

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

ПЕРЕСУНЬКО ІГОР ІГОРОВИЧ

УДК: 621.313-57, 621.313.32

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

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2021

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана у Криворізькому національному університеті, Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Сінчук Ігор Олегович,
Криворізький національний університет,
доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем
в промисловості та транспорті

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Мазуренко Леонід Іванович,
Інститут електродинаміки НАН України,
завідувач відділу електромеханічних систем

кандидат технічних наук, доцент
Розводюк Михайло Петрович,
Вінницький національний технічний університет,
доцент кафедри електромеханічних систем автоматизації
в промисловості і на транспорті

Захист відбудеться «23» вересня 2021 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий «20» серпня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В. В. Кулик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Технологія ведення робіт з видобутку корисних копалин у підземних умовах нероздільна з необхідністю вентиляції гірничих виробок. Цей процес реалізується вентиляторами головного провітрювання (ВГП) і частково вентиляторами місцевого дільничного функціонування. Згідно розподілення функцій ВГП залізородних шахт, забезпечують повітрям більше 90% підземних виробок.

При цьому, опосереднена частка витрат на провітрювання в собівартості видобутку залізородної сировини (руди) у шахтах постійно зростає і на період 2020 року дорівнювала 25%.

Обґрунтування вибору теми дослідження. ВГП відносять до класу енергоємних споживачів електричної енергії (ЕЕ) залізородних шахт. Як правило, вони обладнуються 2-ма агрегатами із синхронними електродвигунами, потужність котрих сягає від 600 до 1600 кВт. На даний період часу привідні електроприводи в складі електромеханічних комплексів (ЕМК) ВГП залізородних шахт обладнані нерегульованими, морально застарілими видами, що являють собою енергонеефективні комплекси, які не дозволяють вирішити на необхідному рівні проблему підвищення енергоефективності цих енергоємних споживачів ЕЕ.

Згідно такого стану, якщо на період 1990 року підземні залізородні підприємства України на вентиляцію витрачали до 15% від усього загального споживчого обсягу електричної енергії, то в період 2015 – 2020 років ця цифра сягнула 30%. Цей показник має тенденцію до зростання, оскільки глибини видобутку ЗРС збільшуються і потреби в обсягах повітря для провітрювання підземних виробок зростають. Більше того, уже на період 2015 року реальні обсяги повітря, котре надходить у виробки залізородних шахт України, не відповідали встановленим нормам.

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 безаварