АД із фазним ротором	Пристрій точної синхронізації	реостати. Погані масогабаритні	
	не потрібний	показники	
Розгін за допомогою ДПС в	Простота процесу пуску.	Не усуваються негативні	
системі з РВУ	Відмінні масогабаритні	явища в кінці пуску	
	показники		
Розгін за допомогою ДПС у	Пуск і точна синхронізація.	Необхідний пристрій точної	
системі ТПД	Відмінні масогабаритні	синхронізації	
	показники		
Частотно-імпульсний	Точна синхронізація з	Не усуваються негативні	
	мережею відбувається	явища на початку пуску	
	природно. Відмінні		
	масогабаритні показники		

#### 1.6 Формування мети та задач і наукового пошуку

Викладений в попередніх розділах матеріал дозволяє визначити мету підвищення енергоефективності досліджень € електромеханічних комплексів вентиляторів головного провітрювання шахт, шляхом запровадження в практику розробок ефективних методів плавного пуску i3 функціонуванням приводних синхронних двигунів останніх В енергоорієнтованих межах пускових характеристик.

Базуючись на аналізі наявних методів та заходів підвищення електричної ефективності синхронного електропривода з акцентом на умови електромеханічних комплексів вентиляторів головного провітрювання шахт, та згідно з метою даного наукового пошуку формалізовані наступні наукові завдання для досліджень:

 аналіз методів і засобів пуску синхронних двигунів з позицій функціональності їх у комплексі електроприводів вентиляторів головного провітрювання шахт за рівнем їх енергоефективності процесу;

 обґрунтування та розробка, для формату подальших досліджень, превентивних варіантів структур енергоефективних синхронних електроприводів і способів управління ними для умов вентиляторів головного провітрювання залізорудних шахт;

– модернізація методу циклічного почергового управління блоками багаторівневого IGBT транзисторного перетворювача електричної енергії для живлення синхронних двигунів електромеханічних комплексів вентиляторних установок шахт та порівняльна оцінка режимів їх роботи з урахуванням запропонованого принципу роздільної зміни величини і частоти вихідної напруги;

– розробка принципу та методу формування оптимальної кривої вихідної напруги перетворювача частоти та імплементація його в структури енергоефективних систем синхронних двигунів електроприводів вентиляторів головного провітрювання шахт.

### 1.7 Висновки до розділу 1

На основі підтверджених недоліків синхронних електроприводів, стосовно можливостей їх ефективного функціонування в складі електромеханічних комплексів вентиляторів головного провітрювання шахт, визначено мету дисертаційної роботи – створення електроенергоефективного і надійного варіанта синхронного електропривода ВГП з полегшеною системою пуску СД.

Намічено шляхи вирішення проблем:

- використання напівпровідникового перетворювача в статорному колі;
- застосування плавного і квазі частотного регулювання;
- використання IGB транзисторної системи збудження синхронного двигуна.

Поставлені завдання з проведення досліджень проблем і шляхів їх вирішення для досягнення мети дисертаційної роботи:

- розробка і дослідження запропонованих на перспективу схем синхронного електропривода і способів управління ними;
- удосконалення IGB транзисторної системи збудження синхронного двигуна;
- розробка системи автоматичного регулювання синхронного електропривода з урахуванням запропонованих нововведень.

## РОЗДІЛ 2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З АНАЛІЗУ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА В УМОВАХ ВЕНТИЛЯТОРІВ ГОЛОВНОГО ПРОВІТРЮВАННЯ

## 2.1. Вибір математичного апарату для дослідження процесів в синхронному електроприводі

Відповідно до загальної теорії електричних машин [11]-[20], їх миттєві значення фазних електричних параметрів а саме напруги, струму, потокозчеплення (потоку) - зводяться до результуючих векторів:

$$\begin{cases} \overline{u}_{s} = \frac{2}{3} (u_{A} + \overline{\alpha} u_{B} + \overline{\alpha}^{2} u_{C}); \\ \overline{i}_{s} = \frac{2}{3} (i_{A} + \overline{\alpha} i_{B} + \overline{\alpha}^{2} i_{C}); \\ \overline{\psi}_{s} = \frac{2}{3} (\psi_{A} + \overline{\alpha} \psi_{B} + \overline{\alpha}^{2} \psi_{C}); \end{cases}$$
(2.1)

де вектори повороту

$$\begin{cases} \overline{\alpha} = \exp j \frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}; \\ \overline{\alpha}^{2} = \exp j \frac{4\pi}{3} = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}; \end{cases}$$
(2.2)

Проведено оперативні перетворення з результуючим вектором напруги.<sup>2</sup>

Модуль результуючого вектору напруги  $|\bar{u}_{s}| = U_{sm}$  постійний і дорівнює амплітуді синусоїди фазної напруги  $U_{im}$  (i = A, B, C). Результуючий вектор визначається виразом

$$\overline{u}_{s} = U_{sm} \cdot \exp j\theta_{s} = U_{sm} \cdot (\cos \theta_{s} + j \sin \theta_{s}), \qquad (2.3)$$

де  $\theta_s = \omega_s t$ .

Зворотне перетворення миттєвого значення напруги кожної фази представляється проєкцією вектора  $|\bar{u}_{s}|$  на вісь відповідної фази, рис. 2.1.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Логіка дій з вектором струму і потоку аналогічна.



Рисунок 2.1 - Діаграми векторів напруг у трифазній системі нерухомих осей А, В, С.

ſ

$$\begin{cases} u_{A} = \left| \overline{u}_{SA} \right| = U_{Sm} \cdot \cos \theta_{S}; \\ u_{B} = \left| \overline{u}_{SB} \right| = -U_{Sm} \cdot \cos \left( \frac{\pi}{3} + \theta_{S} \right) = u_{Sm} \cdot \left( -\frac{1}{2} \cos \theta_{S} + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta_{S} \right); (2.4) \\ u_{C} = \left| \overline{u}_{SC} \right| = -U_{Sm} \cdot \cos \left( \frac{\pi}{3} - \theta_{S} \right) = u_{Sm} \cdot \left( -\frac{1}{2} \cos \theta_{S} - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta_{S} \right); \end{cases}$$

Оскільки в симетричній системі  $u_A + u_B + u_C = 0$ , то  $u_B + u_C = -u_A$ відображає знак мінуса в формулах  $u_B$  і  $u_C$ .

Вирази (2.1) - (2.4) описують процеси як в колах статора, так і в колах ротора в системі координат жорстко пов'язаної зі статором. В системі координат жорстко пов'язаної з ротором процеси описуються наступним чином, рис. 2.2.



Рисунок 2.2 - Зв'язок нерухомої системи координат (статора) з обертовою (ротор):

 $\theta_L = \theta_S - \theta_R.$ 

Вектор  $\bar{u}_s$  в нерухомій (S) системі координат позначається як  $\bar{u}_{ss}$ , в рухомій (L) системі як  $\bar{u}_{sL}$ , і зв'язок між ними буде:

$$\begin{cases} \overline{u}_{SL} = \overline{u}_{SS} \cdot \exp(-j\theta_R); \\ \overline{u}_{SS} = \overline{u}_{SL} \cdot \exp(j\theta_R). \end{cases}$$
(2.5)

Ротор СД має електричну і магнітну асиметрію, в роторі явнополюсної машини асиметрія проявляється в більшій мірі, а в неявнополюсній - меншою мірою. Асиметрія визначається в двох взаємно перпендикулярних осях - в поздовжній (дійсній) d осі, і в поперечній (уявній) q осі. Відповідно параметри СД по осях різняться, (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 - Вектора синхронної машини в осях d і q

Просторовий вектор  $\overline{u}_{L}$ , представлений в обертовій (роторній) системі координат, при розкладанні на складові по осях d і q виражається рівнянням - $\overline{u}_{L} = u_{d} + ju_{q}$ , де

$$\begin{cases} u_d = \operatorname{Re}(\overline{u}_L); \\ u_q = I_m(\overline{u}_L). \end{cases}$$
(2.6)

Для умов статору:

$$\overline{u}_{SL} = u_{Sd} + ju_{Sq} = \overline{u}_{S} \cdot \exp(-j\theta_{R}) = \frac{2}{3}(u_{A} + \overline{\alpha} \cdot u_{B} + \overline{\alpha}^{2}u_{c}) \cdot \exp(-j\theta_{R}); \qquad (2.7)$$

Розкладання (2.7) по осях на дійсну  $R_e$  і уявну  $I_m$  частину дає:

$$\begin{cases} u_{d} = \frac{2}{3} \left[ u_{A} \cdot \cos \theta_{R} + u_{B} \cdot \cos \left( \theta_{R} - \frac{2\pi}{3} \right) + u_{C} \cdot \cos \left( \theta_{R} + \frac{2\pi}{3} \right) \right]; \\ u_{d} = -\frac{2}{3} \left[ u_{A} \cdot \cos \theta_{R} + u_{B} \cdot \sin \left( \theta_{R} - \frac{2\pi}{3} \right) + u_{C} \cdot \sin \left( \theta_{R} + \frac{2\pi}{3} \right) \right]. \end{cases}$$
(2.8)

Зворотно:

(

$$\begin{cases} u_{A} = \operatorname{Re}\left[\left(u_{d} + ju_{q}\right) \cdot \exp j\theta_{R}\right] = u_{d} \cdot \cos\theta_{R} - u_{q} \cdot \sin\theta_{R}; \\ u_{B} = \operatorname{Re}\left[\overline{\alpha}\left(u_{d} + ju_{q}\right) \cdot \exp j\theta_{R}\right] = u_{d} \cdot \cos\left(\theta_{R} - \frac{2\pi}{3}\right) - u_{q} \cdot \sin\left(\theta_{R} - \frac{2\pi}{3}\right); \\ u_{C} = \operatorname{Re}\left[\overline{\alpha}^{2}\left(u_{d} + ju_{q}\right) \cdot \exp j\theta_{R}\right] = u_{d} \cdot \cos\left(\theta_{R} + \frac{2\pi}{3}\right) - u_{q} \cdot \sin\left(\theta_{R} + \frac{2\pi}{3}\right). \end{cases}$$
(2.9)

Співвідношення (2.8), (2.9) називають перетвореннями Парку – Горєва [17].

При цьому зв'язок між векторами потоку і струму встановлюється наступним чином. СД приймається ненасиченим, отже, залежність між потокозчепленням і намагнічувальною силою, тобто струмом, лінійна. Коефіцієнт пропорційності, це - повна індуктивність, що представляє собою суму власної та взаємної індукцій.

Власна індуктивність обмотки фази статора *l<sub>s</sub>* пов'язує струм, оточуючий цю фазу, і потік, створений цим же струмом визначається як:

$$l_{s} = L_{sl} + l_{s\mu} \tag{2.10}$$

де L<sub>si</sub> - індуктивність поля розсіювання;

 $l_{\scriptscriptstyle S\!\mu}$  - індуктивність фази головного потоку.

Взаємна індуктивність *m<sub>s</sub>* пов'язує потоки, створені струмами інших фаз і зчеплені з обмоткою даної фази.

Повний потік, зчеплений з фазою А статора:

$$\psi_{SA} = i_{SA} \cdot l_{S} + i_{SB} \cdot m_{S} + i_{SC} \cdot m_{S} = i_{SA} \cdot l_{S} - i_{SA} \cdot m_{S} = i_{SA}(l_{S} - m_{S}) \quad (2.11)$$

з врахуванням  $i_{SA} + i_{SB} + i_{SC} = 0$ ,  $i_{SB} + i_{SC} = -i_{SA}$  для симетричної трифазної системи.

Аналогічно для інших фаз

$$\psi_{SB} = i_{SB} (l_{S} - m_{S});$$
  

$$\psi_{SC} = i_{SC} (l_{S} - m_{S}).$$
(2.12)

У трифазній системі  $m_s = l_{s\mu} \cdot \cos \frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2} l_{s\mu}$ , тоді:

$$(l_{s} - m_{s}) = L_{sl} + l_{s\mu} + \frac{1}{2}l_{s\mu} = L_{sl} + \frac{3}{2}l_{s\mu} = L_{sl} + L_{s\mu} = L_{s}, \qquad (2.13)$$

де  $L_{s_{\mu}} = \frac{3}{2} l_{s_{\mu}}$  - еквівалентна індуктивність фази статора від головного потоку

з урахуванням взаємоіндуктівності;

 $L_{\scriptscriptstyle S}$ - повна еквівалентна індуктивність обмотки фази статора.

Рівняння (2.11) з урахуванням (2.13) приймає вигляд вид:

$$\begin{cases} \psi_{SA} = i_{SA} \cdot L_{S}; \\ \psi_{SB} = i_{SB} \cdot L_{S}; \\ \psi_{SC} = i_{SC} \cdot L_{S}; \end{cases}$$
(2.14)

Тут індекс S означає приналежність до статора. Аналогічно для ротора (індекс r):

$$\begin{cases} \psi_{rA} = i_{rA} \cdot L_r; \\ \psi_{rB} = i_{rB} \cdot L_r; \\ \psi_{rC} = i_{rC} \cdot L_r; \end{cases}$$
(2.15)

де

$$L_{r} = L_{rl} + L_{r\mu} = L_{rl} + \frac{3}{2}l_{r\mu}.$$
 (2.16)

Використовуючи (2.1), (2.14) і (2.15) визначається результуючий вектор потоку статорних обмоток, пов'язаний з власним результуючим струмом статора

$$\overline{\psi}_s = \overline{i}_s \cdot L_s, \qquad (2.17)$$

і результуючий вектор потоку роторних обмоток, пов'язаний з власним результуючим струмом ротора

$$\overline{\psi}_r = \overline{i}_r \cdot L_r. \tag{2.18}$$

Загальний потік статора, створений намагнічувальними силами статора і ротора:

$$\overline{\psi}_{sr} = \overline{i}_s \cdot L_s + \overline{i}_r \cdot L_{r\mu} \cdot \exp j\theta_R.$$
(2.19)

Загальний потік ротора, створений намагнічувальними силами статора і ротора:

$$\overline{\psi}_{rs} = \overline{i}_r \cdot L_r + \overline{i}_s \cdot L_{s\mu} \cdot \exp(-j\theta_R).$$
(2.20)

При збігу фаз статора і ротора

$$L_{r\mu} = L_{s\mu} = L_{\mu}. \tag{2.21}$$

Зв'язок між векторами напруги, струмів і потокозчеплень встановлюють співвідношення:

- для статора в статорній системі координат

$$\overline{U}_{ss} = \overline{i}_{ss} \cdot R_s + \frac{d\overline{\psi}_{ss}}{dt}, \qquad (2.22)$$

- для ротора в роторній системі координат

$$\overline{U}_{rr} = \overline{i}_{rr} \cdot R_r + \frac{d\overline{\psi}_{rr}}{dt}.$$
(2.23)

Використовуючи (2.5) приводимо параметри ротора до статора

$$\overline{U}_{rr} \cdot \exp(j\theta_{R}) = i_{rr} \cdot R_{r} \cdot \exp(j\theta_{R}) + \exp(j\theta_{R}) \frac{d}{dt} [\psi_{rs} \cdot \exp(-j\theta_{R})];$$

$$\overline{U}_{rs} = i_{rs} \cdot R_{r} + \frac{d\overline{\psi}_{rs}}{dt} - j \frac{d\theta_{R}}{dt} \cdot \overline{\psi}_{rs} = i_{rs} \cdot R_{r} + \frac{d\overline{\psi}_{rs}}{dt} - j\omega_{R} \cdot \overline{\psi}_{rs}.$$

$$\exp(j\theta_{R}) \cdot \exp(-j\theta_{R}) = 1.$$
(2.24)

Аналогічно, приводячи параметри статора до ротора:

$$\overline{U}_{rS} = \overline{i}_{Sr} \cdot R_S + \frac{d\psi_{Sr}}{dt} + j\omega_R \overline{\psi}_{Sr}. \qquad (2.25)$$

Підставляючи в (2.24), (2.25) рівняння для параметрів в осях *d* і *q* відповідно до (2.8), (2.9) і розділяючи дійсну і уявну частини, отримаємо рівняння Парка в системі *d* і *q*:

$$U_{sd} = i_{sd} \cdot R_{s} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_{R} \cdot \psi_{sq};$$

$$U_{sq} = i_{sq} \cdot R_{s} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_{R} \cdot \psi_{sd};$$

$$U_{rd} = i_{rd} \cdot R_{r} + \frac{d\psi_{rd}}{dt};$$

$$U_{rq} = i_{rq} \cdot R_{r} + \frac{d\psi_{rq}}{dt}.$$
(2.26)
(2.27)

Визначення всіх взаємозв'язків між струмом і потокозчепленням дає можливість встановити загальний вираз обертального моменту СД:

$$M = \frac{3}{2} \psi_s \cdot i_s \cos \varphi. \tag{2.28}$$

При цьому  $\varphi = \frac{\pi}{2} - \gamma$ , де  $\gamma$  - кут між векторами  $\overline{\psi}_s$  і  $\overline{i}_s$ . Тоді:  $M = \frac{3}{2} \psi_s \cdot i_s \sin \gamma.$ (2.29)

Вирази (2.29) являє собою векторний добуток  $\overline{\psi}_s$  і  $\overline{i}_s$ . Таким чином, обертальний момент, діючий на ротор, описується вектором

$$\overline{M} = \frac{3}{2} \overline{\psi}_s \times \overline{i}_s. \tag{2.30}$$

Вираз (2.30) вірний в будь-якій системі координат, тому підставляючи в нього  $\overline{\psi}_s$  і  $\overline{i}_s$  в системі координат ротора, отримаємо:

$$\overline{M} = \frac{3}{2} \overline{\psi}_{sl} \times \overline{i}_{sl}.$$
(2.31)

або в осях d, q

$$\overline{M} = \frac{3}{2} \left( \psi_d + j \psi_q \right) \times \left( i_d + j i_q \right).$$
(2.32)

Вираз (2.32) можна представити у вигляді матриці

$$\overline{M} = \frac{3}{2} \begin{vmatrix} \overline{n} & \overline{j} & \overline{m} \\ \psi_{d} & \psi_{q} & 0 \\ i_{d} & i_{q} & 0 \end{vmatrix},$$
(2.33)

де  $\overline{n}$  - одиничний вектор по дійсній осі d;

 $\overline{j}$  - одиничний вектор по уявній осі q;

 $\overline{m}$  - одиничний вектор по осі валу перпендикулярно площині з d - q.

Модуль вектору крутного моменту в осях d, q:

$$M = \frac{3}{2} (\psi_{d} i_{q} - \psi_{q} i_{d}).$$
 (2.34)

Представлені співвідношення є базою для подальших дослідженнь і математичного опису процесів в СД.

## 2.2. Вибір та обгрунтування математичного апарата для аналізу режимів роботи синхронного електропривода

### 2.2.1 Загальні положення

Враховуючи два типи СД – явнополюсні та неявнополюсні, процеси описуються простіше в варіанті неявнополюсних типів. Схема заміщення неявнополюсної синхронної машини показана на рис. 2.4 [17].



Рисунок 2.4 – Схема заміщення неявнополюсної синхронної машини *I<sub>rs</sub>* - діюче значення змінного струму ротора, зведене до обмотки статора (для спрощення другий індекс виключено), прямо пропорційно до значення діючого постійного струму збудження;  $I_{s} = I_{ss}$  - діюче значення змінного струму обмотки статора (для спрощення другий індекс виключено);

 $\overline{I}_{\mu} = \overline{I}_{s} + \overline{I}_{r}$  відповідно до першого закону Кірхгофа (2.35)

$$\sum_{k=1}^{n} i_k = 0 \tag{2.35}$$

Згідно до другого закону Кірхгофа, нехтуючи R,

$$\overline{U}_s = jx_{sl}\overline{I}_s + jx_{\mu}\overline{I}_{\mu}, \qquad (2.36)$$

Де  $x_{Sl} = \omega_S L_{Sl}, x_\mu = \omega_S L_\mu$ .

Якщо підставити (2.35) до (2.36):  $\overline{U}_{s} = j(x_{sl} + x_{\mu})\overline{I}_{s} + jx_{\mu}\overline{I}_{r}$ .

Та враховуючи, що  $x_{Sl} + x_{\mu} = x_d$ ,

то отримаємо:

$$\overline{U}_s = jx_d \overline{I}_s + jx_u \overline{I}_r. \tag{2.37}$$

Індуктивний опір *x<sub>d</sub>* називають синхронним, що відповідає сумарній дії головного потоку й потоку розсіювання статора СД.

Позначаючи  $jx_{\mu}\overline{I}_{r} = \overline{E}_{s}$ , з (2.37) отримаємо:

$$\overline{E}_s = \overline{U}_s - jx_d \overline{I}_s, \qquad (2.38)$$

Це – ЕРС обмотки статора, що індукована струмом збудження ротора і відповідає напрузі на затискачах статора, відключеного від мережі СД, при збудженні струмом  $\bar{I}_r$  й при синхронній частоті обертання  $\omega_s$ . На підставі (2.38) отримана схема заміщення, рис. 2.5.



Рисунок 2.5 – Схема заміщення

Вираз (2.38) визначає м'яку зовнішню характеристику синхронної машини, рис. 2.6.



Рисунок 2.6 – Зовнішня характеристика синхронної машини

Найяскравіше м'яка зовнішня характеристика проявляє себе при збудженні СД від генератора постійного струму, коли у ланці ротора діє сумарна індуктивність збуджувача та обмотки збудження плюс низька швидкодія системи збудження генератора – збуджувача.

Через м'яку зовнішню характеристику в електроприводах з різкими змінами (відладка) навантаження має місце підвищення напруги високовольтної живлячої мережі. Звідси прагнення використовувати швидкодіючі системи збудження СД на базі напівпровідникових перетворювачів [17], [39]-[42].

### 2.2.2 Аналіз процесів при пуску синхронних електродвигунів

У якості пускових пристроїв СД як правило застосовуються – генератори постійного струму, котрі розташовуються на одному валу з двигуном. Проте, динамічні характеристики системи зовнішнього пуску є незадовільні по факту перш за все, - малої швидкодії перехідних процесів. Крім того, на практиці така система громіздка та має малу надійність через наявність щітково-колекторного вузла в генераторі постійного струму.

У ряді інших випадків застосовують асинхронний пуск синхронної машини: прямий, реакторний або трансформаторний. При цьому має місце ускладнення конструкції ротора, де вбудовують пускову (короткозамкнену обмотку на прикладі асинхронного двигуна). Ця обмотка в перехідних процесах виконує також роль демпферної, що згладжує коливання обмотка перехідних струмів. При цьому збудження СД також використовується при пуску, для чого до неї підключають на цей час зовнішній резистор RR. Такий спосіб захищає обмотку збудження також від надвисокої напруги при процесі пуску. Величину опору зовнішнього резистора приймають на порядок більше активного опору обмотки збудження,  $R_R >> R_r$ , та регулюють в функції кута навантаження  $\theta_R$ , що рівний до кута між векторами магнітних полів статора й ротора. Таким же чином керують формою та величиною напруги збудження СД [27]-[29].

Проте вищенаведені заходи не дають можливості ліквідувати основний недолік асинхронного пуску - наявність 5 – 10 кратного пускового струму. Це вагома проблема тим паче, що згідно технічних умов на СД, [30], [31] вони мають обмеження по нагріву пускової обмотки та розраховані на один пуск з гарячого стану або 2 пуски з холодного стану з інтервалом у декілька хвилин. У разі зриву пуску наступний можливий після повного охолодження, а це значний проміжок часу котрого згідно умов безпеки бракує для умов таких комплексів як вентилятори головного провітрювання шахт.

Необхідно також враховувати ті обставини, що підвищення пускових струмів супроводжується зниженням напруги на спільних шинах живлячої високовольтної мережі та негативно позначається на роботі паралельно функціонуючих споживачів.

Більш того, при асинхронному пуску явнополюсної синхронної машини має місце і наступна аномалія. При  $\omega_r - 0 < \frac{\omega_s}{2} (S > 0, 5 + 0, 0)$ 

спостерігається збільшення моменту, а при  $\omega_r + 0 < \frac{\omega_s}{2} (S > 0, 5 - 0, 0)$  зменшення в порівнянні з нормальною характеристикою, рис. 2.7.





Явище пояснюється несиметрією ротора по осям *d* та *q*. З теорії електричних машин, [20] відомо, що струм статора:

$$\overline{i}_{s} = U_{s} \left[ \frac{\overline{Y}_{d} + \overline{Y}_{q}}{2} \exp j\theta_{s} + \frac{\overline{Y}_{d} - \overline{Y}_{q}}{2} \exp(1 - 2S) j\theta_{s} \right], \qquad (2.39)$$

де  $\overline{Y}$  - провідність схем заміщення;

 $\overline{Y}$  - суміжні вектори з  $\overline{Y}$ ; якщо  $\overline{Y} = Y \cdot \exp j\theta$ , то  $\overline{Y} = Y \cdot \exp(-j\theta)$ .

Перша складова  $\overline{i}_s$  у рівнянні (2.39) – це вектор змінного струму, що обертається у прямому напряму з частотою  $\omega_s$ . Друга складова  $\overline{i}_s$  у рівнянні (2.39) – це вектор змінного струму, що обертається у зворотному напрямі з частотою

$$(1-2S)\omega_{s} = \omega_{s} - 2 \cdot \frac{\omega_{s} - \omega_{r}}{\omega_{s}} \cdot \omega_{s} = (-\omega_{s} + 2\omega_{R}). \qquad (2.40)$$

Складові струму  $\overline{i_s}$  створюють моменти:

- перша складова створює додатній (що обертає ротор у прямому напрямі) момент;
- друга складова діє двояко, при S > 0,5 її частота обертання  $(1-2S)\omega_s < 0$ , момент діє на статор у зворотному напрямі. Отже, діэ на ротор у прямому напрямку збільшуючи основний додатній обертовий

момент. При *S* < 0,5 навпаки, - друга складова моменту віднімається від основного моменту.

Додатковий (від'ємний) момент, що створюється зворотною складовою струму в роторі

$$m_{_{MAKC}} \le (1, 3 - 2, 7) \frac{3U_s^2}{\omega_s} \cdot \frac{\left| \overline{Y_d} - \overline{Y_q} \right|^2}{\left| \overline{Y_d} + \overline{Y_q} \right|^2},$$
(2.41)

Описане явище повинно бути зведене до нуля за для запобігання зриву процесу розгону СД при розробці перспективної системи пуска.

### 2.2.3. Процес входження в синхронізм синхронних електродвигунів

Асинхронний момент СД у загальному виді визначається виразом [13], [58] (2.30):

$$\overline{M} = \frac{3}{2}\overline{\psi}_{s} \times \overline{i}_{s} = \frac{3}{2}I_{m}\left[\hat{\psi}_{s} \cdot \overline{i}_{s}\right],$$

де  $\overline{\psi}_s = \frac{\overline{U}_s}{j\omega_s} = \frac{U_s}{j\omega_s} \exp j\theta_s$ , а вектор струму  $\overline{i}_s$  визначається виразом (2.39).

Підставляючи до рівняння (2.30) значення  $\bar{\psi}_s$  та  $\bar{i}_s$  знаходимо:

$$\bar{M} = \frac{3}{2} \cdot \frac{U_s^2}{\omega_s} \cdot I_m \left[ \frac{\exp(-j\theta_s)}{-j} \cdot \left( \frac{\bar{Y}_d + \bar{Y}_q}{2} \cdot \exp j\theta_s + \frac{\hat{Y}_d - \hat{Y}_q}{2} \cdot \exp(1 - 2S) j\theta_s \right) \right],$$

звідкіля миттєве значення моменту

$$M = \frac{3}{2} \cdot \frac{U_s^2}{\omega_s} \cdot \mathbf{R}_e \left[ \frac{\overline{Y}_d + \overline{Y}_q}{2} + \frac{\overline{Y}_d - \overline{Y}_q}{2} \cdot \exp(-2Sj\theta_s) \right].$$
(2.42)

Перша складова моменту  $M_A$  - обертовий асинхронний момент, а друга  $M_p$  - момент пульсації з частотою  $2S\omega_s$ .

На підсинхронній швидкості обертання СД  $n_s \ge 0.95n_s$  ( $\underline{S} \le 0.05$ ) вимикають від обмотки збудження зовнішній резистор *RR*, та подають на неї напругу. В результаті виникає струм збудження  $\overline{I}_r$  та EPC  $\overline{E}_s = jx_{\mu}\overline{I}_r$  (2.37, 2.38). Взаємодія  $U_s$  та  $E_s = |\overline{E}_s| = |jx_{\mu}\overline{I}_r|$  створює синхронізуючий електромагнітний момент:

$$M = -3 \cdot \frac{U_s \cdot E_s}{\omega_s \cdot x_d} \cdot \sin \delta = -M_m \cdot \sin \delta.$$
(2.43)

де  $\delta$  - кут навантаження між векторами  $\bar{U}_s$  та  $\bar{E}_s$ .

В сумі на ротор СД на підсинхронній швидкості діють моменти супротиву під якими розуміють постійну величину,  $M_B = const$ , так як швидкість обертання майже постійна. Пульсуючий момент  $M_p$  малий, так як є незначне ковзання, тому ним нехтують. Асинхронний момент СД має вигляд:

- обертовий асинхронний момент *M*<sub>*A*</sub>:

$$M_A = M_m \cdot \frac{S}{S_m},\tag{2.44}$$

так як  $M_A \equiv S$  при малому ковзанні.

В результаті рівняння матиме вигляд:

$$J \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = M_A + M_S - M_B = M_m \cdot \frac{S}{S_m} - M_m \cdot \sin \delta - M_B, \qquad (2.45)$$

де  $M_{B}$  - гальмівний момент супротиву на валу;

*M<sub>s</sub>* - синхронізуючий (втягуючий) момент;

J - момент інерції;

р - число пар полюсів;

S<sub>m</sub> - максимальне ковзання.

Вважаючи

$$\frac{M_B}{M_m} = m \tag{2.46}$$

$$A = \frac{J \cdot S_m^2 \cdot \omega_s^2}{pM_m} \tag{2.47}$$

Перетворюючи (2.45) в (2.48) отримаємо:

$$A = \frac{SdS}{S_m^2 d\delta} = \frac{S}{S_m} - \sin \delta - m, \qquad (2.48)$$

Це рівняння не має аналітичного рішення. Для пошуку шляхів вирішення цієї задачі ряд дослідників використовують графічні методи рішення, або користуються граничною кривою (рис. 2.8).

Якщо при заданих значеннях *m* та *A* визначена точка знаходиться під кривою, то СД не входить в синхронізм і ротор обертається з малим ковзанням.



Рисунок 2.8 – Гранична крива втягування в синхронізм синхронного електродвигуна

Таким чином, чим більша частота обертання СД в області підсинхронної швидкості, до якої є змога її розігнати у асинхронному режимі, тобто чим менше ковзання, тим кращими будуть умови входження двигуна в синхронізм. Звичайно, чим менше навантаження, тим більш високу частоту обертів можливо досягти, а значить прискориди процес входження в синхронізму.

Як зазначено вище надійне входження в синхронізм виконується за умови  $\underline{S} \le 0,05$ . Максимальне значення ковзання, менш за яку все ще можлива синхронізація, розраховується за формулою:

$$S_{\scriptscriptstyle MAKC} \le \frac{243}{n_{\scriptscriptstyle S}} \sqrt{\frac{P_{\scriptscriptstyle EM}}{\left(GD^2\right) \cdot f_{\scriptscriptstyle S}}},\tag{2.49}$$

де *n<sub>s</sub>* - синхронна швидкість, об/хв;

*P*<sub>*EM*</sub> - електромагнітна потужність за даного струму збудження, кВТ;

 $GD^2$  - маховий момент, кг·м<sup>2</sup>;

*f*<sub>s</sub> - синхронна частота.

Згідно (2.49) повинен розбудовуватись алгоритм функціонування системи збудження СД.

## 2.2.4. Аналіз процесів при самозапуску синхронних електродвигунів

Самозапуск СД є одним з можливих способів пуску цих видів електродвигунів. По факту такий спосіб близький до процесу к.з. в двигуні [15], [32]. Логічно, що при такому варіанті виникає побічний процес в живлячій мережі – зниження до недопустимих рівнів напруги та всплеск рівня струму, - з'являються так звані ударні струми [15], [32]. В умовах промислових підприємств, а таких як гірничі особливо такий процес недопустимий.

Проаналізуємо ці процеси, але як початковий варіант розглянемо режим безударних струмів [15], [32].

При просадці живлячої напруги знижується обертовий момент СД, при цьому змінюється момент супротиву та частота обертання двигуна, що "перекиданню" загрожує та гальмуванню двигуна. В випадках здійснюють короткочасного порушення живлення процес фіксації збудження. Для цього необхідний контроль електромагнітного моменту двигуна за фазними струмами та напругам по відповідним датчикам згідно виразів (2.50):

$$M = \psi_{A} \cdot i_{B} - \psi_{B} \cdot i_{A};$$

$$\psi_{A} = \int_{0}^{t} (u_{A} - R_{S} \cdot i_{A}) dt$$

$$\psi_{B} = \int_{0}^{t} (u_{B} - R_{S} \cdot i_{B}) dt$$

$$(2.50)$$

٦

При зростанні електромагнітного моменту через підвищення струмів формують збудження СД, що забезпечує його електродинамічну стійкість, утримуючи двигун у синхронізмі. Інакше, якщо електромагнітний момент знижуються, то двигун вимикають від живильної мережі та переводять в режим гасіння поля. Аналогічно роблять при значному зниженні живлячої напруги менш ніж 0,5 – 0,6 від номінального. Процес гасіння поля СД є необхідною процедурою, адже після відновлення живлення двигуна від мережі можливий повторний його пуск. Цей процес має бути виконаний при розбудженій машині. При розгоні збудженого СД наведеться ЕРС у статорних обмотках, під дією якої до мережі будуть надходити струми і, як результат виникне гальмівний момент, тому такий запуск не є доцільним.

В той же час, при відновленні живлення СД, якщо двигун не відключено від мережі, можливе відновлення його нормальної роботи шляхом самозапуску. Умовою для успішного самозапуску є несуттєве відхилення частоти обертання двигуна від синхронної, що аналогічно до явища входження у синхронізм. При цьому критичний рівень напруги, нижче якого виконується вихід двигуна із синхронізму описується рівнянням

$$U_{\kappa p} = \frac{K_{3} \cdot P_{H} \cdot x_{d}}{E_{s}}, \qquad (2.51)$$

де К<sub>3</sub> - коефіцієнт навантаження;

Р<sub>н</sub> - номінальна потужність;

*x*<sub>*d*</sub> - синхронний опір в сталому режимі;

 $E_s$  - epc.

На рис. 2.9 у якості прикладу наведено залежність критичного рівня напруги живлення від завантаженості СД середньої потужності (6 кВ).



Рисунок 2.9 – Залежність критичного рівня напруги живлення від завантаження синхронного двигуна

На практиці час критичного порушення живлення, це максимально допустимий час, за який не виникне порушення технологічного процесу і приймається в інтервалі t = 3-5c.

Процес самозапуска також можливий для СД, який випав із синхронізму, при відновленні напруги живлення, коли струм збудження менше половини від номінального, тобто коли машина підзбуджена, і частота обертання за час *t<sub>sn</sub>* лежить в межах допустимого низького рівня.

### 2.2.5. Процеси при короткому замиканні в живлячій мережі

При віддаленому короткому замиканні в межах мережі живлення синхронного електропривода [15], [18] приймають заходи аналогічні до просадки напруги в мережі, а саме, форсування збудження при остаточній напрузі на клемах статора  $U_{so} = (0,8-0,85)U_{s_{max}}$  упродовж  $t_0 = (20-50)c$ , а при  $U_{so} = 0.4U_{s_{max}}$  упродовж  $t_0 = (0,2-0,3)c$ . Для збереження електродинамічної стійкості СД двигуна час дії формування визначають в залежності від рівня остаточної напруги з урахуванням знаку електромагнітного моменту (2.50). При аналізі цих процесів усі три фази статора СД приймають замкнутими накоротко,  $\overline{U}_s = 0$ . Тоді з (2.37) отримаємо  $x_d \cdot \overline{I}_s = -x_\mu \cdot \overline{I}_r$ 

$$\overline{I}_{s} = -\frac{x_{\mu}}{x_{d}} \cdot \overline{I}_{r} = \overline{I}_{K}, \qquad (2.52)$$

Допускаючи  $x_{\mu} \approx x_{d}$  та нехтуючи розсіюванням  $x_{Sl}$ , у усталеному режимі без негативних наслідків в кінцевому розрахунку визначимо:

$$\overline{I}_s = \overline{I}_K \approx -\overline{I}_r. \tag{2.53}$$

Між тим треба розуміти та враховувати, що в разі раптового короткого замикання виникають ударні струми в обмотках статора та ротора.

Ударний струм ротора зменшується за законом (2.53) до свого початкового значення:

$$\exp\left(\frac{x_{Kr}}{R_{\Sigma r}}\right).$$
 (2.54)

При короткому замиканні перехідний процес визначається перехідним індуктивним опором:

$$\dot{x_d} = x_d - \frac{x_\mu^2}{x_r},$$
 (2.55)

Або

$$\dot{x_{d}} = x_{Sl} + \frac{x_{\mu} \cdot x_{rl}}{x_{\mu} + x_{rl}},$$
(2.56)

Виходячи з схеми заміщення (рис. 2.10) в нехтуванні активними опорами:

Усталений струм короткого замикання в роторі:



Рисунок 2.10 – Схема заміщення синхронного двигуна при нехтуванні активними опорами

При прохідному короткому замиканні відновлюються напруга живлення на статорі  $\overline{U}_s$ . Струм в роторі від  $\overline{I}_r$  по ехр спадає по ехр до першочергового значення  $\overline{I}_m$ .

З сказаного постає необхідність уведення до ланки ротора СД зовнішнього активного опору *RR* задля прискореного зменшення струму короткого замикання та обмеження його амплітуди (2.53), де

$$R_{\Sigma r} = R_r + R_R^{3}$$
 (2.58)

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Примітка: в випадках двохфазового та однофазового короткого замиканнія в живлячій мережі значення струмів короткого замикання менші, за трьохфазні.

#### 2.2.6. Аналіз процесу гасіння поля в синхронному двигуні

Система збудження СД, котрі знайшли своє масове застосування та, використовується в сьогоденні, мають, як правило, керований тиристорний випрямляч та зовнішній резистор [12], [17]. Процес гасіння поля, як обов'язкова необхідність таких систем, відбувається за рахунок переводу керованого випрямляча у режим інвертора, або ж підключенням зовнішнього резистора до обмотки збудження. Для порівняння варіантів розглянемо процеси, що відбуваються в них при інвертуванні та резисторному гасінні відповідно.

Процес гасіння поля інвертуванням описуються як:

$$L_r \cdot \frac{di_r}{dt} + R_r \cdot i_r = -K_s \cdot K_U \cdot U_{r_{\text{max}}}$$
(2.59)

3 урахуванням  $U_{r_{\text{ном}}} = R_r \cdot I_{r_{\text{ном}}}$ 

 $U_{r}$ ,  $I_{r}$  - напруга та струм обмоток збудження;

*R*<sub>*r*</sub> - активний опір обмотки збудження;

*R*<sub>*R*</sub> - активний опір зовнішнього резистора;

*L<sub>r</sub>* - зведена індуктивність обмотки збудження з урахуванням індуктивності статорної ланки;

*U*<sub>*U*</sub> - напруга інвертування;

 $U_s$  - напруга мережі високовольтного живлення;

I<sub>rf</sub> - струм збудження в кінці періоду гасіння;

 $K_U = \frac{U_U}{U_{r_{\text{ном}}}}$  - кратність напруги інвертування;  $K_S = \frac{U_S}{U_{S_{\text{ном}}}}$  - коефіцієнт зниження напруги мережі.

$$T_r \cdot \frac{di_r}{dt} + i_r = -K_s \cdot K_U \cdot I_{r_{\text{max}}}, \qquad (2.60)$$

де  $T_r = \frac{L_r}{R_r}$  - постійна часу гасіння поля.

Вирішуючи (2.59) за початкових умовах  $i_r(0) = I_{r_{nos}}$ :

$$i_r = I_{r_{\text{max}}} \left[ -K_s \cdot K_U + \left(1 + K_s \cdot K_U\right) \exp\left(-\frac{t}{T_r}\right) \right].$$
(2.61)

Час  $t_U$  зменшення струму  $i_r$  до  $I_{rf}$  знаходять з (2.61):

$$t_U = T_r \cdot \ln \frac{K_s \cdot K_U + 1}{K_s \cdot K_U + K_i}.$$
(2.62)

 $K_i = \frac{I_{rf}}{Ir_{HOM}}$  - кратність струму збудження в кінці періоду гасіння поля.

Процес резисторного гасіння поля визначиться:

$$L_r \cdot \frac{di_r}{dt} + \left(R_r + R_R\right) = 0.$$
(2.63)

Рішення з урахуванням (2.61):

$$i_r = I_{r_{\text{HAM}}} \exp\left(\frac{-K_{\Sigma r}}{T_r}t\right).$$
(2.64)

 $K_{R} = \frac{R_{R}}{R_{r}}$  - кратність опору зовнішнього розрядного резистора, де  $K_{\Sigma r} = K_{R} + 1.$  З формули (2.64) знаходять час зменшення струму  $i_{r}$  до  $I_{rf}$ , розсуджуючи  $T_{R_{\Sigma}} = \frac{L_{r}}{R_{R} + R_{r}}$ :

$$t_{R} = \frac{T_{r}}{K_{\Sigma r}} \cdot \ln \frac{1}{K_{i}} = T_{R\Sigma} \ln \frac{1}{K_{i}}.$$
 (2.65)

Співвідношення часу гасіння знайдемо за рахунок ділення (2.62) та (2.64):

$$\frac{t_U}{t_R} = \frac{T_r}{T_{R\Sigma}} \cdot \frac{\ln \frac{K_S \cdot K_U + 1}{K_S \cdot K_U + K_i}}{\ln \frac{1}{K_i}}.$$
(2.66)

Якщо права частина (2.66) менша за одиницю, то можливе гасіння поля інвертуванням керованого тиристорного випрямляча, живлячого обмотку збудження синхронного двигуна від допоміжної мережі напруги. При цьому необхідно мати гарантію, що допоміжна мережа здатна до сприймати інвертовану (рекупераційну) потужність. З цієї точки зору резисторне гасіння поля надійніше. Більш того, при резисторному гасінні поля час зменшення струму збудження регулюється шляхом підбору величини супротиву зовнішнього резистора, котрий необхідно узгодити та поєднати з пусковим резистором ланки збудження синхронної машини.

## 2.2.7 Вибір способу оптимального регулювання процесу пуску синхронного електродвигуна

Використання обмотки збудження для процесу пуску та розгону СД робить його схожим на асинхронні типи двигунів. Тому для аналізу електромагнітних процесів в СД доцільно застосовувати закони частотного регулювання аналогічні до прийнятих в асинхронних двигунах [35]. В першу чергу, це відноситься, до закону регулювання:

$$\frac{U_s}{f_s} = const, \tag{2.67}$$

який дієвий у діапазоні середніх та високих частот [35]. Проте, на низьких частотах позначається вплив активного опору обмоток статора машини на процес регулювання, що проявляється як збільшення напруги прикладеної до активного опору та зменшенню напруги, який йде на створення електромагнітного потоку.

Внаслідок цього потік знижується, і відповідно знижується момент двигуна. Для компенсації падіння напруги на активному опорі обмотки статора на низьких частотах формують як факт підвищення напруги, що прикладається до двигуна, чим і наближається процес регулювання до ідеального

$$\frac{E_s}{f_s} = const,$$
(2.68)

адже ЕРС

$$E_s = K_K \cdot f_s \cdot \Phi_s, \tag{2.69}$$

де *K<sub>k</sub>* - конструктивний коефіцієнт, а потік повинен бути постійним щодо повітряного зазору для ефективного використання двигуна (рис. 2.11).



Рисунок 2.11 – Характеристика частотного керування синхронним електродвигуном

Як стверджують ряд дослідників, перевагою частотного керування СД є можливість обмежити електромагнітний момент на валу двигуна на рівні номінального його значення. Дійсно, відповідно до (2.28)  $M = \frac{3}{2}\psi_s \cdot i_s \cdot \cos \varphi$ . Тоді при  $\psi_s = const$ , як визначено (2.33) та (2.34), для забезпечення M = const, необхідно підтримувати активний поті двигуна згідно  $i_s \cdot \cos \varphi = const$ .

Детальний розгляд залежності моменту від параметрів керування синхронної машини дає наступні результати.

Рівняння обертового моменту СД у загальному випадку має вигляд

$$M = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_{\mu}}{L_{r} \cdot L_{s}} \overline{\psi}_{r} \times \overline{\psi}_{s} = \frac{L_{\mu}}{L_{s} \cdot L_{r}} [\overline{\psi}_{r} \times \overline{\psi}_{s}], \qquad (2.70)$$

де перехідні індуктивності

$$\dot{L}_{s} = L_{sl} + L_{rl}, \qquad (2.71)$$

$$L_{r} = L_{r} - \frac{L_{\mu}^{2}}{L_{s}} = L_{rl} + \frac{L_{sl} \cdot L_{\mu}}{L_{sl} + L_{\mu}}.$$
(2.72)
Потокозчеплення  $\bar{\psi}_s$  и  $\bar{\psi}_r$  визначають виходячи з повної схеми заміщення двигуна, в усталеному режимі системи координат статора [11], [13] (рис. 2.12). При цьому  $\bar{U}_s, \bar{I}_s, \bar{\psi}_s, \bar{\psi}_r$  постійні по величині.



Рисунок 2.12 – Повна схема заміщення синхронного двигуна

$$\overline{U}_{s} = \overline{I}_{s} \cdot R_{s} + j\omega_{s}\overline{\psi}_{s},$$

$$0 = \overline{I}_{r} \cdot \frac{R_{\Sigma}}{s} + j\omega_{s}\overline{\psi}_{r},$$

$$(2.73)$$

де

$$\begin{aligned} &\omega_{S}\overline{\psi}_{S}=\overline{I}_{S}\cdot x_{Sl}+\overline{I}_{\mu}\cdot x_{\mu}\\ &\omega_{S}\overline{\psi}_{r}=\overline{I}_{r}\cdot x_{rl}+\overline{I}_{\mu}\cdot x_{\mu} \end{aligned} \right\},$$

$$(2.74)$$

Тут  $\bar{I}_{\mu} \cdot x_{\mu} = (\bar{I}_{s} + \bar{I}_{r})x_{\mu}$  - головне потокозчеплення;  $R_{r} + R_{R} = R_{\Sigma}$ . З (2.70) за допущенням  $R_{s} \approx 0$  з похибкою  $\approx 1\%$  знаходять

$$\bar{\psi}_{s} = \frac{\bar{U}_{s}}{j\omega_{s}},\tag{2.75}$$

Також

$$\bar{\psi}_r = -\bar{I}_r \frac{R_{\Sigma}}{j\omega_s S},\tag{2.76}$$

Приймаючи граничне ковзання

$$S_{\Sigma} = \frac{R_{\Sigma}}{\omega_{S}L_{r}} = \frac{R_{\Sigma}}{x_{r}}, \qquad (2.77)$$

де L<sub>r</sub> зумовлене рівнянням (2.72), з виразу (2.77) отримаємо:

$$\bar{\psi}_r = \frac{L_\mu}{L_s} \cdot \frac{\bar{U}_s}{j\omega_s} \cdot \frac{S_{\Sigma}}{S_{\Sigma} + jS}, \qquad (2.78)$$

Таким чином, повертаючись до (2.33), отримаємо:

$$M = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_{\mu}}{L_{s} \cdot \dot{L_{r}}} \left[ \bar{\psi}_{r} \times \bar{\psi}_{s} \right] = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_{\mu}}{L_{s} \cdot \dot{L_{r}}} \cdot R_{e} \left\{ j \bar{\psi}_{r} \cdot \bar{\psi}_{s} \right\}, \qquad (2.79)$$

враховуючі, що векторний добуток

 $\overline{a} \times \overline{b} = R_e \left\{ j \overline{a} \overline{b} \right\}$ , де  $\overline{b}$  - спряжений вектор, та оскільки вектори  $\overline{\psi}_s$  та  $\overline{\psi}_r$  постійні величини, то миттєві значення обертового моменту теж будуть постійною величиною

$$M = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_{\mu}}{L_{s} \cdot L_{r}} \cdot R_{e} \left\{ j \frac{L_{\mu}}{L_{s}} \cdot \frac{\overline{U}_{s}}{j\omega_{s}} \cdot \frac{S_{\Sigma}}{S_{\Sigma} + jS} \cdot \frac{\overline{U}_{s}}{-j\omega_{s}} \right\},$$
(2.80)

 $\overline{U}_{s}\cdot \overline{U}_{s} = \overline{U}_{s}^{2}$  - дійсне число, то

$$M = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{L_{\mu}}{L_{s}}\right)^{2} \frac{1}{L_{r}} \cdot \left(\frac{U_{s}}{\omega_{s}}\right)^{2} R_{e} \left\{ j \frac{S_{K}}{S_{K} + jS} \right\} =$$

$$= \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{L_{\mu}}{L_{s}}\right)^{2} \frac{1}{L_{r}} \cdot \left(\frac{U_{s}}{\omega_{s}}\right)^{2} \cdot \frac{S_{\Sigma} \cdot S}{S_{\Sigma}^{2} + S^{2}}$$
(2.81)

Вираз (2.81) підтверджує необхідність дотримання закону частотного керування

$$\frac{U_s}{\omega_s} = const.$$
 (2.82)

Враховуючи співвідношення  $\frac{S_{\Sigma} \cdot S}{S_{\Sigma}^2 + S^2} \rightarrow \frac{S}{S_{\Sigma}}$  до виразу (2.81), адже  $S_{\Sigma}^2 \square S^2$ 

за частотного керування, отримаємо:

$$M = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{L_{\mu}}{L_{s}}\right)^{2} \cdot \frac{U_{s}}{\omega_{s}} \cdot \frac{U_{s}}{R_{\Sigma}} S.$$
(2.83)

Оскільки опір ланки збудження, зведеної до ланки статора  $\frac{R_{\Sigma}}{S}$   $R_s$ , тоді:

$$\frac{U_s}{R_{\Sigma}} S \approx I_s, \qquad (2.84)$$

це співвідношення також необхідно підтримувати постійним.

Оскільки у виразі (2.46)  $I_s = const$ ,  $U_s S = const$ , то  $R_{\Sigma} = const$ , що фактором при котрому зовнішній опір ланки обмотки збудження при частотному запуску не підлягає керуванню -  $R_R = const$ .

Згідно рекоментацій [8], величина опору зовнішнього резистора у ланці збудження при прямому пуску СД визначається як  $R_R \approx 10R_r$ . При цьому напруга на обмотці збудження не повинна перевищувати допустимого за класом ізоляції [8].

В той же час, оскільки при частотному пуску СД напруга, що наводиться у обмотці збудження, значно менше ніж в варіанті прямого пуску, то величина супротиву зовнішнього резистора може змінюватись у широких межах.

Таким чином, є можливість узгоджувати величини опорів резисторів пускового поля - та поля гасіння, і об'єднувати їх в єдиний комплекс.

В свою чергу, оскільки вираз (2.84) передбачає також керування СД по ковзанню *S*, але цей спосіб застосовують, в більшості своїй, в тяговому електроприводі, де потрібно забезпечувати стійкість при буксуванні, юзі і т.п. У загальнопромисловому електроприводі, що розглядається в даному досліджені, у такому способі регулюванні немає необхідності, що виключає необхідність установки датчика оборотів на валу СД.

### 2.3 Висновки до розділу 2

1. Розглянуто особливості ряду відомих способів пуску синхронних електродвигунів. Оцінено варіант асинхронного пуску та при цьому способі умови надійного втягування синхронного двигуна в синхронізм.

2. Розглянуто процеси впливу способів збудження СД на показники якості електричної енергії, в тому числі на зниженнія напруги живлення в живлячій мережі. Визначено умови регулювання збудження синхронної машини з урахуванням цього показника.

3. Розглянуто процеси в синхронному електроприводі при короткому замиканні у високовольтній мережі живлення, обґрунтовано застосування

резисторного гасіння поля для швидкого і надійного збудження синхронної машини.

4. Розглянуто електромагнітні процеси при частотному регулюванні синхронного електроприводу, рекомендовані до застосування закони сталості потокозчеплення, струму і моменту синхронної машини.

5. Обґрунтовано сталість опору зовнішнього пускового резистора в колі ротора при частотному пуску синхронної машини, розроблено рекомендації, щодо суміщення пускового опору та опору для гасіння поля.

6. Обґрунтовано вимога швидкодії системи збудження при різко змінному навантаженні синхронного двигуна.

7. Матеріал який викладений в розділі 2 є фундаментальними рекомендаціями що до подальших досліджень в розділах 3 та 4, для забезпечення глибини та якості вирішення наукового завдання, а саме формування енергоорієнтованих пускових характеристик синхронного двигуна електроприводу вентиляторів головного провітрювання шахт.

### РОЗДІЛ З АНАЛІЗ ТА ВИБІР БАЗОУТВОРЮЮЧИХ СИСТЕМ ПУСКУ І ЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ВЕНТИЛЯТОРІВ ГОЛОВНОГО ПРОВІТРЮВАННЯ

# 3.1. Обґрунтування вимог до систем пуску і збудження синхронних електродвигунів

Основні критерії вимог до систем пуску і збудження синхронних електродвигунів електроприводів полягає в наступному [12], [22], [55] :

- пуск повинен бути плавним без ударних моментів;

- пускові струми статора і ротора повинні бути не більше 1,5 номінального (паспортного) значень;

тривалість пуску синхронної машини повинна бути менше допустимої
 за технологією привідного механізму;

- забезпечення процесу надійного втягування машини в синхронізм;

- синхронна машина при пуску повинна бути розбудженою;

- при короткочасному просіданні напруги мережі живлення до 0,8 номінального значення повинна бути передбачено або форсування збудження (при зростанні моменту), або розбудження (при спаданні моменту);

- необхідність контролю максимального рівня струму і мінімального рівня напруги статора синхронного електродвигуна для виявлення короткого замикання в електромережі;

- забезпечення роботи електроприводу при зниженому рівні напруги живлення мережі і низьких (технологічно допустимих) оборотах привідного механізму, а також при номінальній напрузі мережі на проміжних позиціях частоти комутації, що задаються технологічним процесом;

- в разі потреби має бути передбачене прискорене гальмування привідного механізму за допомогою синхронного електроприводу.

Як свідчить аналіз [55] найбільше вищезазначеним вимогам відповідає система плавного частотного пуску за допомогою перетворювача частоти на

базі IGB транзисторного інвертора і система збудження синхронної машини на базі IGB транзисторного чопера.

При цьому зазначимо, що система синхронного електроприводу з IGB транзисторним перетворювачем частоти в цінових показниках сягає значних велин - однак, коли за технологією механізму потрібна плавна зміна моменту і швидкості обертання двигуна, їй альтернативи немає.

З матеріального боку системи квазичастотного пуску синхронного електроприводу тиристорними перетворювачами 3 чи то 3 (безпосереднім ціклоконвертором перетворювачем частоти), чи З фазорегулятор більш дешевші. Система з ціклоконвертором допускає тривалу роботу на проміжних позиціях 0,5; 0,3; 0,25 ... номінальной частоти вихідної напруги з дотриманням основного закону частотного регулювання: U/f = const.

У даній роботі в подальшому представлені результати виконаних досліджень згаданих систем синхронного електроприводу з напівпровідниковими перетворювачами частоти в колах статора синхронного електродвигуна, і аналітичне порівняння систем збудження синхронного електродвигуна.

## 3.2 Основні топології промислових перетворювачів середньої напруги

Для сучасних потужних синхроних електроприводів як правило використовуються багаторівневі перетворювачі напруги (табл. 3.1) [55]. Ці перетворювачі керують високим рівнем вихідної напруги з мінімальним спектром гармонік напруг та струмів.

На даний період часу існує значна за кількістю різноманітність топології перетворювачів електричної енергії для приводів середньої напруги

(ПСН). Для приводів малої і середньої потужності (наприклад, S = 300 кВА - 30 MBA) виробники електроприводів пропонують різні види і типи перетворювачів: дворівневі (2Р ПН) (наприклад, Alstom), три рівневі з фіксованою нейтральною точкою (3Р -ФНТ ПН) (наприклад, ABB, Alstom, Siemens), та інші.

Існують також перетворювачі напруги Н-мостів з послідовним підключенням (ППНМ ПН) (Robicon). Серед потужних багаторівневих перетворювачів успішно реалізовані в якості стандартних продуктів для промислових електроприводів середньої напруги: трирівневі перетворювачі напруги з фіксованою нейтральною точкою (ЗУ-ФНТ ПН) і перетворювачі напруги послідовного з'єднання Н-мостів (ППНМ ПН). Лідери з виробництв електроприводів середньої напруги використовують топологію ЗУ-ФНТ ПН наприклад: АВВ використовує цю топологію в своїх серіях ACS 1000 і ACS 6000, в діапазоні напруг 2,3 кВ, 4,16 кВ і вище, а Siemens використовує цю топологію з вихідними напругами від 2,3 кВ до 6,6 кВ і потужністю від 660 кВА до 9 МВА.

У топології ФНТ використовуються високовольтні IGCT модулі з відносно низькою частотою перемикання. Ця топологія має просту схему, але для роботи електричних двигунів потрібен великий індуктивно-ємнісний (LC) вихідний фільтр. У топології ППНМ використовуються IGBT модулі низької напруги (наприклад, IGBT 1700 В) з високою частотою перемикання. Зазвичай він складається з трьох-шести рівних Н-мостів на фазу, що призводить до формування сигналу вихідної напруги від семи до тринадцяти рівнів. Вхідний трансформатор живить кожен з Н-мостів через діодний випрямляч. Ця топологія має хороші показники форм струмів і вихідної напруги, однак вартість вхідного трансформатора і велика кількість напівпровідникових приладів з їх керуючим обладнанням є його недоліками [121], [123]. Таблица 3.1 – Промислові перетворювачі середньої напруги різноманітних топології.

Виробник	Тип	Потужність (MBA)	Напруг а (кВ)	Топологія	Напівпровіднико ві модулі	
Robicon	Perfect Harmony	0.3-31	2.3-13.8	ППНМ ПН	IGBT	
Siemens	Masterdr ive MV	0.66-9.1	2.3, 3.3, 4.16, 6, 6.6	ЗУ-ФНТ ПН	IGBT	
ABB	ACS 1000	0.3-5	2.3, 3.3, 4	ЗУ-ФНТ ПН	IGCT	
	ACS 5000	5.2-24	6, 6.6, 6.9	ППНМ ПН	IGCT	
	ACS 6000	3-27	3, 3.3	ЗУ-ФНТ ПН	IGCT	
Alstom	VDM 7000	7-9.5	3.3	ЗУ-ФНТ ПН	GTO	
General Electric	Dura- Bilt5 MV	0.3-2.4	4.16	ЗУ-ФНТ ПН	IGBT	
	MV-GP Type H	0.45-7.5	3.3, 4.16	ППНМ ПН	IGBT	

Проаналізувавши перетворювачі середньої напруги різних виробників можливо зробити висновок, що для умов шахтних стаціонарних установок, до яких як було зазначено раніше відносяться вентиляторів головного провітрювання найбільше підходить топологія ППНМ ПН.

## **3.3.** Аналіз систем синхронного електроприводу з IGB транзисторним перетворювачем частоти у ланці статора двигуна

### 3.3.1. Схема IGB транзисторного перетворювача частоти

В практиці високовольтних електроприводів як правило використовують схему наведену [93] на рис. 3.1.



Рисунок 3.1 – Багаторівневий IGB транзисторний перетворювач частоти *A*,*B*,*C* - фази високовольтної живлячої мережі; *T* – трансформатор; *U<sub>i</sub>* - перетворювальний блок; *α*,*β* - вихідні фази блоку;

Схема окремого перетворювального блоку  $U_i$  наведена на рис. 3.2.



Рисунок 3.2 - Принципова схема IGB транзисторного перетворювального блоку

*UD* - діодний випрямляч; *UI* - IGBT інвертор, однофазний міст; *C* – конденсатор-накопичувач.

Допоміжні та захисні елементи на рис. 3.2 невідображені для більшої наглядності при описі роботи блоку.

Додатну половину  $U_{\alpha}$  вихідної напруги формують IGBT *T1* і *T2*. Від'ємну напівхвилю  $U_{\beta}$  формує пара *T3*, *T4*. За широтно-імпульсною модуляцією додатний імпульс вихідної напруги створюється при включенні IGBT *T1* та *T2*. Струм перестає текти по ланці (+)  $\rightarrow$  *T*1  $\rightarrow \alpha ... \beta \rightarrow$  *T*2  $\rightarrow$  (-), рис. 3.3, а.

Нульова пауза створюється при відключенні одного з IGBT *T1* чи *T2*. На рис. 3.3, б у якості прикладу наведено відключення *T1*, а *T2* залишається увімкненим. Струм протікає по планці  $\beta \rightarrow T2 \rightarrow (-) \rightarrow \partial i o \partial T4 \rightarrow \alpha$ .



Рисунок 3.3 - Схеми провідності інвертора

Для рівномірного навантаження IGBT *T1* та *T2* виконуються «шимування» почергово через напівхвилю. Від'ємний імпульс напруги формується аналогічно IGBT *T3*, *T4*. Нульовий стан інвертора також створюється при наскрізному проведенні струму, що примусово задається зовні.

### 3.3.2. Формування оптимальної кривої вихідної напруги перетворювача

Інвертор за схемою однофазного містка дозволяє шляхом ШІМ формувати криву вихідної напруги любої конфігурації з яких більш за все використовується прямокутна, синусоїдальна, та трапецеїдальна форма [93], [94] рис. 3.4.

Розкладання прямокутної форми сигналу по рис. 3.4 в Ряд Фур'є має відомий вигляд [93]:

$$u = \frac{4}{\pi} U_d \left( \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \dots + \frac{1}{v} \sin v \omega t \right), \tag{3.1}$$

де v = 2K - 1, K = 1, 2, 3...; третя гармоніка 33%, п'ята гармоніка 20%;

 $U_{m1} = \frac{4}{\pi}U_d = 1,273U_d$  - амплітуда першої гармоніки;

 $\tilde{U}_1 = \frac{U_{m1}}{\sqrt{2}} = 0,9U_d$  - діюче значення першої гармоніки;

 $\tilde{U}_{\Sigma} = U_d$  - діюче значення повної кривої напруги;

 $K_{u} = \frac{\tilde{U}_{1}}{\tilde{U}_{\Sigma}} = 0.9$  - коефіцієнт спотворення;

$$K_d = \frac{U_{m1}}{U_d} = 1,273$$
 - коефіцієнт використання живлячої напруги.

На рис. 3.4, а приведена максимально можлива прямокутна крива напруги. Проміжне значення напруги від нуля до максимального значення формують шляхом ШІМ.

Прикладення прямокутної напруги [93] до двигуна викликає струм форма якого показана на рис. 3.4, а. Характерні особливості кривої струму є наявність пікового значення, яке більше за амплітуду першої гармоніки струму. Для ліквідації такого явища необхідно застосувати в інвенторному блоці IGBT більш високого за струмом класу [93]. Для ліквідації пікового значення струму у кінці напівхвилі напруги та для симетрії на початку наступної напівхвилі логічно застосовувати ШІМ напруги за лінійним законом рис. 3.4, б. Таким чином формуються всі необхідні критерії для формування трапецеподібної форми вихідної напруги.

В такому варіанті,  $\gamma = var$ , і розклад трапеції в Ряд Фур'є має вигляд:

$$u_{v} = \frac{4}{\pi} U_{d} \cdot \frac{\sin v\gamma}{v^{2}\gamma} \cdot \sin v\omega t ; \qquad (3.2)$$

де v = 2K - 1, K - 1, 2, 3...; третя гармоніка 33%, п'ята гармоніка 20%;

$$U_{m1} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sin \gamma}{\gamma} \cdot U_d$$
 - амплітуда першої гармоніки;

$$\begin{split} \tilde{U}_{1} &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\sin \gamma}{\gamma} \cdot U_{d} - \text{діюче значення першої гармоніки;} \\ \tilde{U}_{\Sigma} &= U_{d} \sqrt{1 - \frac{4\gamma}{3\pi}} - \text{діюче значення повної напруги;} \\ K_{u} &= \frac{2\sqrt{6}}{\sqrt{\pi (3\pi - 4\gamma)}} \cdot \frac{\sin \gamma}{\gamma} - \text{коефіцієнт спотворення;} \\ K_{d} &= \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sin \gamma}{\gamma} - \text{коефіцієнт використання живлячої напруги.} \\ &\text{Максимальне значення коефіцієнта спотворення } K_{u} \to 1,0 \text{ має місце при} \\ \gamma &= 62 \text{ електричних градусах. 3 практичних міркувань можна прийняти } \gamma = \frac{\pi}{3} \\ , \text{ тоді: } \end{split}$$

 $U_{m1} = 1,053U_d$  - амплітуда першої гармоніки;

 $\tilde{U}_1 = 0,745 U_d$  - діюче значення першої гармоніки;

 $\tilde{U}_{\Sigma} = 0,745 U_d$  - діюче значення повної кривої напруги;

 $K_u = 0,9989 = 1,0$  - коефіцієнт спотворення;

 $K_d = 1,053$  - коефіцієнт використання живлячої напруги.

При цьому, в самому оптимальному випадку, відсутня третя гармоніка вихідної напруги, а найбільша з високих - п'ята гармоніка, має діюче значення  $\tilde{U}_5 = 0.03 U_d$ .

Коефіцієнт гармоніки  $K_{\nu} = \frac{\tilde{U}_5}{\tilde{U}_1} = 0,04$ , що менше 0,06 дозволених за стандартом якості електроенергії.

Позитивними моментом трапецеїдальної форми кривої напруги є відсутність ШІМ на інтервалі [π/3 ... 2π/3] максимума вихідної напруги.

В той же час при формуванні інтегральної кривої напруги по синусоїдальному закону ШІМ напруги живлення  $U_d$ , на відміну від трапеції, як на максимумі так і на всьому діапазоні зміни напруги, необхідна модуляція. Амплітуда синусоїди, що змодельована з прямокутника  $U_d$ ,

становить  $U_{msin} \approx U_d$  (рис. 3.5), де період модуляції  $T_M = 1 / f_M$ . Точніше повинно бути

$$\int_{2-\omega T_M}^{\pi/2} U_{m \sin} \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t = 0,955 \cdot U_d \omega T_M .$$
(3.3)

Звідки  $U_{msin} = 0,955U_d$ . Тоді  $K_u = \frac{0,955}{\sqrt{2}} = 0,675$ .



Рисунок 3.4 - Максимальні криві вихідних напруги і струму однофазного моста інвертора: а) прямокутна форма напруги; б)трапецеїдальних форма напруги.



Рисунок 3.5 - Максимальні криві вихідних напруги і струму однофазного моста інвертора синусоїдальної форми напруги

Отримані результати зведені до таблиці 3.2.

Таблиця	3.	2
---------	----	---

			Τ
Форма напруги	$K_{u} = \frac{U_{1}}{U_{\Sigma}}$	$K_{d} = \frac{U_{m1}}{U_{d}}$	Особливості
Прямокутна	0,9	1,273	3 гармоніка 33%
			5 гармоніка 20%
			Наявність піку
			струму більшої
			амплітуди.
Трапецеїдальна	1,0	1,053	Коефіцієнт вищої
			гармоніки
			$K_{v} = \frac{U_{5}}{U_{1}} = 0,04 < 0,06$
			за стандартом, немає
			ШІМ на
			максимальній $U_{_d}$
Синусоїдальна	0,675	0,955	ШІМ впродовж всієї
			хвилі.

### 3.3.3. Керування блоками перетворювача частоти

У відомих схемотехнічних рішеннях [93] багаторівневих перетворювачів частоти для формування ШІМ вихідної напруги беруть участь усі блоки одночасно. Тому модуляція імпульсів блоків сумуються і на виході отримується амплітуда рівня  $nU_d$ .

Оскільки частота модуляції надто висока, то імпульси напруги статора СД практично безперешкодно, незалежно від швидкості обертання двигуна, трансформуються в коло ротора. Таким чином, в обмотці збудження наводяться імпульси значної, і навіть небезпечної величини. В такому варіанті, для боротьби з вищенаведеним явищем, необхідно встановлювати фільтри, тобто розв'язувати проблему електромагнітної сумісності СД для високовольтної та низьковольтної мереж.

Одним із прикладів схем фільтрів, котрі застосовуються є Г-образні види.

Розрахунок параметрів Г-образного LC-фільтру [83], який встановлюється на вході кожної з фаз (рис. 3.6), виконують наступним чином.



Рисунок 3.6 - Схема фільтра

Прийняті позначення: U<sub>1</sub> - напруга джерела високої частоти; U<sub>2</sub> - напруга навантаження;

коефіцієнт передачі:

$$K = \frac{U_2}{U_1} \tag{3.4}$$

затухання

$$b = \ln K \tag{3.5}$$

Прохідна полоса частот  $[0...\omega_c]$ , при b = 0; полоса частот підстановки  $\omega > \omega_c$ , при b > 0.

Характеристичний (хвильовий) опір:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{3.6}$$

частота зрізу

$$\omega_c = \frac{2}{\sqrt{LC}}.$$
(3.7)

Спільне рішення (3.6) і (3.7) дає

$$L = \frac{2\rho}{\omega_c},\tag{3.8}$$

$$C = \frac{2}{\rho\omega_c} \,. \tag{3.9}$$

З теорії чотирьохполюсників [24] для прийнятої схеми Г-образного фільтру, задане затухання пригніченої вищої гармоніки забезпечується на частоті

$$\omega_b = \omega_C \sqrt{1 + \frac{1}{K}} \,. \tag{3.10}$$

Розрахунок параметрів фільтра ведеться в наступному варіанті:

- 1. Задається "К" відповідно (3.4).
- 2. Знаходимо "b" відповідно (3.5).
- 3. Знаходимо  $\frac{\omega_b}{\omega_c}$  відповідно (3.10).
- 4.  $\omega_{\rm b} = \omega_{\rm M}$ ,  $\omega_{\rm M} = 2\pi f_{\rm M}$ , де  $f_{\rm M}$  частота модуляції.
- 5. Знаходимо  $\omega_{c}$  з (3.7).
- 6. Підберемо конденсатор та його ємність С.
- 7. Знаходимо *р* відповідно до (3.6).
- 8. Знаходимо L за (3.8).

У нашому випадку максимальна амплітуда високочастотної змінної складової напруги на виході перетворювача (за коефіцієнтом заповнення періоду модуляції q = 0,5) дорівнює

$$U_1 = \frac{n}{2} U_d \,. \tag{3.11}$$

Внаслідок високої напруги та необхідності глибокого затухання високочастотної складової фільтр формується потужним і громіздким. Ця проблема додатково відноситься до переліку проблем і яку, як і інші, необхідно вирішувати.

### 3.3.4. Спосіб почергового керування блоками перетворювача та схема підключення фільтра частоти модуляції

Сутність цього методу полягає у наступному. ШІМ напруги здійснюється з використанням тільки одного блоку перетворювача (рис. 3.1) [94] упродовж всього процесу, наприклад тільки U1. Він формує імпульси модуляції  $U_d$  таким чином, що інтегральна крива сумарної вихідної напруги перетворювача має форму трапеції. Максимальна амплітуда вихідної напруги  $U_{d\Sigma}$  поділяється на п ступенів за числом блоків, максимум кожної ступені  $U_d$ =  $U_{d\Sigma} / n$ . На першій ступені діє тільки один блок, всі інші знаходяться в нульовій позиції (наскрізна провідність). Перший блок регулює амплітуду вихідної напруги від 0 до  $U_d$  шляхом ШІМ (рис. 3.7, 3.8), дотримуючись закону частотного керування  $U_S / f_S = const$ , де  $U_S \approx U_{d\Sigma}$  - номінальне значення амплітуди фазної напруги двигуна;  $f_S = 1/T_S$  - номінальне значення частоти та напруги живлення двигуна. Тоді:

$$(i \cdot U_d) \left(\frac{nT_s}{i}\right) = const$$
. (3.12)

де i = 0...1 - рівень амплітуди проміжної напруги  $U_i = iU_d$ , що змінюється плавно від 0 до  $U_d$ , макс Ui=1=  $U_{i=1} = U_d$ .



Рисунок 3.7 - Інтегральна трапецеїдальна крива проміжної напруги на першій ступені модуляції



Рисунок 3.8 - Інтегральна трапецеїдальна крива максимальної напруги на першій ступені модуляції

Характерною особливістю кривої напруги у формі трапеції на максимумі є відсутність модуляції на інтервалі [ $\pi/3\omega_s$  ...  $2\pi/3\omega_s$ ], завдяки чому на третину понижується динамічні втрати у IGBT інвертора.





Рисунок 3.9 - Інтегральні криві проміжної напруги на другій ступені модуляції

Рисунок 3.10 - Інтегральні криві максимальної напруги на другій ступені модуляції

Подальше нарощування рівня вихідної напруги на другій ступені молуляції відбувається введенням у роботу другого блоку, наприклад *U2*, усі інші, залишаються в нульовій позиції. Другий блок, в свою чергу, створює

напругу прямокутної повної форми без ШІМ з амплітудою  $U_d$ , а перший блок шляхом ШІМ регулює сумарну вихідну напругу від  $U_d$  і до  $2U_d$ , що доповнює криву до трапеції (рис. 3.9, 3.10). На рисунках для спрощення розуміння імпульси модуляції не показані, а наведені лише інтегральні криві.

Тут l=1,2,3,...,n в загальному випадку число задіяних блоків. На рис. 3.9 і 3.10 - l = 2.

Оскільки другий інвертор формує повну прямокутну криву напруги без ШІМ динамічні втрати від модуляції ІGBT в ньому відсутні, що є значним позитивом цього способу.

Подальше збільшення вихідної напруги перетворювача частоти відбувається шляхом введення почергово в роботу наступних блоків, котрі формують напругу прямокутної форми. Таким чином, при формуванні максимальної вихідної напруги динамічні втрати в IGBT будуть в n-разів менше ніж в стандартній схемі перетворювача.

Для вирішення задачі рівномірного навантаження IGBT багаторівневого перетворювача це, циклічне введення блоків у роботу - почергового формування напівхвилі вихідної напруги. Так на другій ступені передбачається наступний цикл

Перша напівхвиля: 1.2.

Друга напів хвиля: 1.3.

Третя напівхвиля: 1.4 і тд.

На максимумі циклічність така:

Перша напівхвиля: 1.2.3.4..... п

Друга напівхвиля: 1.3.4. 5.....n.2.

. .....

Передостання напівхвиля: 1.(n-1).n.2.3.....(n-2).

Остання напівхвиля: 1.п.2.3.....(n-1).

Оскільки ШІМ напругу виробляє тільки один блок, то саме на нього і треба встановити фільтр частоти модуляції. При цьому на відміну до стандартних рішень в цьому випадку в *n*-разів знижується напруга, що підводиться до дроселя і конденсаторного фільтра, і це суттєво позначається на зниженні його масо-габаритних показників. Відповідно до розділу 3.3.3 коефіцієнт передачі стандартної схеми з фільтром на виході усієї фази перетворювача визначається формулою (3.4), якщо підставити в неї (3.11), то отримаємо:

$$K_{cm} = \frac{U_{2cm}}{U_{1cm}} = \frac{U_{2cm}}{nU_d}, \qquad (3.13)$$

В той же час в схемі, що передбачає підключення фільтра тільки до одного блоку:

$$K_{np} = \frac{U_{2np}}{U_{1np}} = \frac{U_{2np}}{\frac{U_d}{2}}.$$
 (3.14)

Порівнюючи (3.13) та (3.14) отримуємо, що при  $U_{2np}$  такому ж як і у стандартній схемі  $U_{2cm}$ , коефіцієнт передачі  $K_{np}$  буде в п разів більше  $K_{cm}$ . Тобто  $\sqrt{1+\frac{1}{K}}$  буде майже в  $\sqrt{n}$  разів менше а частота зрізу  $\omega_{cnp}$ , буде в  $\sqrt{n}$  разів вище  $\omega_{ccm}$  згідно (3.7) відповідно параметри L і C фільтри будуть менше (3.8, 3.9).

Як узагальнення можемо стверджувати:

- пропонуємий метод забезпечує плавне регулювання величини та частоти вихідної напруги у відповідності до закону  $\frac{U_s}{f_s} = const$ , а також довгострокову роботу СД в складі синхронного електропривода на проміжних позиціях модуляції з частотою, що необхідна за технологічним процесом робочому механізму;
- спосіб почергового керування блоками IGBT перетворювача частоти дозволяє суттєво знизити динамічні втрати в IGBT, тим самим підвищити коефіцієнт корисної дії перетворювача в цілому та формувати оптимальну форму кривої вихідної напруги;
- спосіб почергового керування блоками та вся схема підключення фільтра частоти модуляції до блоку, що виконує ШІМ дозволяє суттєво знизити масо-габаритні показники елементів фільтра.

# **3.4.** Аналіз системи синхронного електропривода з циклоконвертером у ланці статора двигуна

Схема циклоконвертора (безпосередній перетворювач частоти) [93] наведена на рис. 3.11, де тиристори позначені за напрямом від якої фази і до якої він проводить струм.





### перетворювача частоти

Таблиця 3.3 - Ряд фіксованих частот ціклоконвертора

Порядковий номер, n	10	7	5	4	3	2	1
Частота <i>f</i> <sub>n</sub> , Гц	5	7,1	10	12,5	16,7	25	50

Алгоритм закону квазічастотного регулювання  $U_n/f_n = const$  наведено на рис. 3.12.

Оскільки циклічний конвертор формує вихідну напругу шляхом набору напівхвилі циклів вхідної напруги, то він реалізує закон частотного керування  $U_S / f_S = const$  ступінчастим перетворенням частоти напруги. Фіксовані частоти тут:  $f_n = f_S / n$ , де n = 1, 2, 3.... Номінальна частота  $f_{SH} = 50$  $\Gamma \mu$ . Мінімальна пускова частота  $f_{Smin} = 5 \Gamma \mu$ , що є достатньо при n = 10. При цьому із ряду частот значення n = 6, 8, 9 можливо виключити з розгляду через не суттєвість переходу, що не позначиться на плавності зміни частоти обертання СД. Інші частоти наведені у табл. 3.3.



Рисунок 3.12 - Закон квазічастотного регулювання

Аналіз процесу формування напруги живлення в такому варіанті наступний.

За низьких частот перехід з нижчої ступені модуляції на вищу супроводжується незначним стрибком напруги, котрий збільшується при зростанні вихідної частоти циклічного конвектора. Так при переході з  $0,25f_s$  до  $0,33f_s$  стрибок напруги

$$\Delta U = (0,33 - 0,25)U_s = 0,08U_s, \qquad (3.15)$$

При цьому максимум перехідного струму буде

$$I_{MAKC} = \frac{0.33}{0.25} I_{HOM} = 1.32 I_{HOM}, \qquad (3.16)$$

що менше за допустиме  $1,5I_{HOM}$ .

При переході з  $0,33f_s$  на  $0,5f_s$ 

$$\Delta U = 0.17U_s, \qquad (3.17)$$

$$I_{MAKC} = \frac{0.5}{0.33} I_{HOM} = 1.5 I_{HOM}, \qquad (3.18)$$

це межа допустимого значення.

При переході з  $0,5f_s$  на  $1,0f_s$ 

$$\Delta U = 0.5U_s, \qquad (3.19)$$

$$I_{Makc} = \frac{1,0}{0,5} I_{HOM} = 2,0 I_{HOM} .$$
(3.20)

що вище ніж допустиме 1,5 І<sub>ном</sub>, необхідно завищувати тиристори за струмом.

Виконаний та наведений як приклад спрощений розрахунок значень максимумів перехідних струмів, підтверджує, що перехід з низького рівня напруги на більш високий відбувається практично миттєво, шляхом збільшенням кута регулювання провідності  $\alpha$ , а перехід за модульованою частотою відбувається поступово, шляхом зміни набору напівхвилі вхідної напруги. Отже можна вважати, що стрибок напруги відбувається при незмінній частоті, інакше кажучи відбувається перехід на більш високу по рівню частотну характеристику  $\frac{U_s + \Delta U}{f_s} = const$ , при якій струм СД відповідно більше.

У СД циклічний конвертор може працювати на фіксованих за частотою проміжних позиціях. Якщо технологічний процес дозволяє роботу приводного механізму на швидкістях  $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}$ ... від номінальної, то циклічний конвертор може забезпечити ці режими. Більш того, при зниженні живлячої напруги синхронний електропривод переходить на нижню ступінь частоти, що відповідає рівню падіння напруги до того моменту, поки не відновиться нормальний рівень живлячої напруги.

Якщо, за технологією передбачається тривала робота електропривода на номінальній швидкості, то можливий перехід двигуна на пряме живлення від мережі шляхом вимкнення циклічно конвертора і вимкнення контактора *KM* (рис. 3.11). В результаті мінімізуються електричні втрати в приборах конвертора, підвищується загальний ККД електропривода. Проте процес переходу СД на пряме живлення від мережі потребує вельми точного узгодження фази напруги мережі живлення та СД, для забезпечення надійного входження двигуна в синхронізм.

Резюмуючи вище викладене логічним виглядає висновок, що циклічний конвертор доцільно застосовувати виключно для пуску СД та і що важливо у багатодвигунній системі синхронного електропривода (рис. 3.13). В такому варіанті запуск синхронних двигунів відбувається почергово, в наступній послідовності. Вмикається контактор *KU1*, циклічний конвертор вмикає перший двигун *M1*. На підсинхронній швидкості вмикається *KM1* і вимикається циклічний конвектор та контактор *KU1*. Таким чином вводиться у роботу другий СД як і наступні за ним.



Рисунок 3.13 – Багатодвигуний синхронний електропривод з

циклоконвертором

Як зауваження до проблеми даного варіанту відзначимо, що розробка високовольтного циклічного конвертора потребує рішення проблеми послідовного з'єднання напівпровідникових приборів, адже їх кількість в плечі циклічного конвертора 6-8 та більше. При цьому це для в варіантів мереж напругою більше ніж 6 кВ, а в мережах 3 кВ відповідно 3-4 послідовно, у залежності від класу приборів.

Між тим, як випливає, з (3.17) та (3.19) перехід на передостанній ступені  $(0,33 \rightarrow 0,5)$  та на останній ступені  $(0,5 \rightarrow 1,0)$  супроводжується неприпустимою величиною перехідного струму  $\geq 1,5I_{mom}$ . Для зниження цієї величини струму автором пропонується при переході роздільна зміна величини напруги та частоти: спершу підвищується напруга до проміжного рівня  $U_{\Delta}$ , після чого відпрацьовується підвищення частоти до наступного допустимого значення, при досягненні якого, напруга підвищується з проміжного рівня  $U_{\Delta}$  до значення, що відповідне усталеній частоті (рис. 3.14).

Проміжний рівень  $U_{\Delta}$  визначається виходячи з умов, що перехідні струми на першому та на третьому етапах переходу повинні бути рівні між собою.



Рисунок 3.14 - Перехідна характеристика роздільного зміни величини напруги (U<sub>s</sub>) і його частоти (f<sub>s</sub>)

На передостанній ступені, при переході з частоти 0.33 відносних одиниць на 0.5.

$$\frac{U_{\Delta}}{0,33} = \frac{0,5}{U_{\Delta}}; \ U_{\Delta} = \sqrt{0,33 \times 0,5} = 0,408;$$
(3.21)

Перевірка

$$I_{\text{Marc}}\left(0,33 \to \Delta'\right) = \frac{0,408}{0,33} I_{H} = 1,224 I_{H};$$
 (3.22)

$$I_{\text{MARC}}\left(\Delta \to 0,5\right) = \frac{0,5}{0,408} I_{H} = 1,225 I_{H};$$
 (3.23)

На останній ступені, при переході з частоти 0.5 відносних одиниць на 1.0:

$$\frac{U_{\Delta}^{"}}{0,5} = \frac{1,0}{U_{\Delta}^{"}}; \ U_{\Delta}^{"} = \sqrt{0,5 \times 1,0} = 0,707;$$
(3.24)

Перевірка

$$I_{Makc}\left(0, 5 \to \Delta^{"}\right) = \frac{0,707}{0,5} I_{H} = 1,414 I_{H}; \qquad (3.25)$$

$$I_{\scriptscriptstyle MAKC}\left(\Delta^{"} \to 1, 0\right) = \frac{1, 0}{0,707} I_{\scriptscriptstyle H} = 1,414 I_{\scriptscriptstyle H}.$$
 (3.26)

Таким чином, запропонований спосіб роздільної зміни величини напруги та її частоти при переході з низької фіксованої частоти на більш високу, дозволяє здійснювати перехід при струмах менших за допустимі.

## 3.5. Аналіз системи збудження синхронної машини з трансформатором та тиристорним керуванням випрямлячем

Принципова схема трансформаторно-тиристорної системи збудження СД наведена на (рис. 3.16) [41].



Рисунок 3.16 - Спрощена трансформаторно-тиристорна система збудження синхронної машини

Для проведення аналізу функціонування даного варіанту наведено певні передумови:

- в відомих схемотехнічних рішеннях резистори гасіння *RZ* та пускові *RR* відмінні;
- пусковий резистор в існуючих системах змінний, та регулюється тиристорами VR1 та VR2;
- на стороні статора діє пусковий перетворювач, що здійснює частотний пуск СД, завдяки чому резистори *RZ* і *RR* можуть бути об'єднані в один некерований, комплекс (рис. 3.17).



Рисунок 3.17 - Спрощена схема збудження при частотному пуску синхронної машини

Снабери на рис 3.17 не показані, щоб не спотворювати суті функціонування схеми.

Система дозволяє використовувати інверторний режим керованого випрямляча для виходу синхронної машини з стану збудження, але:

- діапазон використання інверторного режиму за напругою менше ніж за умови резисторного гасіння поля СД;
- тривалість інвертування більша, ніж тривалість резисторного гасіння поля;
- рекуперація індуктивної потужності обмотки збудження до допоміжної мережі у інверторному режимі керованого випрямляча можлива лише коли мережа допускає такий режим, що не завжди піддається практичній реалізації, тому для забезпечення надійного виводу СД з стану збудження все одно необхідно повернутися до використання резисторного гасіння поля;
- входження в інверторний режим та перехід на резисторне гасіння значно затягує процес виходу СД з стану збудження, що посилюється наявністю згладжуємого дроселя LM;
- керований випрямляч вносить суттєві спотворення до живлячої мережі,
   що призводить до зниження коефіцієнта потужності до 0.4-0.5;
- наявність трансформатора, визначає зниження ККД системи, та збільшує габарити установки.

Для усунення зазначених недоліків розроблено, та продовжують розроблятися системи збудження СД, що базується на IGBT чоперах [28].

## 3.6. Аналіз системи збудження синхронних двигунів з діодним випрямлячем та IGB транзисторними чопперами

Варіант системи збудження СД що містить діодний випрямляч та IGBT чопер зображений на рис. 3.18 [28].



Рисунок 3.18 - Спрощена схема IGB транзисторного збудника синхронного двигуна

UD- діодний випрямляч;

*LZ*, *CZ* - фільтр на вході;

*UM*- IGBT чопер;

*VM*- нульовий тиристор;

VR1, VR2 - пускові тиристори;

RR, RM - пусковий та розрядний резистори відповідно;

М - синхронний двигун.

Робота схеми на рис. 3.18 відбувається наступним чином. В процесі пуску СД тиристори VR1 та VR2 діють із змінним кутом регулювання. В кінці пуску на підсинхронній частоті обертання з тиристорів VR1 та VR2 знімаються імпульси керування. Але вони не вимикаються під дією змінної електрорушійної сили, що наводиться у обмотці збудження СД збоку статора. Оскільки частота та величина живлячої електрорушійної сили при цьому надзвичайно малі, то процес вимкнення тиристорів VR1 та VR2 затягується. В кінці процесу після вимкнення тиристорів VR1 та VR2 вмикається IGBT чопер UM, - на транзистор TM надходить сигнал включення та він починає пропускати струм збудження  $i_r$  на інтервалі  $t_T$ . При цьому на тиристорі VM подається імпульс керування довгостроково, завдяки чому він функціонує постійно увімкненим, що гарантує майже миттєвий підхват струму збудження при відключенні IGBT ТМ на періоді модуляції. На час паузи t<sub>0</sub> вимкненого стану *TM*, індуктивний струм обмотки збудження протікає "обмотка збудження  $M \rightarrow VM \rightarrow DM \rightarrow$ ПО ланці обмотка

збудження М". Змінюючи тривалість інтервалів стану, за якого IGBT TM проводить струм, та паузи на періоді модуляції, регулюють величину струму збудження необхідну для СД в синхронізм, та для забезпечення подальших – номінальних режимів роботи електродвигуна.

Функціонування IGBT чопера в номінальному режимі ілюструє схема та діаграми на рис. 3.19. Регулювання напруги на обмотці збудження, і як наслідок струму збудження *I*, здійснюється шляхом широтно-імпульсної модуляції живлячої напруги *U*<sub>d</sub>, яку приймаємо незмінною для спрощення математичних розрахунків.



Рисунок 3.19 - Спрощена схема системи збудження і діаграми струмів і

напруг

Тоді струм на інтервалах провідності  $t_T$  та нульовому  $t_0$  описується наступним чином:

де  $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$  - постійна часу ланки збудження.

Граничні умови в даному варіанті

$$i_{T}(t_{T}) = \max i_{r}; i_{0}(t_{0}) = \min i_{r}.$$
 (3.28)

Спільне рішення 3.27 та 3.28 з урахуванням

$$T_M = t_T + t_0 \,. \tag{3.29}$$

де  $T_M = \frac{1}{f_M}$  - період модуляції,  $f_M$  - частота модерації, дає

$$i_{T} = \frac{U_{d}}{R_{r}} \left[ 1 - \frac{1 - \exp\left(-\frac{t_{0}}{\tau_{r}}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{T_{M}}{\tau_{r}}\right)} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_{r}}\right) \right];$$
(3.30)

$$i_{0} = \frac{U_{d}}{R_{r}} \cdot 1 - \frac{1 - \exp\left(-\frac{t_{T}}{\tau_{r}}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{T_{M}}{\tau_{r}}\right)} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_{r}}\right); \qquad (3.31)$$

звідки

$$\max i_r = \frac{U_d}{R_r} \cdot \frac{1 - \exp\left(-\frac{t_T}{\tau_r}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{T_M}{\tau_r}\right)};$$
(3.32)

$$\min i_r = \left(\max i_r\right) \cdot \exp\left(-\frac{t_0}{\tau_r}\right). \tag{3.33}$$

Розмах пульсації

$$2\Delta i_r = \max i_r - \min i_r \,. \tag{3.34}$$

Коефіцієнт пульсації

$$K_{\Delta i} = \frac{\Delta i_r}{I_r} \,. \tag{3.35}$$

де середнє значення струму збудження

$$I_r = \frac{U_d}{R_r} \cdot q \,. \tag{3.36}$$

Коефіцієнт заповнення періоду модуляції

$$q = \frac{t_T}{T_M}.$$
(3.37)

При q = 0.5 має місце максимальна пульсація струму

$$\max K_{\Delta i} = \frac{1 - \exp\left(-\frac{T_M}{2\tau_r}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{T_M}{2\tau_r}\right)}.$$
(3.38)

3 (3.38) слідує

$$T_{M} = 2\tau_{r} \ln \frac{1 + \max K_{\Delta i}}{1 - \max K_{\Delta i}}.$$
(3.39)

За допустимого стандартом пульсації  $(\max K_{\Delta i})_{don} = 0,05$ 

$$T_{M_{oon}} \le 0, 2\tau_r \text{ afo } f_{M_{oon}} \ge \frac{5}{\tau_r}$$
(3.40)

Відношення (3.40) зумовлює вибір частоти модуляції, що зазвичай *f*<sub>M</sub> ≥1,0 кГц.

Зазначимо, що на вибір частоти модуляції впливає також виконання вимог електромагнітної сумісності СД – живляча мережа [28].

Проте, на відмінну від трансформаторно-тиристорної системи збудження (рис. 3.16) та у схемі на рис. 3.18, відсутній дросель, так як за високочастотної ШІМ для згладжування струму достатньо індуктивності обмотки збудження СД. При цьому, індуктивність фільтруючого дроселя *LZ*, суттєво менше індуктивності дроселя *LM*, адже працює на частоті модуляції, що на порядок вище за частоту пульсацій випрямленої напруги в схемі на рис. 3.16. Дросель *LZ*, забезпечує виконання вимог електромагнітної сумісності мережі та транзисторного перетворювача.

Для виводу синхронної машини з стану збудження, знімають імпульс включення з нульового тиристора VM, вмикають тиристор VR1 та транзистор TM на час достатній для відключення тиристора VM під дією напруги, що прикладається до нього в зворотньому напрямі. Логічно це виглядає так:



Між тим, додаткове навантаження IGBT *TM* комутаційним струмом *i<sub>к</sub>* вимагає вибору більш потужного транзистора.

Після закінчення часу, за який тиристор VM відновлює властивість тримати пряму напругу, знімають імпульси включення з транзистора TM і тиристора VR1. Вимикається TM. Індуктивний струм обмотки збудження накоротко замикається у ланці:

*VR1* вимикається під дією падіння напруги на резисторі. Надалі індуктивний струм протікає по обмотці збудження і в подальшому знижується до нульового значення. При цьому до транзистора *TM* прикладається сума випрямлених та напруг падіння на резисторах *RR* і *RM*. Для усунення цього дефекту необхідно підвищити клас IGBT *TM* за напругою майже вдвічі.

З метою мінімізації зазначених недоліків автором запропонована схема (рис. 3.20) IGBT збудника, в якій виключено наступне:

- коефіцієнт потужності електричної енергії, що споживається з мережі рівний 0,92 проти 0,4-0,5 в трансформаторно-тиристорній системі збудження;

- діодний випрямляч є надійним пристроєм;

- IGBT чопер не поступається за надійністю шести тиристорам;

- відсутній трансформатор в порівнянні з традиційною системою збудження;

- коефіцієнт корисної дії діодно-транзисторної системи, вище на 2-3%.

При цьому повністью збережені переваги схеми рис. 3.18 проти схем на рис. 3.16 та 3.17:

Функціонування системи збудження (рис. 3.20) відбувається наступним чином.

Початковий стан.

Усі контактори KL, KC, KM, KR розімкнені. IGBT TM вимкнено.

<u>Підготовка системи до роботи</u> відбувається шляхом замикання *КС*. При цьому фільтруючий конденсатор *CZ* плавно заряджається до амплітудного значення лінійної напруги живлячої мережі, після чого *КС* розривається та замикається *KL*. Після цього моменту система підготовлена до роботи.

Запуск СД.

При запуску СД *КМ* замкнутий, *КР* розімкнутий. В кінці пуску на підсинхронній частоті обертання двигуна розмивається *КМ*, до роботи водиться IGBT чопер, який працює у режимі ШІМ напруги. Починаючи з мінімального значення замикається *КР*. Двигун *М* входить у синхронізм.

Штатний режим роботи.

*КМ* розімкнено, *КР* замкнено, *UM* у режимі ШІМ відпрацьовує струм збудження, що забезпечує роботу двигуна з упередженням, або відставанням, чи рівною одиниці коефіцієнту потужності.

<u>Вивід синхронної машини з стану збудження</u> відбувається вимкнення IGBT транзистора *TM* та розмикання в *KP*. Індуктивний струм обмотки збудження замикається уранці " $DM \rightarrow RR$ " та падає до нуля.

<u>Розряд фільтруючого компенсатора *CZ* у цілях безпеки відбувається за повністю зупиненій машині при розімкненому *KL* вмиканням IGBT *TM* і розімкненому *KP*.</u>

Переваги запропонованої схеми:

- відсутність комутаційного струму що перевантажує IGBT *TM* на схемі (рис. 3.18), вибір транзистора відбувається за струмом (max *i<sub>r</sub>*) відповідно до рівняння (3.32), тобто не потребує підвищувати потужність чопером;
- клас IGBT чопера UM визначається тільки напругою живлення, оскільки ланка збудження, що готується при запуску контактом KM, а при виведенні СД з стану збудження нульовим діодом DM.

Враховуючи вищенаведені аргументи вибираємо для подальших досліджень систему збудження наведену на рис. 3.20.



Рисунок 3.20 - Принципова схема пропонованого IGB транзисторного збудника синхронної машини

- *KL* лінійний вимикач;
- UD -діодний випрямляч;
- *LZ*, *CZ* фільтр;
- *КС*, *RC*, *DC* зарядне коло;
- *UM* чопер;
- *TM* IGBT;
- *DM* нульовий діод;
- RR багатоцільовий резистор;

*KR* - контактор, шунтуючий резистор;

КМ - контактор, шунтуючий головну ланку;

М - синхронна двигун.

#### 3.7. Синтез системи синхронного електропривода

За результатами аналізу та вивченням ряду псевдооптимальних систем синхронного електропривода для розробки оптимального варіанту розроблені рекомендації по синтезу їх в єдиний комплекс.

Керування синхронними електроприводами з IGBT перетворювачем (рис. 3.21, 3.22), реалізується почергово циклічним підключенням блоків, що не використовують ШІМ. ШІМ рекомендується використовувати у разі необхідності плавного пуску двигуна до будь-якого заданого рівня частоти обертання СД і тривалої його роботи на цьому рівні.

Синхронний електропривод з циклоконвертером рекомендується використовувати у разі необхідності пуску СД до заданої ступені f/n, n = 1, 2, 3...

У разі тривалої роботи перетворювача на максимальному рівні, можливий перехід на пряме живлення двигуна від мережі за допомогою контактора.

СД з фазним регулятором рекомендується використовувати тільки для пуску двигуна.

Для збудження синхронного двигуна рекомендується використовувати систему з IGBT чопером (рис. 3.20).

У разі необхідності зупинки СД, рекомендується використовувати резистор гальмування.


Рисунок 3.21 - Принципова схема IGB транзисторного перетворювача частоти із запропонованим підключенням LC – фільтрів

У результаті синтезу рекомендованих систем синхронного електропривода отримана загальна структурна схема, яка зображена на рис. 3.22.



Рисунок 3.22 - Структурна схема синхронного електроприводу на

перспективу

N (A,B,C) - живляча високовольтна мережа,

М - синхронний двигун,

UM - високовольтний перетворювач в статорній ланці двигуна,

UA - транзисторний збуджувач,

*R* - гальмівні резистори,

К - контактори,

AR - система регулювання,

*BI, BU, Bf* - датчик струму, напруги, частоти обертання та положення ротора;

*j* - сигнали датчиків задання режимів захисту.

#### 3.8 Висновки до розділу 3

1. Розроблено вимоги до систем пуску і збудження синхронних електродвигунів в складі синхронних електроприводів. На відповідність вимогам проаналізовані відомі системи і способи управління ними, виконані порівняння і вибір оптимальних варіантів для подальших дослідження.

2. Обгрунтовано та досліджено спосіб почергового циклічного управління високовольтним IGB транзисторним перетворювачем із ШІМ напруги одним інверторним блоком, що дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії перетворювача і формувати оптимальну інтегральну криву вихідної напруги.

3. Обгрунтована схема підключення вихідного LC-фільтра моделюючої частоти на виході ШІМ блоку багаторівневого перетворювача, що дозволяє зменшити масу і об'єм елементів фільтра.

4. Запропоновано спосіб роздільної зміни величини і частоти вихідної напруги, що дозволяє зменшити рівні перехідних струмів нижче допустимого та нижче ніж при ступінчастому частотному регулюванні.

5. Запропоновано вдосконалений варіант системи збудження синхронного двигуна, що забезпечує високу надійність.

#### РОЗДІЛ 4

### МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У СИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ ДВИГУНІ З РІЗНИМИ СИСТЕМАМИ ПУСКУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ВЕНТИЛЯТОРА ГОЛОВНОГО ПРОВІТРЮВАННЯ ШАХТ

Як зазначалось в розділі 1 даного дослідження ВГП є одними з найважливіших елементів в технології підземного способу видобутку КК, оскільки забезпечують безпеку житедіальності гірників при роботі в підземних виробках шахт. В силу цих і ряду інших технічних обставин проведення експериментальних досліджень в потрібному маштабі в умовах діючих шахт вкрай обмежено, а нерідко взагалі заборонено правилами безпеки та технічної експлуатації [7].

В такій ситуації в формат досліджень логічно включити моделювання. В умовах сучасних дослідницьких аспектів досяжність результатів методами моделювання, з максимальним наближенням їх до реалій, залежить від достовірності як вхідних даних так і від рівня адекватності моделі. Саме в такому аспекті і проводились наведені далі по тексту дослідження.

## 4.1 Моделювання перехідних процесів при прямому пуску синхронного електричного двигуна з вентиляторним навантаженням.

Як відомо [103] планування модельних експериментів переслідує 2 основних мети:

- скорочення обсягу випробувань при дотриманні вимог до правдивості та точності їх результатів;

- підвищення інформативності кожного з експериментів окремо.

Відповідно до цих стверджень і будувалась методика модельних до досліджень. Для отримання результатів максимально наближених до реальноіснуючих параметрів об'єкту – електромеханічних комплексів вентиляторів головного провітрювання шахт за базовий елемент – синхронний привідний електродвигун було взято реальний двигун, котрий знаходиться в структурі діючих аналізуємих електромеханічних комплексів ВГП залізорудних шахт [103]. Параметри прийняті при розбудові моделі СД (наведені в Додатку Б.2.) з вентиляторним моментом на валу, для дослідження електромеханічного комплексу ВГП. Спрощена структура моделі для досліджень в варіанті прямого пуску наведена на рис 4.1 а вікно налаштування параметрів СД на рис. 4.2.



Рисунок 4.1 - Структура моделі для дослідження прямого пуску синхронного електродвигуна з вентиляторним моментом на валу.

Block Parameters: SM 3.125 MVA	$\times$
Synchronous Machine (mask) (link)	-
Implements a 3-phase synchronous machine modelled in the dq rotor reference frame. Stator windings are connected in wye to an internal neutral point.	
Configuration Parameters Advanced Load Flow	
Nominal power, line-to-line voltage, frequency [ Pn(VA) Vn(Vrms) fn(Hz) ]: [ 3.125e6 2400 50]	:
Reactances [ Xd Xd' Xd'' Xq Xq'' Xl ] (pu): [ 1.56, 0.296, 0.177, 1.06, 0.177, 0.052 ]	:
Time constants	
d axis: Short-circuit	1
q axis: Open-circuit	ı I
[ Td" Tqo" ] (s): [ [ 3.7, 0.05, 0.05 ]	]
Stator resistance Rs (pu): 0.0036	:
Inertia coefficient, friction factor, pole pairs [ H(s) F(pu) p()]: [ 5.07 0 2]	:
Initial conditions [ dw(%) th(deg) ia,ib,ic(pu) pha,phb,phc(deg) Vf(pu) ]: [-100 0 0 0 0 0 0 0 0 0]	:
Simulate saturation Plot	
[ ifd; vt] (pu): [0.211 0.418 1.0 1.25 1.72 3.35 ;0.25 0.50 1.0 1.1 1.2 1.4]	3
<u>O</u> K <u>Cancel</u> <u>H</u> elp <u>Apply</u>	

Рисунок 4.2 – Вікно налаштування параметрів синхронного електродвигуна при моделюванні варіанту прямого асинхронного пуску

Характеристика навантаження на валу СД виглядає наступним чином:

$$M_{\text{вент}} = M_{cm} + k \cdot \omega^2$$

де  $M_{cm} = 0.05$  в.о., k = 0.65 (частота обертів у відносних одиницях).

При цьому зазначимо, що збільшення моменту призведе до того, що СД в асинхронному режимі не зможе втягнутися в синхронізм, тому що стала частота обертів двигуна в асинхронному режимі буде занадто мала (≈ 0.9 в.о), і енергії втягування в синхронізм буде недостатньо - синхронна машина перейде в режим випадання із синхронізму (рис. 4.3).



Рисунок 4.3. Вентиляторний момент супротиву на валу синхроного електродвигуна (у відносних одиницях)

Для дослідження варіанту прямого пуску СД прийняті параметри які приведені на рис. 4.4.

На рис. 4.5 приведено вікно налаштувань системи електропостачання СД.

В якості додаткових навантажень СД використовувались активні опори 5 МВт і 1 МВт, які покращують обчислювальний процес, не впливаючи на кінцеві результати моделювання. До входу Vf1 CД підключені блоки, які в кінці асинхронного пуску здійснюють короткочасне збудження CД, для успішного втягування його в синхронізм. В подальшому рівень збудження знижують до робочих величин.

Block Parameters: Transformer 25 kV / 2400V 6 MVA	×
Three-Phase Transformer (Two Windings) (mask) (link)	
This block implements a three-phase transformer by using three single-phase transformers. Set the winding connection to 'Yn' when you want to access the neutral point of the Wye.	
Click the Apply or the OK button after a change to the Units popup to confirm the conversion of parameters.	
Configuration Parameters Advanced	
Units pu	•
Nominal power and frequency [ Pn(VA) , fn(Hz) ] [ 6e6 , 60 ]	:
Winding 1 parameters [ V1 Ph-Ph(Vrms) , R1(pu) , L1(pu) ] 25e3 , 0.0015 , 0.03]	:
Winding 2 parameters [ V2 Ph-Ph(Vrms) , R2(pu) , L2(pu) ] 2.4e3 , 0.0015 , 0.03 ]	:
Magnetization resistance Rm (pu) 200	÷
Magnetization inductance Lm (pu) 200	÷
Saturation characteristic [ i1 , phi1 ; i2 , phi2 ; ] (pu) ; 0.005,1.2 ; 1.0,1.4 ]	÷
Initial fluxes [ phi0A , phi0B , phi0C ] (pu): [ 0.8 , -0.8 , 0.7 ]	:
<u>QK</u> <u>Cancel Help</u> Apply	1

Рисунок 4.4 – Вікно налаштувань трансформатора для моделювання варіанту прямого пуску синхронного двигуна

Block Parameters: 25 kV 1000 MVA X
Three-Phase Source (mask) (link)
Three-phase voltage source in series with RL branch.
Parameters Load Flow
Configuration: Yg
Source
Specify internal voltages for each phase
Phase-to-phase voltage (Vrms): (25000)*1
Phase angle of phase A (degrees): 2.1395e-05
Frequency (Hz): 50
Impedance
☑ Internal ☑ Specify short-circuit level parameters
3-phase short-circuit level at base voltage(VA): 1000e6
Base voltage (Vrms ph-ph): 25e3
X/R ratio: 10
<u>O</u> K <u>Cancel Help</u> <u>Apply</u>

Рисунок 4.5 – Вікно налаштувань системи електропостачання синхронного електродвигуна

За допомогою вимірювального блоку Continuous зі входами струму і напруги здійснюється вимір миттєвої активної потужності СД, а інтегратор після зазначеного блоку виконує роль лічильника, підсумовує всю активну енергію за час пуску.

На рис. 4.6 – 4.11 наведені отримані вході модельних досліджень графіки перехідних процесів прямого пуску СД з подальшим втягуванням в синхронізм.



Рисунок 4.6 – Напруга на затискачах статора синхронного електродвигуна

при прямому пуску з подальшим втягуванням в синхронізм



Рисунок 4.7 – Струм синхронного електродвигуна при прямому пуску з подальшим втягуванням в синхронізм



Рисунок 4.8 – Момент (у відносних одиницях) синхронного електродвигуна





Рисунок 4.9 – Швидкість синхронного електродвигуна при прямому пуску з подальшим втягуванням в синхронізм (у відносних одиницях)



Рисунок 4.10 – Активна потужність синхроного електродвигуна при прямому пуску з подальшим втягуванням в синхронізм (Джоулі)



Рисунок 4.11 – Зміна рівня споживання електричної енергії при прямому пуску синхронного електродвигуна з подальшим втягуванням в синхронізм (Джоулі)

Аналіз отриманих результатів свідчить що під час прямого пуску СД з вентиляторною характеристикою навантаження є недоліки:

 - 5-10 кратні сплески струмів статора і ротора та відповідний вплив на моменти двигуна; - затяжна тривалість процесу пуску;

- ускладнення втягування СД в синхронізм;

- під номінальним навантаженням під час усталеного асинхронного ходу спостерігаються коливання швидкості та моменту на валу, які зникають з подачею струму збудження на ОЗ. При менших навантаженнях на валу коливання практично відсутні

### 4.2 Моделювання перехідних процесів при покроковій зміні величини напруги та частоти при пуску синхронного електричного двигуна з вентиляторним навантаженням.

З метою пошуку методів регулювання, котрі б не несли в собі вищезазначених недоліків, подальший пошук був спрямований на комбіновані варіанти регулювання процесу пуску СД. Одним з таких способів був спосіб покрокової зміни рівня напруги та частоти модуляції СД. Для дослідження данного варіанту використовувалася модель рис. 4.12. В структурі даної моделі в порівнянні з моделью рис 4.1 блок системи живлення СД був замінений на відповідну підсистему.



Рисунок 4.12 – Структура моделі для дослідження пуску при покроковій зміні величини напруги та частоти синхронного електродвигуна з вентиляторним моментом на валу

На рис. 4.14 відображена логіка роботи зазначеної підсистеми:

- 0 ÷ 5 секунда асинхронний розгін на частоті 15 Гц напругою 6500 В;
- 5 ÷ 8 секунда асинхронний розгін на частоті 25 Гц напругою 10000 В;
- 8 ÷ 12 секунда асинхронний розгін на частоті 35 Гц напругою 13000 В;
- 12÷19.3 секунда асинхронний розгін на частоті 50 Гц напругою 25000 В;
- 19.3 ÷ 22 секунда втягування в синхронізм за допомогою форсування збудження;
- 22 ÷ 30 секунда сталий режим СД з нормальним збудженням.

Структура підсистеми формування вентиляторної характеристики СД представлена на рис. 4.13.



 Рисунок 4.13 – Структура підсистеми формування вентиляторної характеристики навантаження



Рисунок 4.14 – Структурна схема підсистеми, яка формує покрокову зміну величини напруги та частоти живлення синхронного електродвигуна. На рис. 4.15 – 4.20 наведені отримані в ході модельних досліджень графіки зміни параметрів Сд при покроковій зміні величини напруги живлення та частоти комутації.



Рисунок 4.15 – Напруга на затискачах статора при пуску з покроковою зміною величини напруги живлення та частоти комутації синхронного електродвигуна.



Рисунок 4.16 – Струм при пуску з покроковою зміною величини напруги живлення та частоти комутації синхронного електродвигуна.







Рисунок 4.18 – Діаграмма зміни частоти обертів валу синхроного електродвигуна при пуску з покроковою зміною величини напруги живлення та частоти комутації

живлення та частоти комутації синхронного електродвигуна.







Рисунок 4.20 – Спожита енергія при пуску з покроковою зміною величини напруги та частоти синхронного електродвигуна.

# 4.3 Оцінювання зміни енергетичних параметрів синхронного електродвигуна при різних варіантах пуску

Наведені в розділах 4.1 – 4.2 характеристики зміни технологічних параметрів СД в перехідних режимах при різниз варіантах пуску виявив як позитиви так і негативи аналізуємих варіантів.

Для отримання відповіді на питання: який варіант пуску СД з вищерозглянутих, більш енергоефективний, необхідно провести порівняльний аналіз енергетичних процесів для цих випадків.

На рис. 4.21 наведено модель для дослідження енергетики процесу пуску СД в варіантах прямого і покрокової зміни величини напруги живлення та частоти комутації.



Рисунок 4.21 – Структура моделі для дослідження синергетичного варіанту системи пуску синхронного електродвигуна: прямий пуск і покрокова зміна величини напруги живлення та частоти комутації



Рисунок 4.22 – Зміна в рівнях споживання активної енергії (в %) при прямому пуску та при пуску з покроковою зміною величини напруги живлення та частоти комутації синхронного електродвигуна.

На рис. 4.22 наведено графік зміни в рівнях споживання електричної енергії при прямому пуску, та покроковою зміною напруги живлення і частоти комутації СД. Як свідчить данна діаграма варіант покрокової зміни напруги та частоти живлення практично не збільшує час пуску СД в порівнянні з існуючим, зате спожита при пуску активна енергія зменшується приблизно на 50% (з 115000000 джоулів, яка дорівнює 3833333,3 Вт, до 57670000 джоулів, яка відповідно дорівнює 1922333,3 Вт). Також при цьому способі пуску знижується пусковий струм який сягає рівня 2-4 номінальних значень.

Дані результати покладені в основу для подальшого моделювання та порівняння отриманих згодом матеріалів з результатами модельних досліджень реального СД електромеханічного комплексу вентилятора головного провітрювання залізорудних шахт.

### 4.4. Складання системи диференціальних рівнянь синхронного двигуна для задач моделювання.

Одним з основних дослідницьких завдань про розробці та оцінюванні рівнів ефективності системи керування СД є розробка адекватної математичної моделі електродвигуна в різних системах координат і вивчення передавальних функцій.

В дійсний період час математичною основою для побудови керуючих обчислювальних систем, що забезпечують процеси керування перетворенням енергії в системах електроприводу, є узагальнені рівняння та апарат двофазних і трифазних перетворень [13], [14].

Стосовно електромеханічних систем з СД то тут найбільш часто перехідні процеси розглядаються в координатних осях *d*, *q* [13], [14]. При цьому досить просто враховується геометрія розташування і взаємодія обмоток для даних видів машин.

При цьому слід враховувати, що порівняння динаміки процесів в явнополюсних і неявнополюсних СД з широтно-імпульсними перетворювачами для визначення ефективності їх використання є актуальним завданням, оскільки поки-що адекватного аппарата для цих досліджень бракує.

Так, в існуючих варіантах досліджень застосування формувачів реальної напруги на статорних обмотках СД при використанні в режимі реального часу, призводить до невиправданих похибок при моделюванні. З цього, ствердження логічним додатком випливає актуальність є питання розробки математичних моделей, вільних від вище викладених недоліків.

### 4.5 Математична модель явнополюсного синхронного двигуна для встановлення впливових факторів при формуванні енергоефективних режимів функціонування електроприводів вентиляторів головного провітрювання

На підставі узагальненої системи диференціальних рівнянь синхронного двигуна [13] в векторній формі (4.2):

$$\begin{cases} \overline{U}_{S} = \frac{d\psi_{S}}{dt} + j\omega_{k}\overline{\psi}_{S} + \overline{I}_{S} \cdot R_{S}; \\ \overline{U}_{R} = \frac{d\overline{\psi}_{R}}{dt} + j(\omega_{k} - \omega) \cdot \overline{\psi}_{R} + \overline{I}_{R} \cdot R_{R}; \\ \overline{U}_{f} = \frac{d\overline{\psi}_{f}}{dt} + j(\omega_{k} - \omega) \cdot \overline{\psi}_{f} + \overline{I}_{f} \cdot R_{f}. \end{cases}$$

$$(4.2)$$

будуються математичні моделі синхронного двигуна в різних системах координат, виходячи з цілей і зручності вирішення поставленого завдання.

Приймемо наступні позначення координат синхронного двигуна:

ω - кутова частота обертання ротора;

 $\omega_k$  - кутова частота обертання обраної системи координат;

*U* - напруга;

*I* -струм;

 $\psi$  - потокозчеплення;

*R* - опір;

(Індекс *S* - відноситься до параметрів статора, відповідно індекс *R* відноситься до відповідних параметрів роторної обмотки; індекс *f* – до параметрів обмотки збудження; індекси *SR*, *fR*, *Sf* - параметри взаємоіндукції між обмотками).

Введемо коефіцієнти

$$A = 1/(L_{S}L_{R} - L_{SR}^{2})$$

$$A = 1/(L_{S}L_{f} - L_{Sf}^{2})$$

$$A = 1/(L_{f}L_{R} - L_{fR}^{2})$$
(4.3)

Взаємозв'язок струмів і потоків можна представити у вигляді:

$$\begin{cases} \bar{\psi}_{S} = \bar{I}_{S}L_{S} + \bar{I}_{R}L_{SR} + \bar{I}_{S}L_{Sf} \\ \bar{\psi}_{R} = \bar{I}_{S}L_{SR} + \bar{I}_{R}L_{R} + \bar{I}_{f}L_{fR} \\ \bar{\psi}_{S} = \bar{I}_{S}L_{Sf} + \bar{I}_{R}L_{fR} + \bar{I}_{f}L_{f} \end{cases}$$
(4.4)

Використовуємо систему координат: струм статора - потік ротора  $I_S$ ,  $\psi_S$ , для демпферної обмотки і обмотки збудження.

Струм статора в осях  $I_S$ ,  $\psi_S$ .

$$I_{SA} = 1.5 \cdot I_A$$

$$I_{SB} = 0.866 \cdot (I_B - I_C)$$

$$I_S = \sqrt{I_{SA}^2 + I_{SB}^2}$$
(4.5)

Потокозчеплення статора, демпферних обмоток в і обмотки збудження в осях  $I_S, \psi_S$ .

$$\psi_{S\alpha} = \frac{I_{S\alpha}/A + \psi_{R\alpha} \cdot L_{SR} + \psi_{f\alpha} \cdot L_{Sf}}{L_S}$$
$$\psi_{S\beta} = \frac{\frac{I_{S\beta}}{A} + \psi_{R\beta} \cdot L_{SR}}{L_S}$$
$$\psi_S = \sqrt{\psi_{S\alpha}^2 + \psi_{S\beta}^2}$$

$$\psi_{R\alpha} = \frac{I_{R\alpha}/A_1 + \psi_{S\alpha} \cdot L_{SR} + \psi_{f\alpha} \cdot L_{Rf}}{L_R}$$

$$\psi_{R\beta} = \frac{\frac{I_{R\beta}}{A_1} + \psi_{R\beta} \cdot L_{SR}}{L_R}$$

$$\psi_R = \sqrt{\psi_{R\alpha}^2 + \psi_{R\beta}^2}$$

$$\psi_{f\alpha} = \frac{I_{S\alpha}/A_2 + \psi_{R\alpha} \cdot L_{Rf} + \psi_{S\alpha} \cdot L_{Sf}}{L_f}$$

$$\psi_{f\alpha} = \frac{I_{S\beta}/A_2 + \psi_{R\beta} \cdot L_{Rf} + \psi_{S\beta} \cdot L_{Sf}}{L_f}$$

$$\psi_f = \sqrt{\psi_{f\alpha}^2 + \psi_{f\beta}^2}$$
(4.6)

Струм демпферних обмоток в осях  $I_S, \psi_S$ .

$$I_{R\alpha} = A \cdot \psi_{R\alpha} \cdot L_{S} - A \cdot \psi_{S\alpha} \cdot L_{m} - A_{1} \cdot \psi_{f\alpha} \cdot L_{mf}$$

$$I_{R\beta} = A \cdot \psi_{R\beta} \cdot L_{S} - A \cdot \psi_{S\beta} \cdot L_{m} - A_{1} \cdot \psi_{f\beta} \cdot L_{mf}$$

$$I_{R} = \sqrt{I_{R\alpha}^{2} + I_{R\beta}^{2}}$$

$$(4.7)$$

Струм обмотки збудження в осях  $I_S$ ,  $\psi_S$ .

$$I_{f\alpha} = A_2 \cdot \psi_{f\alpha} \cdot L_f - A_2 \cdot \psi_{R\alpha} \cdot L_{Rf} - A_1 \cdot \psi_{S\alpha} \cdot L_{Sf}$$

$$I_{f\beta} = A_2 \cdot \psi_{f\beta} \cdot L_f - A_2 \cdot \psi_{R\beta} \cdot L_{Rf} - A_1 \cdot \psi_{S\beta} \cdot L_{Sf}$$

$$I_f = \sqrt{I_{f\alpha}^2 + I_{f\beta}^2}$$
(4.8)

Визначення електромагнітного моменту

$$M_E = \frac{3L_m A(\psi_{S\alpha}\psi_{R\beta} - \psi_{S\beta}\psi_{R\alpha})}{2} + \frac{3L_{Sf}A_2(\psi_{S\alpha}\psi_{f\beta} - \psi_{S\beta}\psi_{f\alpha})}{2}$$
(4.9)

Формування фази синусоїдальної напруги живлення і напруги на клемах СД в трифазних координатах:

$$\frac{d\theta_c}{dt} = \omega_c \tag{4.10}$$
  $\theta_c = \theta_c - 2\pi$  если  $\theta_c > 2\pi$ 

$$U_{Sa} = U_m \sin(\theta_c)$$

$$U_{Sb} = U_m \sin(\theta_c + 2\pi/3)$$

$$U_{Sa} = U_m \sin(\theta_c - 2\pi/3)$$
(4.11)

Рівняння руху ротора:

$$\frac{d\omega}{dt} = (M_E - M_H)/J \tag{4.12}$$

де  $M_E$  - електромагнітний момент, що розвивається синхронним двигуном;

*M<sub>H</sub>* - момент навантаження;

J - сумарний момент інерції синхронного двигуна і механізму.

Рівняння потокозчеплення демпферних контурів і обмотки збудження в осях  $I_R, \psi_R.$ 

$$\frac{d\psi_{f\alpha}}{dt} = -I_f R_f - \psi_{R\beta}\omega + u_f \cos\theta_c$$
$$\frac{d\psi_{fb}}{dt} = -I_f R_f + \psi_{R\alpha}\omega + u_f \cos\theta_c$$

$$\frac{d\psi_{R\alpha}}{dt} = -I_{R\alpha}R_R + \psi_{R\beta}\omega \qquad (4.13)$$
$$\frac{d\psi_{R\beta}}{dt} = -I_{R\beta}R_R - \psi_{R\alpha}\omega$$

де  $\psi_{flpha},\psi_{fb}$  - потік створюваний струмом в обмотці збудження.

Рівняння ЕРС кола статора в трифазній системі:

$$E_{Sa} = \frac{3}{2} \left( \frac{L_{SR} d\psi_{R\alpha}}{L_R dt} + \frac{L_{Sf} d\psi_{f\alpha}}{L_R dt} \right)$$

$$E_{Sb} = \left[ -0.5 \left( \frac{L_{SR} d\psi_{R\alpha}}{L_R dt} + \frac{L_{Sf} d\psi_{f\alpha}}{L_R dt} \right) + \frac{L_{SR} d\psi_{R\beta}}{L_R dt} \frac{\sqrt{3}}{2} \right]$$

$$E_{Sc} = \left[ -0.5 \left( \frac{L_{SR} d\psi_{R\alpha}}{L_R dt} + \frac{L_{Sf} d\psi_{f\alpha}}{L_R dt} \right) - \frac{L_{SR} d\psi_{R\beta}}{L_R dt} \frac{\sqrt{3}}{2} \right]$$

$$(4.14)$$

Похідні потокозчеплення статора в трифазній системі:

$$\frac{d\psi_a}{dt} = (U_{Sa} - I_a R_s - E_{Sa})AL_R$$

$$\frac{d\psi_b}{dt} = (U_{Sb} - I_b R_s - E_{Sb})AL_R$$

$$\frac{d\psi_c}{dt} = (U_{Sc} - I_c R_s - E_{Sc})AL_R$$
(4.15)

Після перетворень 4.2 - 4.15 отримаємо система диференціальних рівнянь і рівняння зв'язків для СД:

$$\frac{d\Psi_{fA}}{dt} = -I_{fA}R_s - \left(\Psi_{fB} + \frac{\Psi_{RA}L_{fr}}{L_f}\right)\omega + U_f \cos\theta_{Uf};$$

$$\frac{d\Psi_{fB}}{dt} = -I_{fA}R_s - \left(\Psi_{fA} + \frac{\Psi_{RB}L_{fR}}{L_f}\right)\omega - U_f \sin\theta_{Uf};$$

$$\frac{d\Psi_{RA}}{dt} = -I_{RA}R_R - \left(\psi_{RB} + \Psi_{fB}\frac{L_{fR}}{L_f}\right)\omega - U_f \sin\theta_{Uf};$$

$$\frac{d\Psi_{RB}}{dt} = -I_{RB}R_R - \left(\psi_{RA} + \Psi_{fA}\frac{L_{fA}}{L_f}\right)\omega - U_f \sin\theta_{Uf};$$

$$Esa = \frac{2L_{SR}}{3L_R} \cdot \frac{d\Psi_{RA}}{dt} + \frac{2L_{Sa}}{3L_a} \cdot \frac{d\Psi_{fA}}{dt};$$
(4.16)

$$Esb = \frac{2L_{SR}}{3L_R} \left( -0.5 \frac{d\psi_{RA}}{dt} + 0.866 \frac{d\psi_{RB}}{dt} \frac{2L_{fR}}{3L_f} \right) + \frac{2L_{Sf}}{3L_R} \left( -0.5 \frac{d\psi_{fA}}{dt} + 0.866 \frac{d\psi_{fB}}{dt} \frac{2L_{fR}}{3L_f} \right);$$
$$Esc = \frac{2L_{SR}}{3L_R} \left( 0.5 \frac{d\psi_{RA}}{dt} + 0.866 \frac{d\psi_{RB}}{dt} \frac{2L_{fR}}{3L_R} \right) - \frac{2L_{Rf}}{3L_R} 0.5 \frac{d\psi_{fA}}{dt} + 0.866 \frac{d\psi_{fB}}{dt} \frac{2L_{fR}}{3L_R};$$

$$\frac{dIa}{dt} = \frac{Usa - IaRs - Esa}{Ls};$$

$$\frac{dIb}{dt} = \frac{Usb - IbRs - Esb}{Ls};$$

$$\frac{dIc}{dt} = (Usc - IcRs - Esc)/Ls;$$

$$M_E = \frac{3L_{SR}A(\Psi_{SA}\Psi_{RB} - \Psi_{SB}\Psi_{RA})}{2} + \frac{3L_{fS}A(\Psi_{Sa}\Psi_{Rb} - \Psi_{Sb}\Psi_{Ra})}{2};$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_E + M_H}{j}; \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega$$

Отримана система дозволяє досліджувати перехідні процеси в СД з різними законами формування форм кривих фазних напруг, потоку збудження і навантаження.

Використання розрядного опору при пуску СД моделюємо таким чином:

якщо 
$$\omega < 0.9\omega_{\text{синх}}$$
 то  $R_R = R_R + R_{\text{роз}}; \ U_R = 0$   
якщо  $\omega > 0.9\omega_{\text{синх}}$  то  $R_R = R_R; \ U_R = U_{36yg}$  (4.17)

Для вирішення нелінійної системи диференціальних рівнянь використовуємо метод Рунге - Кутта 4 - го порядку [14]. Цей метод досить точний, дає помилку  $\sigma = 0,628 \cdot 10^{-8}$  при розрахунку з допустимим по стійкості рішення кроком інтегрування.

Адекватність моделі СД підтверджують діаграми які наведені на рис. 4.23, 4.24, 4.25. На рис. 4.23 наведені графіки перехідних процесів по моменту - М і частоті обертання – ω синхронного двигуна при прямому пуску.

При прямому включенні на мережу обмотка збудження включена на розрядний опір і відключена від напруги збудження. При малих частотах обертання протягом 1,6 с, момент СД, що працює в режимі асинхронного пуску, (рис.4.23), та потокозчеплення (рис. 4.24) і струми статора і короткозамкнутої обмотки ротора (рис. 4.25) мають коливальний характер з частотою мережі живлення.

Середнє значення моменту пуску  $M_{\Pi}$  лежить в межах від 0,7-1,2 номінального моменту  $M_{\rm H}$ . Значення пускових струмів статора і короткозамкнутої обмотки ротора кратні 4,8-5,2 раза номінального струму  $I_{\rm H}$ . 5.0 Had 1.0 4.0 3.0 0.75 0.5 2.0 0.25 1.0 (D)





При досягненні частоти обертання  $\omega = 300 \text{ c}^{-1}$  при  $t \approx (5.4 \dots 5.9)$  с. відключається розрядний опір і подається напруга збудження (рис.4.24). При цьому збільшується магнітний потік в повітряному проміжку СД, і двигун втягується в синхронізм досягаючи синхронної швидкості.

З моменту часу  $t \approx (1,8 \dots 2,2)$  тоб-то з моменту закінчення коливань до моменту подачі збудження параметри СД:  $M, \psi_S, \psi_R, I_S, I_R$  змінюються рівномірно, що підтверджуються відомими теоретичними та практичними

дослідженнями [14]. Мінімальний електромагнітний момент  $M_{min}$  (0,6 ... 1,2)  $M_{\text{ном}}$ , максимальний момент  $M_{max} = (1,9 \dots 2,2) M_{\text{ном}}$ .

Середнє значення пускових струмів  $I_S$ ,  $I_R$  кратне  $\approx 5$ . Струму  $I_S$ ,  $I_R$  при синхронній частоті обертання дорівнюють нулю. Входження в синхронізм характеризується аперіодичними процесами.



Рисунок 4.24 - Перехідні процеси по потокозчепленням статора, ротора і збудження синхронного двигуна при прямому пуску

У момент часу t = 6.4 с. момент навантаження двигуна збільшується поступово. Ступенева зміна навантаження обумовлено визначенням стандартних показників якості перехідних процесів таких, як швидкодія, перегулювання, час загасання процесу.

Перехідні процеси в СД при наявності зміни його номінальних параметрів описуються диференціальним рівнянням другого порядку [16]. Якщо корені характеристичного рівняння будуть комплексні, то перехідний процес буде коливальний з загасанням щодо величини статичного струму рівноваги *I<sub>s</sub>* (рис.4.25).



синхронного двигуна при прямому пуску

В свою чергу, математична модель неявнополюсного СД має меншу кількість рівнянь і є нелінійної, внаслідок наявності перехресних зв'язків по моменту та протидії - ЕРС обертання, що наводяться в обмотках СД (4.14). При прямому пуску СД напруга збудження відсутня  $U_R = 0$ , в контур збудження включено розрядний опір  $R_{RAZ}$ .

Отримана система диференціальних рівнянь (4.18) дозволяє досліджувати перехідні процеси в явнополюсному або неявнополюсному СД з різними законами формування форм кривих фазної напруги СД, потоку збудження і навантаження.

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{RA}}{dt} &= -I_{RA}(R_R + R_{RAZ}) - \left(\psi_{RB} + \Psi_{fB}\frac{L_{fR}}{L_f}\right)\omega + U_R \sin\theta_{Uf};\\ \frac{d\psi_{RB}}{dt} &= -I_{RB}(R_R + R_{RAZ}) - \left(\psi_{RA} + \Psi_{fA}\frac{L_{fA}}{L_f}\right)\omega + U_R \sin\theta_{Uf};\\ Esa &= \frac{2L_{SR}}{3L_R}\cdot\frac{d\psi_{RA}}{dt} + \frac{2L_{Sa}}{3L_a};\\ Esb &= \frac{2L_{SR}}{3L_R}\left(-0.5\frac{d\psi_{RA}}{dt} + 0.866\frac{d\psi_{RB}}{dt}\right);\end{aligned}$$

$$Esc = \frac{2L_{SR}}{3L_R} \left( 0.5 \frac{d\psi_{RA}}{dt} + 0.866 \frac{d\psi_{RB}}{dt} \right);$$

$$\frac{dIa}{dt} = \frac{Usa - IaRs - Esa}{Ls};$$

$$\frac{dIb}{dt} = \frac{Usb - IbRs - Esb}{Ls};$$

$$\frac{dIc}{dt} = (Usc - IcRs - Esc)/Ls;$$

$$M_E = \frac{3L_{SR}A(\Psi_{SA}\Psi_{RB} - \Psi_{SB}\Psi_{RA})}{2};$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_E + M_H}{j}; \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega$$

$$(4.18)$$

де *U<sub>R</sub>* - напруга збудження.

На рис. 4.26 наведені графіки перехідних процесів по моменту - *M* і частоті обертання - ω СД при прямому способі пуску.

При прямому включенні на мережу обмотка збудження включена на розрядний опір і відключена від напруги. При малих частотах обертання протягом 1,6 секунд момент СД, що працює в режимі асинхронного пуску (рис. 4.26) має коливальний характер з частою рівною частоті мережі живлення.

Середнє значення пукового моменту  $M_{\Pi}$  лежить в межах від 0,7 -1,2 номінального  $M_{\rm H}$ . Значення пускових струмів статора кратні 4,8 -5,2 рази від номінального струму  $I_{\rm H}$ .

При досягненні швидкості обертання  $\omega = 0.9 \,\omega_0$  при  $t \approx (4,6 \dots 4,8)$  с. відключається розрядний опір і подається напруга збудження (рис. 4.26). При цьому збільшується магнітний потік в повітряному проміжку синхронного двигуна, і двигун втягується в синхронізм і досягає синхронної швидкості.



Рисунок 4.26 - Перехідні процеси за моментом - *M*, частотою обертання - ω двигуна при прямому пуску і споживання електроенергії - *E*<sub>pt</sub>

З моменту часу  $t \approx (1,0 \dots 1,2)$ , тоб-то з закінчення коливань до подачі збудження праметри: M,  $\psi_S$ ,  $\psi_R$ ,  $I_S$ ,  $I_R$  маєють характер лінійний що підтверджуються відомими теоретичними та практичними дослідженнями. Мінімальний електромагнітний момент  $M_{min} = (0,6 \dots 1,2) M_{HOM}$ , максимальний момент  $M_{max} = (1,9 \dots 2,2) M_{HOM}$ .

Середні значення пускових струмів  $I_S$ ,  $I_R$  кратні  $\approx 5$ . Струми  $I_S$ ,  $I_R$  при синхронній частоті обертання дорівнюють нулю. Входження в синхронізм характеризується аперіодичними процесами. Збільшення сумарного опору статора призводить до збільшення критичного ковзання і стрибкоподібне зменшення опору обмотки ротора з подачею напруги призводить до збільшення моменту синхронного двигуна.

# 4.6. Особливості моделювання перехідних процесів в синхронному двигуні з урахуванням насичення сталі

У реальних СД траплятися явище яке формулюється як магнітне насичення сталі. Максимальне значення рівня насичення сталі може змінюватися як у робочих режимах при перегріванні, викликаного механічним навантаженням, так і після ремонту двигуна при випалюванні обмоток статора або ротора. Облік ефекту насичення слід проводити за допомогою обмеження магнітного потоку стали статора і ротора. Ефект насичення здійснюється простим алгоритмом:

якщо 
$$\Psi_S > \Psi_{NAS}$$
 то  $\Psi_S = \Psi_{NAS}$   
якщо  $\Psi_R > \Psi_{NAS}$  то  $\Psi_R = \Psi_{NAS}$  (4.19)

Намагнічення стали моделювалося системою рівнянь (4.19).

На рис. 4.27-4.30 наведені графіки перехідних процесів в синхронному двигуні з урахуванням насичення сталі.

Обмеження потокозчеплення через насичення сталі змінює динаміку розглянутих систем. Перехідний процес стає більш тривалим у часі і синхронний двигун досягає частоти обертання входження в синхронізм за t = 5,6 ... 5,8. Обмеження по насиченню призводить до виникнення коливань електромагнітного моменту при подачі збудження (t = 5,8 ... 6,4 с) (рис. 4.27).



Рисунок 4.27 - Перехідні процеси за моментом - *M* і частоті обертання ω синхронного двигуна при прямому пуску з урахуванням насичення сталі

При цьому, амплітуда високочастотних складових моменту може досягати за величиною значення номінального моменту.

На рис. 4.28 приведені перехідні процеси за швидкістю обертання, моменту і споживання електроенергії при асинхронному пуску синхронного двигуна з гладким ротором.



Рисунок 4.28 - Перехідні процеси за моментом - М, частоті обертання -  $\omega$  і споживання електроенергії -  $E_{pt}$  синхронного двигуна з гладким ротором при

прямому пуску з урахуванням насичення сталі

Перехідні процеси по потокозчепленню СД в перенасиченому двигуні мають рівномірний аперіодичний характер. Амплітудні значення потоків статора і ротора обмежені насиченням, що призводить до зменшення сплеску потокозчеплення в обмотці збудження і короткозамкненій обмотці ротора на 50% (рис. 4.29).

Перехідні процеси за струмом статора і ротора до входу в синхронізм, аналогічні процесам без урахування насичення. При вході в синхронізм струми містять високочастотні складові (рис. 4.30).

Наявність високочастотних складових в струмах синхронного двигуна призводить до підвищеного споживання електроенергії. Для порівняння, на рис. 4.31 наведені графіки споживання електроенергії без урахування та урахуванням насичення сталі.





Отримані результати моделювання, дозволяють зробити висновок про те, що споживання електроенергії в реальних умовах через насичення на 5% менше. В цьому випадку, спостерігається ефективність стабілізації потоку, яка призводить до підвищення швидкодії на t = 0,4 с. Тому, при ненасичені сталі має сенс регулювати з метою стабілізації потокозчеплення статора.



синхронного двигуна при прямому пуску з урахуванням насичення стали



Рисунок 4.31 - Споживання електроенергії при моделюванні синхронного двигуна без урахування начичення - *E<sub>p</sub>* та з урахуванням насичення -*E<sub>pn</sub>* сталі

### 4.7. Моделювання пуску синхронного двигуна з широтноімпульсним перетворювачем частоти

Як зазначалось в попередніх розділах даного дослідження поліпшити динамічні та енергетичні показники при пуску СД можливо, використовуючи плавний пуск тоб-то лінійно змінюючи в часі напругу живлення і частоту комутації. Графіки перехідних процесів за швидкістю обертання при лінійному завданні наведені [95] на рис. 4.32. При цьому насичення сталі можна розглядати як стабілізацію магнітного потоку статора, ротора або обмотки збудження.



исунок 4.32 - Перехідні процеси за частотою обертання при лінійном і ступеневому регулюванні (прямому пуску)

Аналіз отриманих результатів показує, що при лінійному завданні пуск відбувається в 2 рази швидше. Момент при низьких швидкостях обертання не має високочастотних складових.



Рисунок 4.33- Перехідні процеси за моментом - *М* частоті обертання – ω синхронного двигуна при плавному пуску з урахуванням насичення сталі

Потокозчеплення при низьких частотах так само не має високочастотних складових (рис. 4.34) і обмежено насиченням сталі.





#### з урахуванням насичення сталі

Перехідні процеси по струмах статора і ротора синхронного двигуна представлені на рис. 4.35.

Як свідчать дані (рис. 4.35) перехідні процеси по струмах при плавному пуску поліпшуються до моменту входу в синхронізм і мають аперіодичний характер. Далі, характер перехідних процесів, як і при подачі збудження, з урахуванням насичення.



Рисунок 4.35 - Графіки перехідних процесів по струму статора, ротора синхронного двигуна при плавному пуску з урахуванням насичення сталі



Рисунок 4.36 - Споживання електроенергії при прямому пуску  $E_e$ , пуску з урахуванням насичення  $E_{enas}$  і при лінійному пуску  $E_{lin}$ 

Аналіз отриманих результатів показує, що при лінійному пуску споживання електроенергії на 30-40% нижче, ніж при прямому пуску (рис. 4.36).

#### 4.8. Способи модуляції при формуванні фазної напруги у синхронному двигуні із застосуванням ШІМ.

Нині для реалізації ШІМ - управління АІН найбільш широко використовується алгоритм формування просторового вектора напруги. Цей алгоритм дозволяє найбільш повно використовувати напругу в ланці постійного струму і забезпечує трохи більше просту реалізацію при мікропроцесорному управлінні [96].

Алгоритм просторового вектору полягає в наступному [95,96]. Будь-які три функції часу, які задовольняють умові:

$$u_a(t) + u_b(t) + u_c(t) = 0 (4.20)$$

можуть бути представлені у двовимірному просторі, де координати вибираються так, щоб вектор [ $U_a$  0 0] розташовувався уздовж горизонтальної осі, вектор [0  $U_b$  O] 1 був повернений на 120, а вектор [0 0  $U_c$ ] т повернутий ще додатково на 120° як показано на рис. 4.37. Просторовий вектор U(t) в комплексній формі задається як

$$U(t) = \left( U_a + U_b \cdot e^{j\left(\frac{2}{3}\right)\pi} + U_c \cdot e^{-j\left(\frac{2}{3}\right)\pi} \right),$$
  
$$U(t) = U_X + jU_Y.$$
 (4.21)

де множник 2/3 є коефіцієнтом масштабування. Зворотне перетворення координат з осей *x* - *y* в осі *a*-*b*-*c* має вигляд:

$$\begin{bmatrix} U_X \\ U_Y \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{3}{2} & -\frac{3}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}.$$
 (4.22)

Наприклад, коли джерело напруги є збалансованою трифазною напругою амплітудою  $V_{om}$  і кругової частоти  $\omega_0$ , просторовий вектор представляється як вектор довжини  $V_{om}$ , що обертається з постійною частотою



Рисунок 4.37 - Взаємозв'язок координат і просторового вектора U(t)

Доступні варіанти положення просторового вектора відповідають восьми станам ключів інвертора, як показано на рис. 4.38. У наборі можливих векторів вектор  $V_0$  является нульовим вектором і його отримання можливо застосуванням двох комбінацій:  $V_0$  (0 0 0) і  $V_0$  (1 1 1). Для забезпечення необхідного вихідного просторового вектор  $V_0 * (t)$  час провідності шести ключів модулюється відповідно до амплітуди та кута  $V_0 * (t)$ . Амплітудне значення напруги  $U_{om}$ , кругової частоти  $w_0$  та вихідного вектор  $V_0(t)$ . Кут  $V_0 * (t)$  визначає вибір одного з шести 60-ти градусних секторів на комплексній площині.


Рисунок 4.38 - Просторовий вектор і складові напруги

Заданий просторовий вектор  $V_0 * (t)$  на рис. 4.38 модулюється таким чином:

$$V_0 * (t) = d_\alpha V_\alpha + d_\beta V_\beta, \qquad (4.23)$$

тривалість  $d_{\alpha}$  і  $d_{\beta}$  включення векторів  $V_{\alpha}$  і  $V_{\beta}$  визначаються за такими формулами:

$$d_{\alpha} = m \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_r\right), \quad d_{\beta} = m \cdot \sin(\theta_r), \quad d_0 = 1 - d_{\alpha} - d_{\beta}.$$
 (4.24)

При цьому, модуляційний індекс m(0 < m < 1) визначається як

$$m = 3 \cdot V_{om} / V_d \tag{4.25}$$

де *V<sub>d</sub>* - напруга в ланці постійного струму інвертора.

Для формування напруги на навантаженні за період ШІМ використовуються різні послідовності включення векторів  $V_{\alpha}$ ,  $V_{\beta}$  і  $V_0$ , від яких залежить якість вихідної напруги, струму і динамічні втрати в інверторі, які визначаються числом перемикань на періоді комутації вихідної напруги. Залежно від порядку проходження векторів розрізняють "фронтову" і "центровану" модуляцію. При використанні "фронтової" модуляції порядок визначається формулою, в якій вибір нульового вектора (0 0 0) або (1 1 1) прив'язаний до конкретного сектора. Зміна нульової комбінації в різних секторах необхідна для скорочення числа перемикань. До особливостей апаратної реалізації ШІМ на контролерах відноситься необхідність міняти порядок проходження векторів при переході через кордон сектора для забезпечення комутації відповідних ключів інвертора. При використанні цього виду модуляції форма вихідного струму показана на рис. 4.39.



Рисунок 4.39 - Форма струму при фронтовій модуляції

Спотворення струму на кордонах секторів обумовлені зміною порядку проходження комбінацій. Для усунення спотворень необхідно залишати нульовий вектор незмінним за весь період, що призведе до збільшення числа перемикань приблизно на 1/6.

«Центрована» модуляція характеризується рознесенням моментів перемикань транзисторів різних плечей інвертора протягом періоду ШІМ. Це забезпечується проходженням векторів в порядку  $V_{\alpha}/2 I V_{\beta}/2 I V_0/2 I V_0/2 I V_0/2 I V_{\beta}/2 I V_{\alpha}/2.$  Даний вид модуляції в контролерах може використовуватися у двох модифікаціях: з оновленням тривалостей включення векторів 2 рази на 2 періоду ШІМ для формування описаної вище послідовності. Оновлення тривалостей 2 рази дає кращий гармонійний склад вихідного струму, однак застосування цього рішення призводить до значного збільшення частки процесорного часу на обчислення тривалості. Тому перший режим отримання «центрованої» модуляції найбільш оптимальний [96]. Форма вихідного струму АІН при центрованій модуляції з оновленням один раз показана на рис. 4.40.

Такий же спосіб ШІМ може бути застосований для управління випрямлячем, який живиться від напруги  $U_d$  і навантаженим на ЕРС мережі. Представивши напруги та струми вхідного кола випрямляча узагальнених векторів в  $e_1, e_2$ :

$$e_1 = E_m \cdot e^{j\omega_1 t}, e_2 = (2/3) \cdot U_d \cdot e^{j(n-1)\omega_1 t}, n = 1, 2, \dots$$
(4.26)



Рисунок 4.40 Форма струму при центрованій модуляції

Оскільки фазовий зсув між напругою мережі та споживаним струмом дорівнює нулю, то узагальнені вектори зручно розглядати в системі суміщеної з вектором мережі.

Миттєва напруга ШІМ в ланці постійного струму описується рівнянням:

$$U_{d}(\tau) = U_{max} \quad при \ 0 < \tau < \gamma$$

$$U_{d}(\tau) = 0 \qquad при \ \gamma < \tau < T_{d}$$
(4.27)

де  $\tau$  -поточний час за період, с.,

 $T_d$  - період дискретності ШІМ,

γ - шпаруватість.

Алгоритм моделювання вихідної напруги ШІМ (рис. 4.41) полягає в наступному. Шпаруватість у ШІМ задається  $U_{rt}$  за формулою  $\gamma = abs(U_{3ad}/U_{max})$ , де  $U_{max}$  - амплітуда ШІМ. Полярність вихідної напруги  $U_d$  визначається знаком  $U_{3ad}$ .



Рисунок 4.41 - Алгоритм моделювання широтно-імпульсной модуляцій

В такому варіанті Можна записати  $U_d = sign(U_{3ad}, U_{max})$ . Якщо поточний час більше часу  $(L_p + \gamma) \cdot T_d$ , де  $L_p$  - номер періоду ШШП, тоді  $U_d =$ 0.0. У просторі Фортран:  $if(t.gt.(L_p + \gamma) \cdot T_d) U_d = 0.0$ . Номер періоду збільшується на одиницю, якщо поточний час t перевищує  $T_d \cdot (L_p + 1)$ . У просторі:  $if(t.gt.T_d \cdot (L_p + 1)) L_p = L_p + 1$ . Система рівнянь, що описують перехідні процеси в активно - індуктивному навантаженні, що містить протидії - ЕРС, з ШПП, має вигляд:

$$\gamma = u_{3ad}/u_{ogr} \cdot T_d;$$

$$u_m(t) = sing(U_{3ad}, U_{max}) \text{ якщо } t < T_d \cdot (L_p + \gamma);$$

$$u_m(t) = 0 \text{ якщо } t > T_d \cdot (L_p + \gamma);$$

$$(t) = 0 \text{ якщо } t > T_d \cdot (L_p + \gamma);$$

$$L_p = L_p + 1 \text{ якщо } t > T_d \cdot L_p;$$

$$\frac{di}{dt} = (u - iR_H - e)/L_H$$
(4.28)

Результати моделювання наведені на рис. 4.42.



Рисунок 4.42 - Перехідні процеси в колі ШІМ-R-L при формуванні фазної синусоїдальної напруги

Алгоритм формування трьох фазного синусоїдальної напруги урахуванням властивостей ШІМ з періодом дискретності  $T_d = 0.0002$  с по алгоритму (рис. 4.41).

$$\begin{split} Ucf &= Um \cdot Uy, \ Td = 0.0002, \\ Usa &= sign(Ucf, \sin(\theta_{C})), \\ if(t.gt.(Lp + abs(\sin(\theta_{C}))) * Td) \ Uss &= 0.0 \\ Usb &= sign(Ucf, \sin((\theta_{C}) + 3.1414 * 2./3.)), \\ if(t.gt.(Lp + abs(\sin(\theta_{C} + 3.1414 * 2./3.))) * Td) \ Usb &= 0.0 \\ Usc &= sign(Ucf, \sin(\theta_{C} - 3.1414 * 2./3.)), \\ if(t.gt.(Lp + abs(\sin(\theta_{C} - 3.1414 * 2./3.)), \\ if(t.gt.(Lp + abs(\sin(\theta_{C} - 3.1414 * 2./3.))) * Td) \ Usc &= 0.0 \\ Lp &= Lp + 1, \end{split}$$

де Um - амплітудне значення напруги синхронного двигуна;

*Ucf* - миттєве значення напруги;

Lp - номер поточного імпульсу перетворювача;

*θс* - фаза заданої напруги синхронного двигуна.

Формування ступеневої або прямокутного трифазної напруги на двигуні з використанням ШІМ реалізується наступним алгоритмом [95, 96]:

$$Usa = sign(Ucf, sin(\theta_{C}));$$
  

$$Usb = sign(Ucf, sin(\theta_{C} + 3, 1414 \cdot 2./3.));$$
  

$$Us\tilde{n} = sign(Ucf, sin(\theta_{C} - 3, 1414 \cdot 2./3.)),$$
  
(4.30)

де Ucf = Um - амплітуда вихідної напруги частотного ШІП;

 $\theta c = \omega_c t$  - фаза задає напруги.

Алгоритм формування трифазної трапецеїдальної напруги (рис. 4.43) здійснюється наступним чином.

Формування трапеції напруги фази А: якщо (*θс*.більше.1.046) то *Usa1=Um* якщо (*θс*.більше.2.092) то *Usa1=Um-(θс-*2.092)\**Um*/1.046 якщо (*θс*.більше.3.141) то *Usa1=-(θс-*3.141)\**Um*/1.046 якщо (*θс*.більше.4.187) то *Usa1=-Um* якщо (*θс*.більше.5.228) то *Usa1=-Um+*(*θс*-5.228)\**Um*/1.046 Формування трапеції напруги фази В: якщо ( $\theta c$ .меньше.1.046) то Usc1=-Um-( $\theta c$ )\*Um/1.046 якщо (*θс*.більше.1.046) то *Usc1=-Um+(θс-*1.046)\**Um*/1.046 якщо (*θс*.більше.2.092) то *Usc1*=(*θс*-2.092)\**Um*/1.046 якщо (*θс*.більше.3.141) то *Usc1=Um-(θс-*3.141)\**Um*/1.046 якщо (*θс*.більше.4.187) то *Usc1=Um-(θс-*4.187)\**Um*/1.046 якщо (*θс*.більше.5.228) то *Usc1=-(θс-*5.228)\**Um*/1.046 Формування трапеції напруги фази С: якщо (*θс.le*.1.046) то *Usb1=Um-(θc)\*Um/*1.046 якщо (*θс*.більше.1.046) то *Usb1=-(θс-1.046)\*Um*/1.046 якщо ( $\theta c.$ більше.2.092) то Usb1=-Um + ( $\theta c$ )Um/1.046 якщо (*θс*.більше.3.141) то *Usb1=-Um+(θс-*3.141)\**Um*/1.046 якщо (*θс*.більше.4.187) то *Usb1*=(*θс*-4.187)\**Um*/1.046 якщо (*θс*.більше.5.228) то *Usb1=Um* Моделювання дискретних властивостей ШП: Usa=usa1; Usb=usb1; Usc=usc1 Usa=sign(Ucf,usa1);

якщо (*t*.більше.(*Lp*+*abs*(*usa1*))\**Td*) то *Usa*=0.0 *Usb*=*sign*(*Ucf*,*usb1*); якщо (*t*.більше.(*Lp*+*abs*(*Usb1*))\**Td*) то *Usc*=0.0 *Usc*=*sign*(*Ucf*,*usc1*); если(*t*.больше.(*Lp*+*abs*(*usc1*))\**Td*) то *Usc*=0.0. Облік періоду дискретності:

якщо (t.більше. $Td^{*}(Lp+1)$ ) то Lp=Lp+1.



Рисунок 4.43 - Формування трапецеїдальної 3-х фазної напруги

## 4.9. Моделювання пуску синхронного двигуна з широтноімпульсним перетворювачем частоти

Моделювання дозволяє отримати перехідні процеси по всіх координатах електроприводу. Залежно від мети досліджень, в першу чергу, необхідно аналізувати координати електроприводу, які можна спостерігати при проведенні лабораторних експериментів [94, 95].

Для об'єктивної оцінки початкові умови та параметри електроприводу повинні бути рівними.

Формування частоти обертання ротора СД при моделюванні реалізується за допомогою алгоритму

$$U_{\rm y} = t \cdot \frac{U_{\rm s}}{{\rm Tem}\pi} \tag{4.31}$$

якщо  $U_{\mathrm{y}} \geq U_{\mathrm{3}}$  то  $U_{\mathrm{y}} = U_{\mathrm{3}}$ 

де  $U_{\rm v}$  - сигнал управління ШІМ

*U*<sub>3</sub> - задана частота обертання.

Результати моделювання пуску СД зі ступеневою зміною напруги живлення та частоти комутації, наведені на рис. 4.44 і 4.45.

Згідно рис. 4.44 середнє значення пускового моменту становить 1,8 від номінального, а час пуску t = 2c. Середнє значення пускових струмів статора і короткозамкненої обмотки при розгоні - 3-х кратні. Використання ШІМ частоти без фільтруючих і регулюючих пристроїв призводить до пульсацій статорних, отже, роторних струмів і моменту. Після включення збудження величина пульсацій модулюється низькими частотними коливаннями, зумовленими коливальними властивостями синхронного двигуна, становить  $\approx 0.7$  номінального моменту. При прямокутному збільшенні навантаження в момент часу t = 6.4c амплітуда пульсацій збільшується при збереженні частоти модуляції.



Рисунок 4.44 - Перехідний процес по швидкості - ω и моменту - *М* при прямокутній трифазній напрузі



Рисунок 4.45 - Перехідний процес по швидкості - ω, струму статора – *I<sub>s</sub>*, струму пускової обмотки – *I<sub>r</sub>* і струму збудження – *I<sub>v</sub>* при трифазній прямокутній формі напруги

Зміна частотіи обертання СД, струмів і моменту при лінійно змінюваному сигналі завдання представлені на рис. 4.46 і 4.47.



Рисунок 4.46 - Перехідний процес по швидкості - ω і моменту - *М* при синусоїдальній напрузі

Середнє значення пускового моменту (рис. 4.46) становить  $\approx 0,9-1,2$ номінального. При цьому час розгону становить t = 3,2c. Струми СД, пульсуючі з модуляцією низької частоти (рис.4.47) з амплітудою 0,4-0,5 номінального струму, обумовлюють пульсації моменту величиною 0,3-0,4 номінального моменту (рис.4.46).



Рисунок 4.47 - Перехідний процес по частоті обертів - ω, струму статора - *I<sub>s</sub>*, струм пускової обмотки - *I<sub>r</sub>* і струм збудження - *I<sub>v</sub>* при синусоїдальній формі напруги

Характер перехідних процесів при трапецеїдальній формі напруги (рис. 4.48, 4.49) мало відрізняється від процесів при прямокутній формі напруги.

Це пояснюється рівнем вищих гармонійних однакових за амплітудою і частотою в вихідній напрузі широтно-імпульсного перетворювача частоти.



Наявність фільтруючих пристроїв дозволяє виключити вплив вищих гармонійних складових на мережу.

Рисунок 4.49 - Перехідний процес по частоті обертів, струму статора,

пускової обмотки і струму збудження при трапецеїдальній формі напруги

Проте все ж, доцільно дослідити споживання електроенергії системою широтно-імпульсний перетворювач частоти - СД при енергоефективних законах управління.

Потужність, споживаємої енергії електромеханічною системою для обраної системи координат, що моделюють перехідні процеси, визначається:

$$ISA = 1.5 \cdot IA; \ ISB = 0.866 \cdot (IB - IC)$$
$$UA = 1.5 \cdot USA; \ UB = 0.866 \cdot (USB - USC)$$
(4.32)
$$P = 3.0 \cdot (UA \cdot ISA + UB \cdot ISB)/2 + RB \cdot I^{2}{}_{B}$$

або

0.4 0.2

0.6

$$P = R_{S} \cdot I_{S}^{2} + R_{r} \cdot I_{r}^{2} + R_{f} \cdot I_{f}^{2} + \omega M.$$
(4.33)

Споживання електроенергії в загальному випадку визначається за формулою:

$$E = \int_0^{T_k} P dt, \qquad (4.34)$$

де Р - потужність споживана синхронним двигуном,

 $T_k$  - час циклу.

Споживання електроенергії розраховується за алгоритмами чисельного інтегрування.

На рис. 4.50 представлені перехідні процеси за чатотою обертів та відносному споживанню електричної енергії за один цикл пуску з навантаженням.



Рисунок 4.50 - Перехідні процеси за частотою обертів ω та споживанням електроенергії

На рис. 4.50 прийняті наступні позначення:  $\omega_{si}$ ,  $\omega_{pr}$ ,  $\omega_{tr}$  - відповідно для синусоїдальної, прямокутної та трапецеїдальної форми фазної напруги, споживана електроенергія  $E_{si}$ ,  $E_{pr}$ ,  $E_{tr}$  - відповідно для синусоїдальної, прямокутної та трапецеїдальної форми фазної напруги

Перехідні процеси в СД з гладким ротором приведені на рис. 4.51 - 4.52.

Перехідні процеси за швидкістю обертання -  $\omega$ , моментом синхронного двигуна - M і споживання електроенергії -  $E_{pt}$  за синусоїдальною рис. 4.51, (а), трапецеїдальної (б) і ступінчастої (в) модуляції фазної напруги показують (рис. 4.51), що при трапецеїдальної та ступінчастої модуляції в кривих моменту проявляються високочастотні складові.



Рисунок 4.51 - Перехідні процеси в синхронному двигуні

Високочастотні складові, обумовлені формою кривої напруги та струму практично не впливають на частоту обертання через момент інерції синхронного двигуна і механізму, але при цьому погіршують енергетичні показники системи та впливають на температурний режим статора і ротора двигуна.



На рис. 4.52 наведені графіки потокозчеплення при модуляції фазної напруги СД.



158

Рисунок 4.52 - Графіки потокозчеплення  $\psi$  при модуляції фазної напруги за синусоїдальної (а), трапецеїдальної (б), ступінчастої модуляцій (в)

Результати розрахунку перехідних процесів по струму статора, накоротко - замкнутої пускової обмотки та обмотки збудження наведені на рис. 4.53.





Рисунок 4.53 - Перехідні процеси струмів двигуна за синусоїдальної модуляції (а), трапецеїдальної форми фазної напруги (б), за ступінчастої форми фазної напруги (в)

Споживання електроенергії менше при синусоїдальній фазній напрузі, не дивлячись на більш тривалий період пуску. При практично однакових показниках перехідних процесів в варіантах прямокутного і трапецеїдального формуваня форм кривих фазних напруг, енергетика трапецеїдального варіанту напруги все ж краща.

## 4.10 Висновки до розділу 4

1. Запропоновані математичні моделі синхронного двигуна адекватно відображають процеси, що протікають у синхронному двигуні, і можуть бути використані для подальших досліджень.

2. Насичення сталі двигуна призводить до виникнення високочастотних коливань, модульованих низькочастотними коливаннями. Амплітуда піків моменту і струмів може досягати 40-90% номінальних значень.

3. Споживання електроенергії при ступінчатому пуску на 30-40% менше, ніж при прямому пуску.

4. Наявність високочастотних складових у струмах двигуна при трапецеїдальній і ступінчастій формі фазної напруги створює додаткові складності при реалізації сигналів зворотних зв'язків, тому що при цьому потрібна наявність фільтрів, що підвищують порядок системи регулювання і знижують швидкодію замкнутої системи регулювання.

5. Математична модель синхронного двигуна в координатах струму статора – потокозчеплення ротора може використовуватися при дослідженні перехідних і сталих процесів у синхронному двигуні та синтезі регуляторів координат.

6. Застосування ШІМ для формування ступеневої або трапецеїдальної напруги, без фільтруючих пристроїв, призводить до пульсацій струму статора з амплітудою 100% - 125% номінального струму. Пульсації моменту

можуть досягати 40% - 60% номінального. Амплітуда низькочастотної модуляції моменту становить 50% - 70%.

7. При формуванні синусоїдальної напруги амплітуда пульсацій струму становить 70%. Амплітуда пульсацій моменту становить 20% - 40%.

8. Пуск синхронного двигуна до синхронної швидкості при синусоїдальній напрузі в 1,5 раза довше, ніж при прямокутній або трапецеїдальній напрузі.

9. Споживання електроенергії при трапецеїдальній напрузі на 10% більше, а при прямокутній – на 15% більше, ніж при синусоїдальній напрузі. Для зниження пульсацій струму доцільно застосувати фільтр між широтноімпульсним перетворювачем частоти і синхронний двигун.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі знайшла свій подальший розвиток теорія аналізу та синтезу синхронних електроприводів з імпульсними системами пуску в напрямку формування енергоорієнтованих пускових характеристик електромеханічних комплексів вентиляторів головного провітрювання шахт.

Отримані в дисертаційній роботі результати теоретичних досліджень, у сукупності своїй, становлять значний вклад у розвиток теорії і практики створення сучасних енергоефективних електромеханічних систем у структурах вентиляторів головного провітрювання шахт на базі синхронних електродвигунів з імпульсними системами пуску.

Виконані дослідження та отримані результати дозволяють сформулювати такі кінцеві висновки:

1. 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 та впровадження в структури електроприводів даних споживачів енергоефективних методів і засобів керування режимами пуску в межах енергоорієнтованих характеристик приводних синхронних двигунів.

2. Обгрунтована й запропонована тактика підвищення енергоефективності функціонування електромеханічних систем, як і всього вентиляційних комплексу систем v цілому, шляхом формування енергоефективних пускових характеристик відповідного i режиму функціонування в їх межах приводних синхронних двигунів дозволяє досягти поставлених енергоорієнтованих цілей.

3. 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, вибирати оптимальний варіант. Запропоновані варіанти математичних моделей синхронного двигуна в складі електромеханічного комплексу для систем обертових і нерухомих координат, що орієнтують по току і потокозчепленню статора, дозволяють 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.

5. Розроблені методи і алгоритми керування пусковими режимами дозволили запропонувати схемотехнічний варіант вихідного LC фільтра модулюючої частоти до виходу ШІМ-ого блоку, що дозволяє мінімізувати масу і об'єм елементів фільтрокомпенсуючого пристрою з відповідною економічною ефективністю.

6. Запропоновано варіант системи збудження синхронних двигунів, що забезпечує високу надійність, модернізовано метод регулювання величини і частоти вихідної напруги циклоконвертора, шляхом роздільного керування цими процесами, дозволяє зменшити перехідні значення струмів до рівнів допустимого при квазі частотному регулюванні.

7. Доведена необхідність сталості опору зовнішнього пускового резистора в колі ротора при частотному пуску синхронної машини та розроблені рекомендації щодо суміщення резисторів пускових і гасіння поля, дозволяє зменшити насичення сталі двигуна, що, в свою чергу, призводять до виникнення високочастотних коливань, модульованих низькочастотними коливаннями, амплітуда піків моменту і струмів без прийняття належних заходів може досягати 40-90% номінальних значень.

8. Отримані в результаті моделювання дані свідчать про наявність високочастотних складових у струмах синхронного двигуна при трапецеїдальній і ступінчастій формі формування фазної напруги і

створюють додаткові складності при реалізації сигналів зворотних зв'язків, так як при цьому потрібна наявність фільтрів, що підвищують порядок системи регулювання і знижують швидкодію замкнутої системи регулювання частотою обертів приводного двигуна. Використання сучасної силової перетворювальної та мікропроцесорної техніки в сукупності з розробленим алгоритмом управління дозволяє реалізувати системи векторного керування для пуску потужних синхронних двигунів без додаткових матеріальних витрат.

9. Отримані розрахункові співвідношення та криві для визначення меж ефективного управління процесом пуску 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. Отримані теоретичні й дослідження, нові патентоспроможні експериментальні схемотехнічні рішення науково-дослідних роботах Криворізького використані В TOB «НВК національного університету передані та Криворіжелектромонтаж» для створення вітчизняного високоефективного i електрообладнання систем управління новими видами шахтних вентиляційних установок. Очікуваний економічний ефект від упровадження становить 3 млн. грн. на рік.

10. Результати досліджень дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті Криворізького національного університету. Сформульовані в дисертаційній роботі наукові положення, рекомендації і висновки є обґрунтованими, базуються на теоретичному аналізі, коректній постановці розв'язуваних наукових завдань, узгодженні розроблених математичних і фізичних моделей з експериментальними результатами досліджень і відомими прототипами, апробацією основних положень і результатів на представницьких конференціях і семінарах.

164

## 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. Boiko, 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 Анормальные 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. *Асинхронизированые синхронные машины*. М.: Энергоатомиздат, 1984.

[27] Техническое описание и инструкция по эксплуатации тиристорных возбудителей 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. Автоматические регулирование возбуждения синхронных двигателей средней мощности на постоянство соѕ  $\varphi = 1$ . Брянск: Брянский ин-т транспортн. Машиностр., 1974.

[35] Ф. Н. Сарапулов, Н. С. Спунов. "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 явнополюсних 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", *Електромашинобудування 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.: Энергоатомизтат, 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. Днепропетровск, 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 системи облегченного запуска синхронних двигателей преобразовательних агрегатов карьерних 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, Lappeenrata 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, <u>https://dx.doi.org/10.5772/intechopen.89420</u>, 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] I.I. 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, c. 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 залізорудних шахт", КНУ, м. Кривий Ріг, № НДР 0116U1788, 2016.

[87] І. Сінчук "Аспекти теорії та практики оцінки електроенергетичної конкурентноспроможності залізорудних 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 залізорудних шахт", Збірник наукових праць Сучасні технології розробки рудних родовищ. Екологоекономічні 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 залізорудних 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 «ХПІ», 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, "Моделювання 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 минеральносырьевой 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., "Developmen of the functional model to control the levels of electricity consumption by underground iron-ore enterprises", Eastern-European Journal of Enterpris Technologies, №6(3), c. 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. Батареєв, "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 криворожсих месторождений богатих железних руд", Металлургическая и горнорудная промышленость Украйны, №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. додатки

Додаток А

Експерементальні дані добового погодинного споживання активної енергії вентиляторами головного провітрювання залізорудних шахт Криворізького регіону

	ш. "Тернівська"		ш.	ш. "Батьківщина"		ш. "Жовтнева"	
			"Гвардійська"				
	Північна-	Флангова-	Північна-Вент	Південна-	Північна-	Північна-	Південна-
	Вент	Вент		Вент	Вент	Вент	Вент
0:00	500	342	1208	922	856	516	432
0:30	500	332	1056	892	832	498	432
1:00	504	342	892	892	814	631	504
1:30	504	328	810	892	832	509	432
2:00	500	324	632	892	813	561	460
2:30	500	320	660	892	814	557	460
3:00	500	316	728	892	814	513	432
3:30	504	288	743	864	832	541	446
4:00	500	288	714	892	840	553	460
4:30	504	292	728	892	832	513	432
5:00	504	298	811	892	840	527	446
5:30	500	320	728	892	840	529	446
6:00	504	346	645	892	822	506	432
6:30	510	370	620	922	840	641	518
7:00	510	446	745	892	822	522	460
7:30	510	442	949	892	832	502	460
8:00	510	454	1082	892	840	520	446
8:30	516	512	1166	892	896	671	518
9:00	516	548	1260	922	840	653	460
9:30	522	648	1219	892	832	735	532
10:00	522	698	1205	892	832	556	490
10:30	516	676	1112	892	821	660	532
11:00	510	666	1044	922	840	634	490
11:30	504	662	1112	892	832	530	460
12:00	504	644	1194	892	832	596	460
12:30	504	620	1127	892	840	492	460
13:00	504	692	1031	892	840	493	460
13:30	510	662	1058	892	832	633	532
14:00	504	658	989	892	822	563	460
14:30	504	644	936	892	814	491	446
15:00	504	458	1020	922	832	500	476
15:30	488	406	991	892	814	542	490
16:00	482	386	881	892	822	550	476
16:30	488	382	867	922	864	531	460
17:00	488	404	786	864	832	531	446
17:30	488	436	732	892	832	483	432
18:00	488	424	718	892	814	489	432
18:30	494	422	747	922	848	611	460
19:00	494	410	650	892	805	651	460
19:30	494	406	772	892	840	622	446
20:00	488	396	814	892	822	534	460
20:30	494	388	746	892	840	534	460
21:00	488	396	829	892	822	547	476
21:30	482	432	829	864	806	507	446
22:00	488	418	1035	892	814	705	518
22:30	494	400	965	892	814	542	446
23:00	488	392	939	892	832	493	432
23:30	488	396	896	892	814	516	432

Таблиця А.1 – Дані добової активної потужності вентиляторами головного провітрювання шахт Криворізького залізорудного басейну (15.01.2018)
	ш. "Тернівська"		ш. "Гвардійська"	ш. "Батьківщина"		ш. "Жовтнева"	
	Північна-	Флангова-	Півціцца Воцт	Південна-	Північна-	Північна-	Південна-
	Вент	Вент	Північна-рент	Вент	Вент	Вент	Вент
0:00	538	936	1180	972	906	782	490
0:30	544	936	1198	972	906	786	504
1:00	538	936	1222	972	914	783	490
1:30	538	922	1220	972	906	781	490
2:00	544	944	1220	972	914	787	504
2:30	538	936	1218	972	922	783	490
3:00	532	936	1220	972	914	781	504
3:30	544	936	1220	972	914	787	504
4:00	538	936	1222	972	906	787	490
4:30	548	936	1214	972	922	785	504
5:00	544	936	1100	972	914	783	504
5:30	544	944	1182	972	913	781	504
6:00	548	936	1186	964	922	785	504
6:30	548	928	1186	964	914	789	504
7:00	554	1116	1186	964	906	904	504
7:30	566	972	1186	972	922	776	504
8:00	576	936	1194	964	914	777	518
8:30	566	936	1210	972	922	781	518
9:00	570	958	1212	972	938	789	518
9:30	570	944	1200	972	938	865	504
10:00	570	950	1190	972	914	820	518
10:30	570	936	1216	972	922	921	504
11:00	566	1000	1212	964	906	838	518
11:30	566	1044	1200	972	914	848	504
12:00	560	936	1182	964	930	846	518
12:30	560	936	1182	972	970	841	532
13:00	560	944	1194	972	962	842	532
13:30	554	928	1208	964	938	840	532
14:00	560	1144	1204	972	921	847	532
14:30	554	928	1206	972	914	840	532
15:00	566	928	1208	964	896	846	532
15:30	538	936	1190	958	906	838	518
16:00	538	950	1180	964	922	847	518
16:30	526	1166	1182	958	914	842	518
17:00	538	958	1184	964	930	852	504
17:30	538	944	1186	972	930	867	504
18:00	544	936	1188	964	922	1011	504
18:30	538	928	1188	972	946	953	504
19:00	548	936	1186	972	954	929	490
19:30	548	950	1188	972	946	1026	518
20:00	548	944	1188	972	922	1035	504
20:30	548	1088	1186	964	922	955	504
21:00	548	928	1186	972	906	849	504
21:30	544	936	1186	972	914	844	518
22:00	544	1130	1188	972	913	937	490
22:30	544	958	1188	964	922	845	504
23:00	544	950	1212	972	906	856	504
23:30	538	944	1222	972	914	851	490

Таблиця А.2 – Дані добової активної потужності вентиляторами головного провітрювання шахт Криворізького залізорудного басейну (15.02.2018)

	ш. "Тернівська"		ш. "Гвардійська"	ш. "Баты	"Батьківщина"		ш. "Жовтнева"	
	Північна-	Флангова-		Південна-	Північна-	Північна-	Південна-	
	Вент	Вент	Північна-рент	Вент	Вент	Вент	Вент	
0:00	526	936	1090	980	996	723	404	
0:30	522	944	1092	980	988	730	404	
1:00	526	950	1098	980	996	730	404	
1:30	526	944	1096	980	1012	733	418	
2:00	522	936	1102	980	980	729	404	
2:30	526	936	1100	980	954	733	404	
3:00	526	958	1100	980	1012	739	404	
3:30	526	950	1100	980	946	735	404	
4:00	526	936	1100	980	969	736	418	
4:30	526	950	1104	980	988	735	404	
5:00	522	936	1100	980	988	739	404	
5:30	516	928	1094	980	996	737	404	
6:00	522	936	1096	980	988	739	404	
6:30	526	936	1094	980	988	739	404	
7:00	488	886	1018	980	906	900	404	
7:30	522	936	1094	980	848	742	404	
8:00	526	944	1098	980	856	728	404	
8:30	522	944	1092	980	840	813	404	
9:00	522	944	1096	980	848	724	404	
9:30	494	900	1088	950	798	632	374	
10:00	522	1138	1088	980	840	866	460	
10:30	522	944	1088	1008	864	866	460	
11:00	516	944	1086	980	922	862	446	
11:30	516	964	1088	980	930	875	446	
12:00	522	958	1086	980	938	968	460	
12:30	516	936	1086	980	914	330	460	
13:00	516	936	1086	980	929	380	460	
13:30	526	1102	1082	980	888	885	476	
14:00	544	944	1084	980	946	1022	460	
14:30	538	928	1082	980	954	874	494	
15:00	544	944	1082	980	930	885	446	
15:30	544	928	1082	980	930	872	460	
16:00	538	936	1082	980	922	880	446	
16:30	544	936	1084	980	930	884	460	
17:00	538	928	1082	980	946	874	446	
17:30	532	928	1084	980	954	882	446	
18:00	516	928	1080	980	880	8/3	460	
18:30	516	928	1082	950	848	882	446	
19:00	516	922	1084	980	880	880	460	
19:30	510	944	1080	980	914	883	446	
20:00	522	944	1000	980	938	885	460	
20:30	520	930	1090	980	954	070	460	
21:00	522	930 1022	1092	980	930	۵/۶ 001	440	
21.50	522	1052	1092	000 200	557 057	001	470	
22.00	520	1035	1000	900	954	271	400	
22.30	520	930	1090	080	902	886	400	
23.00	526	944	1020	260	962	880	460	
23.30	520	544	1000	200	552	000	400	

Таблиця А.3 – Дані добової активної потужності вентиляторами головного провітрювання шахт Криворізького залізорудного басейну (15.03.2018)

	ш. "Тернівська"		ш. "Гвардійська"	ш. "Баты	ківщина"	ш. "Жовтнева"	
	Північна-	Флангова-	Πίρμίμμο Βουτ	Південна-	Північна-	Північна-	Південна-
	Вент	Вент	Північна-рент	Вент	Вент	Вент	Вент
0:00	526	922	1094	1008	930	922	460
0:30	532	950	1092	1008	938	924	446
1:00	526	936	1092	1008	938	924	446
1:30	532	944	1094	1036	930	923	446
2:00	526	950	1092	1008	938	927	446
2:30	532	936	1090	1008	946	929	446
3:00	532	950	1090	1008	946	1029	446
3:30	526	928	1092	1008	954	929	446
4:00	532	922	1092	1008	970	1037	446
4:30	532	1138	1096	1008	970	1079	446
5:00	526	936	1092	1008	906	959	446
5:30	522	950	1090	1008	938	922	446
6:00	526	958	1090	1008	962	925	460
6:30	522	1102	1096	980	938	926	446
7:00	526	964	1094	1008	906	1334	446
7:30	548	994	1096	1008	863	1181	446
8:00	554	928	1096	1008	848	1160	460
8:30	554	994	1090	1008	872	1144	446
9:00	554	922	1090	980	896	1159	446
9:30	548	922	1100	1008	1004	1159	446
10:00	554	1058	1092	1008	954	1159	446
10:30	586	1072	1094	1008	938	1166	446
11:00	554	1124	1090	980	896	937	460
11:30	548	958	1090	1008	988	980	476
12:00	544	936	1096	1008	970	980	460
12:30	544	944	1084	1008	980	892	446
13:00	544	950	1086	980	988	960	476
13:30	544	922	1092	1008	1012	860	460
14:00	548	1094	1090	1008	906	964	476
14:30	548	1094	1092	1008	848	858	460
15:00	544	928	1090	1008	848	858	460
15:30	522	944	1088	980	888	859	460
16:00	522	922	1088	1008	995	858	460
16:30	516	908	1088	1008	996	904	460
17:00	522	928	1084	1008	962	878	460
17:30	522	914	1086	1008	970	924	460
18:00	516	908	1082	980	906	871	460
18:30	522	928	1082	1008	856	869	460
19:00	516	944	1080	1008	888	971	460
19:30	522	1036	1080	980	970	972	460
20:00	516	908	1088	1008	1004	992	476
20:30	526	928	1092	1008	1012	871	476
21:00	526	914	1092	1008	988	865	460
21:30	522	1080	1094	980	996	873	460
22:00	526	936	1090	1008	996	984	460
22:30	532	922	1092	1008	988	867	476
23:00	522	936	1090	1008	888	868	476
23:30	532	936	1092	1008	872	873	476

Таблиця А.4 – Дані добової активної потужності вентиляторами головного провітрювання шахт Криворізького залізорудного басейну (15.04.2018)

	ш. "Тернівська"		ш. "Гвардійська"	ш. "Баты	ківщина"	ш. "Жо	ш. "Жовтнева"	
	Північна-	Флангова-	Πίρυίμμο Βουτ	Південна-	Північна-	Північна-	Південна-	
	Вент	Вент	Північна-рент	Вент	Вент	Вент	Вент	
0:00	510	928	1144	980	848	865	460	
0:30	516	914	1148	980	856	863	460	
1:00	516	936	1148	980	856	866	446	
1:30	516	928	1148	980	848	864	460	
2:00	516	936	1146	980	864	870	446	
2:30	516	936	1146	980	856	868	460	
3:00	516	928	1146	980	856	862	460	
3:30	516	922	1144	980	856	872	460	
4:00	516	950	1142	980	864	869	460	
4:30	516	928	1144	980	839	871	460	
5:00	510	936	1144	980	848	1031	460	
5:30	516	928	1148	980	840	995	446	
6:00	510	928	1148	980	848	905	460	
6:30	510	914	1150	980	848	999	460	
7:00	516	1124	1146	980	856	1002	446	
7:30	526	936	1150	980	864	961	460	
8:00	544	1108	1150	1008	848	941	460	
8:30	538	928	1160	980	848	1022	460	
9:00	538	936	1144	980	848	883	446	
9:30	538	922	1144	980	840	866	460	
10:00	532	922	1144	980	840	868	446	
10:30	532	914	1142	980	840	872	460	
11:00	538	922	1142	980	840	864	460	
11:30	532	928	1142	980	840	874	446	
12:00	532	1066	1142	980	840	946	460	
12:30	526	922	1142	980	831	968	460	
13:00	532	922	1140	980	840	864	460	
13:30	526	944	1142	980	832	868	460	
14:00	526	1052	1142	980	832	959	476	
14:30	526	908	1136	980	832	859	460	
15:00	526	928	1136	980	840	861	476	
15:30	526	928	1140	980	832	853	460	
16:00	526	936	1136	980	840	857	460	
16:30	532	922	1136	980	832	859	476	
17:00	522	922	1138	950	840	857	460	
17:30	504	928	1138	980	832	855	460	
18:00	500	928	1138	980	832	853	476	
18:30	504	928	1138	980	840	859	476	
19:00	504	928	1154	980	840	857	460	
19:30	510	922	1142	980	832	854	476	
20:00	510	914	1144	980	832	858	460	
20:30	510	950	1146	980	847	860	460	
21:00	510	928	1148	980	840	857	476	
21:30	516	1052	1150	980	848	961	460	
22:00	522	994	1150	980	856	857	476	
22:30	516	922	1146	980	848	860	460	
23:00	516	944	1146	980	856	849	476	
23:30	510	928	1146	980	848	858	476	

Таблиця А.5 – Дані добової активної потужності вентиляторами головного провітрювання шахт Криворізького залізорудного басейну (15.05.2018)

	ш. "Тернівська"		ш. "Гвардійська"	ш. "Баты	ківщина"	ш. "Жовтнева"	
	Північна-	Флангова-	Πίρυίμμο Βουτ	Південна-	Північна-	Північна-	Південна-
	Вент	Вент	Північна-рент	Вент	Вент	Вент	Вент
0:00	494	922	1100	994	930	869	476
0:30	500	914	1098	1000	922	897	460
1:00	500	914	1102	1000	938	972	476
1:30	500	914	1106	1000	938	884	460
2:00	500	928	1102	994	962	1070	460
2:30	504	922	1100	1008	962	1008	476
3:00	500	922	1100	1000	953	1036	460
3:30	500	928	1100	1008	946	1008	476
4:00	500	922	1106	1000	946	1043	460
4:30	488	958	1100	1008	930	1001	460
5:00	494	1072	1104	1000	896	873	460
5:30	494	900	1102	1000	938	869	446
6:00	500	914	1098	1000	946	864	460
6:30	494	1094	1102	1008	946	948	460
7:00	494	958	1100	1000	896	912	460
7:30	504	928	1106	1000	832	880	460
8:00	510	914	1118	1000	822	859	460
8:30	526	922	1138	1000	840	859	460
9:00	532	1016	1140	1008	880	970	460
9:30	532	950	1134	1000	848	885	476
10:00	526	1080	1100	1008	856	945	460
10:30	522	950	1108	1000	840	959	460
11:00	522	1088	1140	1000	831	871	476
11:30	516	1000	1128	1000	806	875	476
12:00	516	1030	1104	1008	840	887	476
12:30	516	914	1098	1000	848	877	460
13:00	522	908	1096	1000	954	865	476
13:30	516	1052	1120	1000	938	881	460
14:00	516	928	1132	1000	930	955	476
14:30	516	908	1132	1000	930	865	460
15:00	516	908	1124	1000	872	857	476
15:30	516	922	1130	1000	906	855	460
16:00	510	944	1116	1000	914	855	476
16:30	488	914	1094	1000	922	901	460
17:00	488	908	1096	994	938	871	476
17:30	488	908	1096	1000	922	881	460
18:00	494	900	1096	1000	914	875	460
18:30	488	914	1092	1000	896	943	476
19:00	488	922	1092	994	848	873	460
19:30	494	914	1094	1000	872	867	460
20:00	494	914	1096	1000	929	1042	460
20:30	500	914	1102	1000	930	1027	460
21:00	500	908	1100	1000	946	863	460
21:30	504	1102	1104	1000	954	864	460
22:00	500	922	1100	1008	954	853	460
22:30	500	914	1098	1000	930	856	460
23:00	500	914	1100	1000	930	861	460
23:30	500	922	1098	1000	922	871	460

Таблиця А.6 – Дані добової активної потужності вентиляторами головного провітрювання шахт Криворізького залізорудного басейну (15.06.2018)

	ш. "Тернівська"		ш. "Гвардійська"	ш. "Баты	ківщина"	ш. "Жовтнева"	
	Північна-	Флангова-	Πίρυίμμο Βουτ	Південна-	Північна-	Північна-	Південна-
	Вент	Вент	Північна-рент	Вент	Вент	Вент	Вент
0:00	488	800	1180	950	780	715	432
0:30	488	784	1182	944	772	723	432
1:00	494	792	1180	944	772	842	432
1:30	494	814	1178	936	781	866	446
2:00	494	800	1182	958	788	968	504
2:30	494	806	1182	944	772	734	446
3:00	504	820	1182	944	780	854	504
3:30	494	842	1184	964	796	832	432
4:00	494	936	1182	964	788	911	460
4:30	488	922	1182	958	780	917	446
5:00	488	814	1180	958	780	843	432
5:30	478	836	1180	972	780	757	446
6:00	472	806	1180	1000	772	734	432
6:30	472	792	1182	1000	772	784	460
7:00	472	922	1182	994	780	826	432
7:30	466	814	1182	994	722	759	446
8:00	472	814	1180	1000	122	840	460
8:30	472	800	1178	1016	154	728	418
9:00	472	806	1182	1000	138	847	460
9:30	472	886	1180	1016	139	751	446
10:00	466	872	1176	1000	122	715	432
10:30	466	936	1178	1000	122	809	446
11:00	472	800	1176	994	123	797	446
11:30	466	814	1176	994	139	769	432
12:00	466	856	1176	1000	130	716	418
12:30	466	792	1174	1000	123	836	490
13:00	472	792	1172	1008	131	701	418
13:30	472	792	1172	1016	115	703	418
14:00	466	892	1170	1008	114	829	418
14:30	466	784	1170	1000	107	707	418
15:00	466	792	1172	1016	106	721	432
15:30	466	800	1172	1036	107	702	432
16:00	466	792	1172	1008	115	706	418
16:30	466	806	1176	1000	114	738	432
17:00	466	792	1172	1030	115	702	432
17:30	466	784	1172	1000	114	701	432
18:00	466	784	1172	994	123	701	432
18:30	466	792	1174	1066	139	709	418
19:00	466	784	1180	1008	115	703	418
19:30	466	800	1178	1008	123	721	418
20:00	466	806	1178	1008	131	701	418
20:30	466	806	1178	1008	139	849	490
21:00	466	806	1188	1000	131	706	418
21:30	472	792	1188	964	831	698	418
22:00	472	792	1190	944	749	730	446
22:30	478	800	1188	944	749	851	490
23:00	478	800	1182	944	757	715	432
23:30	472	814	1180	944	749	716	432

Таблиця А.7 – Дані добової активної потужності вентиляторами головного провітрювання шахт Криворізького залізорудного басейну (15.07.2018)

	ш. "Тернівська"		ш. "Гварлійська"	ш "Батьківшина"		ш. "Жовтнева"	
	Північна-	Флангова-	F	Півленна-	Північна-	Північна-	Півленна-
	Вент	Вент	Північна-Вент	Вент	Вент	Вент	Вент
0:00	412	836	1112	792	773	688	360
0:30	412	756	1112	814	797	652	360
1:00	406	748	1112	792	781	765	360
1:30	412	756	1108	800	781	633	346
2:00	412	764	1110	792	781	616	346
2:30	412	764	1112	806	797	616	346
3:00	412	742	1110	792	789	614	360
3:30	412	742	1112	936	937	622	360
4:00	416	756	1114	806	805	620	360
4:30	412	748	1116	814	797	634	360
5.00	406	748	1112	936	929	693	374
5.30	406	748	1112	806	789	686	374
6.00	406	756	1112	814	795	622	360
6.30	428	748	1350	784	780	698	388
7.00	428	800	1362	792	707	683	360
7:30	420	748	1352	800	699	746	360
8.00	434	740	1358	886	723	740	360
8.30	434	756	13/2	872	723	801	360
0.50	434	730	1176	864	725	027	300
9.00	420	742	1120	804	789	79/	360
10.00	422	942	1130	072	705	912	260
10.00	420	042	1110	072	790	770	300
11.00	420	850	1110	072	709 921	910	300
11.00	422	749	1120	072	780	802	274
12:00	420	740 940	1110	072	769	002	374
12.00	422	800	1110	004	790	1141	470
12.50	410	742	1114	864	790	011	300
12.00	400	742	1120	004 964	805 797	502	490
13.50	400	770	1120	864	707		374
14:00	406	742	1110	872	738	777 F00	388
14:30	412	734	1116	872	706	590	360
15:00	412	742	1120	864	722	610	374
15:30	400	750	1128	804	772	582	360
10:00	406	742	1122	878	780	674	374
17:00	406	794	1130	٥/٥ ٥٢ <i>٢</i>	790	<u>۲ ک</u> م	360
17.00	400	764 956	1112	020	700	595 715	260
10.00	400	020	1112	0/0	/00 772	616	260
10:00	400	142	1110	850 864	700	640	360
10:00	406	<u>804</u>	1110	804	705	640	300
19:00	406	/50	1110	850	/05	649	3/4
19:30	406	764	1114	856	697	615	360
20:00	412	764	1120	8/2	/14	612	360
20:30	416	/56	1126	864	/13	601	360
21:00	416	/56	1126	8/2	/21	699	404
21:30	412	/48	1126	878	/13	/16	374
22:00	412	/48	1124	872	/07	896	476
22:30	412	748	1290	864	699	593	346
23:00	412	748	1362	856	707	663	374
23:30	412	756	1362	856	699	616	360

## Таблиця А.8 – Дані добової активної потужності вентиляторами головного провітрювання шахт Криворізького залізорудного басейну (15.07.2018)

	ш. "Тернівська"		ш. "Гвардійська"	ш. "Баты	ківщина"	ш. "Жовтнева"	
	Північна-	Флангова-	Πίρυίμμο Βουτ	Південна-	Північна-	Північна-	Південна-
	Вент	Вент	Північна-рент	Вент	Вент	Вент	Вент
0:00	538	936	1180	972	906	782	490
0:30	544	936	1198	972	906	786	504
1:00	538	936	1222	972	914	783	490
1:30	538	922	1220	972	906	781	490
2:00	544	944	1220	972	914	787	504
2:30	538	936	1218	972	922	783	490
3:00	532	936	1220	972	914	781	504
3:30	544	936	1220	972	914	787	504
4:00	538	936	1222	972	906	787	490
4:30	548	936	1214	972	922	785	504
5:00	544	936	1100	972	914	783	504
5:30	544	944	1182	972	913	781	504
6:00	548	936	1186	964	922	785	504
6:30	548	928	1186	964	914	789	504
7:00	554	1116	1186	964	906	904	504
7:30	566	972	1186	972	922	776	504
8:00	576	936	1194	964	914	777	518
8:30	566	936	1210	972	922	781	518
9:00	570	958	1212	972	938	789	518
9:30	570	944	1200	972	938	865	504
10:00	570	950	1190	972	914	820	518
10:30	570	936	1216	972	922	921	504
11:00	566	1000	1212	964	906	838	518
11:30	566	1044	1200	972	914	848	504
12:00	560	936	1182	964	930	846	518
12:30	560	936	1182	972	970	841	532
13:00	560	944	1194	972	962	842	532
13:30	554	928	1208	964	938	840	532
14:00	560	1144	1204	972	921	847	532
14:30	554	928	1206	972	914	840	532
15:00	566	928	1208	964	896	846	532
15:30	538	936	1190	958	906	838	518
16:00	538	950	1180	964	922	847	518
16:30	526	1166	1182	958	914	842	518
17:00	538	958	1184	964	930	852	504
17:30	538	944	1186	972	930	867	504
18:00	544	936	1188	964	922	1011	504
18:30	538	928	1188	972	946	953	504
19:00	548	936	1186	972	954	929	490
19:30	548	950	1188	972	946	1026	518
20:00	548	944	1188	972	922	1035	504
20:30	548	1088	1186	964	922	955	504
21:00	548	928	1186	972	906	849	504
21:30	544	936	1186	972	914	844	518
22:00	544	1130	1188	972	913	937	490
22:30	544	958	1188	964	922	845	504
23:00	544	950	1212	972	906	856	504
23:30	538	944	1222	972	914	851	490

Таблиця А.9 – Дані добової активної потужності вентиляторами головного провітрювання шахт Криворізького залізорудного басейну (15.02.2018)

# Рисунки А.1 Споживання активної електричної енергії вентиляторами головного провітрювання на 15 січня 2018 р. шахт Криворізького залізорудного басейну



ш. "Тернівська"







Рисунки А.2 Споживання активної електричної енергії вентиляторами головного провітрювання на 15 лютого 2018 р. шахт Криворізького залізорудного басейну





ш. "Гвардійська"





Рисунки А.3 Споживання активної електричної енергії вентиляторами головного провітрювання на 15 березня 2018 р. шахт Криворізького залізорудного басейну



ш. "Гвардійська"





ш. "Жовтнева"











































ш. "Гвардійська"







ш. "Батьківщина"





## ш. "Гвардійська"







Додаток Б

Порівняльний аналіз систем пуску синхронних електричних двигунів в складі електромеханічних комплексів Додаток Б.1. Асинхронний пуск. Найпоширенішим способом пуску потужних синхронних двигунів є той, який здійснюється безпосереднім підключенням обмоток статора до мережі з повною напругою (прямий пуск).

Незважаючи на те, що прямий пуск є простим і економічним варіантом, він має досить серйозні недоліки. В ході прямого асинхронного пуску в роторах двигунів великої потужності виділяється значна кількість енергії, що призводить до значного нагрівання ротора. Температура стрижнів пускової клітки в процесі пуску може досягати декількох сотень градусів, причому різні стрижні можуть нагріватися нерівномірно. У цих умовах через теплових деформацій пусковий кліті можуть виникнути обриви стрижнів, що призводить до погіршення умов пуску і розвитку аварій двигунів.

Зі збільшенням синхронних швидкостей СД ускладнюється можливість розташування в полюсах стрижнів пускової обмотки з достатньою для уникнення перегріву теплоємністю. У зв'язку з цим виникає проблема охолодження пусковий клітини в процесі пуску.

Нарешті, асинхронний пуск декількох потужних СД одночасно може викликати неприпустиме погіршення якості електроенергії в енергосистемі, від якої здійснювався пуск цих машин. При цьому можуть бути значно знизився рівень величини напруги, що подається іншим споживачам. Серйозним недоліком цього способу пуску є також та обставина, що при цьому запускаємі двигуни відчувають значні електродинамічні і механічні зусилля, що знижують термін служби ізоляції внаслідок її надмірної деформації.

Реакторний пуск. Одним з варіантів вирішення проблеми теплових перевантажень, надмірних електродинамічних впливів на СД і погіршення показників якості електричної енергії є асинхронний пуск потужних СД через реактори, або від зниженої напруги. Однак розрахунками і експериментальними дослідженнями було встановлено, що такий спосіб

пуску практично незначною мірою зменшує кількість виділеного в роторі тепла. Це обумовлено тим, що енергія втрат пропорційна запасу кінетичної енергії двигуна.



Рисунок Б.1 – Схема пуску синхронного двигуна за допомогою пускових реакторів.

Р – пусковий реактор, QF1 - вимикач, QF2 - шунтуючий вимикач,

СД – синхронний двигун

Таким чином, незважаючи на зниження впливу пускового режиму на енергосистему, проблема теплового перегріву ротора залишається невирішеною. Економічно пуск надпотужних СЕД від зниженої напруги являє собою найбільш дорогий спосіб пуску.

пуск СД. Автотрансформаторний Автотрансформатор знижує СД пропорційно коефіцієнту трансформації; при цьому напругу на пропорційно споживаний від мережі струм зменшується квадрату коефіцієнта трансформації. При застосуванні пускового автотрансформатора в системи значно зменшується споживаний від мережі струм при невеликому зниженні пускового моменту.



Рисунок Б.2 – Схема пуску синхронного двигуна за допомогою автотрансформатора.

AT - автотрансформатор; QF1 - вимикач; QF2 – шунтуючий вимикач; QF3 - вимикач, який замикає кінці обмоток в нейтральну точку.

Полегшений пуск СД **3a** допомогою розщепленої обмотки збудження (РОЗ). В був запропонований варіант пуску потужних СД з підвищеною величиною моменту рушання за рахунок удосконалення конструкції СД і більш ефективного використання в пускових режимах обмотки збудження. Суть полягає в використанні так званої спеціальної розщепленої обмотки збудження (РОЗ). При дотриманні деяких умов використання РОЗ дозволяє пусковий момент СД збільшити в 2,5 рази при збільшенні пускового струму всього лише на кілька відсотків Так як пускові струми СД в даній системі залишаються як і раніше досить великими, то, враховуючи довжину кар'єрних мереж, застосування цього способу в екскаваторному електроприводі не дозволить усунути значні зниження напруги в мережі.

Полегшений пуск СД за допомогою ємнісного накопичувача енергії (ЄНЕ) в обмотці збудження. В досліджувалося питання поліпшення умов пуску потужних СД за допомогою застосування ємності в цінуй обмотки збудження. В ході прямого пуску СД ємність заряджалась струмом, що наводяться ОЗ, і розряджалася за допомогою тиристорів таким чином, щоб здійснювалася місткість компенсація індуктивного опору ОЗ. Це забезпечує збільшення електромагнітного моменту, створюваного безпосередньо ОЗ. В діапазоні ковзань від 1 до 0,6 момент двигуна підвищується до величин 1,15 -1,2 Мкр. Для обмеження максимального струму статора встановлюється імпульсний регулятор напруги (тиристорний, транзисторний або змішаний), охоплений негативним зворотним зв'язком по струму. Недоліком такої системи є застосування перетворювачів значною встановленої потужності з метою вирішення допоміжної задачі струмо обмеження.

# Частотний пуск за допомогою електромашинних перетворювачів частоти за схемами «АД - СД», «СД - АД» і «АД - АД».

Ці системи в основному призначені для пуску одиничних генераторів двигунів електростанцій в тому випадку, якщо є в наявності електромашинні перетворювач частоти з одного із зазначених вище схемою з'єднання електромашин.

Цей спосіб також можна віднести до застарілих, а для електроприводів середньої потужності дорогим і неефективним.

Безпосередній або каскадний пуск за допомогою допоміжного розгінного АД. Здійснюється при з'єднанні механічно (безпосередній пуск) або електрично (каскадний пуск) при розгоні СД при допомозі АД, так що через відсутність останнього в складі екскаваторного електроприводу цей спосіб пуску, так само, як і при використанні електромашинних перетворювачів частот, виключається з подальшого розгляду.

Пуск за допомогою допоміжного розгінного ДПС з реакторних випрямним пристроєм (РВП). При підключенні МПС за допомогою Q2 до діодного випрямляча в колі постійного струму виникне режим короткого замикання. Струм короткого замикання обмежиться сумою опорів МПТ, діодного випрямляча, трансформатора *Тр* і реакторів *Др*. Індуктивний опір реакторів підібрано таким, щоб струм якоря не перевищив гранично допустимої за умовами технічної експлуатації МПС величини. Коли збуджена МПС починає розкручуватися, пусковий струм через наростання протидії Е.Р.С. в колі якоря впадає. Це викликає зменшення падіння напруги на реакторах, що знову призводить до збільшення напруги на затискачах випрямляча, а значить, і струму розгону. Цей процес закінчується тоді, коли в якірного кола встановиться струм холостого ходу, який визначається моментом опору на валу. Перевагою даної системи є її простота і відсутність необхідності формування струмообмеження в якірному колі. До недоліком слід віднести те, що механічна характеристика МПС може виявитися занадто м'якою. Це призведе в кінці пуску до занадто великої величини ковзання ротора СЕД щодо кругового поля статора. Для подальшого розгону може знадобитися ослаблення потоку, що дещо ускладнить систему.

Пуск за допомогою допоміжного розгінного ДПТ в системі «керований випрямляч - двигун» (УВ-Д). Переваги таких систем електроприводу загальновідомі висока плавність регулювання з надійним контролем максимальних значень будь-яких необхідних координат приводу. На малюнку приведені наступні позначення: ГР - гальванічна розв'язка, Тр трансформатор, СІФУ - система імпульсно-фазового управління, ОЗ обмотка збудження,  $U_{3u}$  - напруга завдання швидкості приводу. Схема працює в такий спосіб. При включенні вимикача Q2 і наявності живлення в обмотці збудження в якірного кола розпочнеться процес наростання струму, з одночасним розкручуванням СД. Після виходу величини струму якоря із зони нечутливості однойменного елемента замикається контур негативного зворотного зв'язку по струму, що обмежує величину пускового струму МПС з допустимому рівні. Надалі розгін агрегат відбувається практично з постійною величиною струму МПТ яка потім спадає до значення струму холостого ходу на під синхронних швидкостях. Після закінчення розжени СД за допомогою вимикача *Q1* включається в мережу асинхронним способом, щоб потім методом самосинхронізації при подачі збудження втягнутися в синхронізм. Як відомо з і буде показано далі, самосинхронізація СД з мережею при певних умовах може призвести до появи струмів включення, порівнянних з пусковими струмами СД при прямому асинхронному пуску, що може несприятливо вплинути на режим мережі живлення.

Частотно-імпульсний пуск синхронних двигунів за допомогою TPH. Оригінальним є спосіб пуску потужних СД, названий частотноімпульсним (рис. Б.З). Живлення СД здійснюється від звичайного регулятора напрути (TPH), керованого датчиком положення ротора ДПР. В обмотку якоря збудженої машини безпосередньо від мережі через тиристори пропускаються поодинокі імпульси струму. Моменти відкриття тиристорів узгоджені з положенням ротора, а їх закриття відбувається природним шляхом. Ці імпульси струму, взаємодіючі з потоком збудження ротора, створюють імпульси крутного моменту. Середній крутний момент серії імпульсів перевищує момент опору навантаження, і ротор набуває прискорення. Параметри імпульсів - тривалість, площа, стан, шпаруватість плавно задаються зміною кута відмикання тиристорів ТРН. Для формування постійного динамічного моменту синхронної машини в процесі її розгону використовується замкнута система з регулятором струму, що також дозволяє обмежити пусковий струм.

Ця система має значні переваги: синхронізація з мережею по досягненні синхронної частоти обертання здійснюється природним чином, проте в нинішньому етапі розвитку елементарної бази напівпровідникових приладів не можна зарахувати до числа ефективних.



Рисунок Б.3 – Схема СД частотно - імпульсним способом пуску

Частотний пуск від перетворювача частоти за схемою вентильного двигуна (ВД). Для пуску СД за схемою ВД синхронний двигун повинен додатково оснащуватися перетворювачем частоти з ланкою постійного струму, керованим в функції сигналу датчика положення ротора (ДП). Схема пуску по схемі вентильного двигуна з датчиком положення ротора має такі переваги:

- помірний пуск при будь-якому початковому положенні ротора;

- можливість струмообмеження на будь-якому рівні;

 висока плавність пуску при невеликих пульсаціях електромагнітного моменту;

- відсутність перенапруг в колі обмотки збудження при пуску;

- можливість реалізації управління точної синхронізацією СД з мережею живлення.

До недоліків цього варіанту пуску слід віднести наступні:

- висока вартість перетворювача, що робить економічно невигідним його використання тільки для вирішення завдання пуску СД;

- необхідність висококваліфікованого обслуговування, що значно здорожує поточні витрати на його обслуговування;

- необхідність монтажу датчика положення ротора на валу СД.



Рисунок Б.4 – Схема СД – частотний пуск від перетворювача частоти за схемою ВД

Додаток Б.2. Технічні параметри типового синхроного електродвигуна вентилятору головного провітрювання залізорудних шахт для моделювання резних варіантів пуску: потужність SH = 1600 кВт з лінійною напругою живлення 6600 В з наступними параметрами схеми заміщення: синхронним  $X_d = 1.56$ , перехідним  $X'_d = 0.296$ , і сверхперехідним  $X''_d = 0.177$ , опорами синхронного електричного двигуна по осі d, а також синхронним і сверхперехідним опорами  $X_q = 1.06$ ,  $X''_q = 0.177$ , опорами СД по осі q i опором розсіювання статора  $X_1 = 0.052$  постійні часу демпферного обмотки по осі d: перехідна  $T'_d = 3.7$  с, сверхперехідним  $T''_d = 0.05$  с, і сверхперехідним по осі q постійна часу  $T''_{q0} = 0.05$  с, активним опором фази статора  $R_s = 0.0036$  в.о.. Додаток В Акти впровадження результатів досліджень

#### ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор ТОВ «НВК Криворіжелектромонтаж» Кулемін В. В. 3 OFMEKEHOIO BIDIOBIDADENICT ных криворижелектромонтажу. Кривий Ріг Ідентифікаційний код 39472860 97 березня 2020 р. DOBCHKS АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Пересунька Ігоря Ігоровича «Формування енергоорієнтованих пускових характеристик синхронного електропривода вентиляторів головного провітрювання шахт» в практику роботи ТОВ «НВК Криворіжелектромонтаж»

ТОВ «НВК Криворіжелектромонтаж» – провідне спеціалізоване підприємство криворізького регіону по проектуванню, монтажу та налагодженню систем електропостачання гірничорудних підприємств з втіленням в їх структури комплексів електроприводів стаціонарних установок.

У зв'язку з цим підприємство веде постійний пошук нових сучасних і перспективних розробок для втілення їх в практику своєї роботи по розробці систем енергоефективного керування рівнями споживання електричної енергії як окремими енергоємними споживачами так і гірничорудними підприємствами вцілому.

У такому варіанті діяльності підприємства цікавими виглядають результати досліджень Пересунька І. І., які викладені в дисертаційній роботі «Формування енергоорієнтованих пускових характеристик синхронного електропривода вентиляторів головного провітрювання шахт». Проектувальники та розробники комплексів систем електропостачання підприємств ТОВ «НВК Криворіжелектромонтаж», згідно пропозицій Пересунька I. I., використовують наступні доробки його дисертаційної роботи:

 методологію щодо підвищення енергоефективності гірничорудних підприємств шляхом застосування енергоефективних видів електроприводів для стаціонарних установок шахт, в т. ч. для головних вентиляційних установок;

– схемні рішення систем плавного пуску високовольтних синхронних двигунів;

 математичні моделі для дослідження рівнів ефективності систем пуску синхронних двигунів в різних схемотехнічних варіантах.

Очікуваний економічний ефект від впровадження таких систем, в середньому, може скласти близько 3 млн. грн. в рік (в цінах 2020 р.) на одне гірничорудне підприємство – шахту.

Начальник виробничого відділу

Северенчук П. П.

Начальник фінансового відділу

Ніконенко І. А.

Начальник проектно-конструкторського відділу

Літвяк В. Г.
## ЗАТВЕРДЖУЮ: Проректор з наукової роботи Криворізького національного університету д.т.н., проф. Моркун В. С. 2020

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Пересунька Ігоря Ігоровича «Формування енергоорієнтованих пускових характеристик синхронного електропривода вентиляторів головного провітрювання шахт»

Комісія у складі голови декана Електротехнічного факультету, доцента Федотова В. О., членів комісії: завідувача кафедри АЕСПТ, професора Сінчука О. М., доцента Філіппа Ю. Б., склала цей акт про впровадження у навчальний процес результатів дисертаційної Пересунька Ігоря Ігоровича «Формування енергоорієнтованих пускових характеристик синхронного електропривода вентиляторів головного провітрювання шахт» шляхом впровадження до: лекційного курсу матеріалів дисертаційних досліджень для навчального курсу «Електропривод типових виробничих механізмів».

Для забезпечення впровадження матеріалів дисертаційних досліджень були використані наступні складові дисертаційної роботи Пересунька Ігоря Ігоровича:

## до лекційного курсу:

- структури та алгоритми керування пуском синхронного електропривода вентиляторів головного провітрювання;
- математичні моделі з покроковою зміною напруги та частоти при запуску синхронного електропривода вентиляторів головного провітрювання;
- методологію щодо підвищення енергоефективності гірничорудних підприємств при модернізованого методу пуску синхронного електропривода вентиляторів головного провітрювання;

## до лабораторних занять:

створення лабораторного стенда дослідження характеристик для електроприводів вентиляторів в лабораторії: «Електропривод типових виробничих механізмів».

Комісія встановила відповідність впроваджених результатів вимогам проведення лабораторних та практичних занять при підготовці студентів за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка, та електромеханіка».

Голова комісії:

Декан електротехнічного факультету, к.т.н., доц.

Члени комісії:

В.о. завідувача навчально методичного відділу

Завідувач каф. «АЕСПТ», д.т.н., проф.

Доцент каф. «АЕСПТ», к.т.н., доц.

В.О. Федотов



С.Л. Івашура О.М. Сінчук Ю.Б. Філіпп

Додаток Г Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів 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 залізорудних 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 – PEMS 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) Е21С41/16, №147076 UA, опубліковано Квіт.08, 2021.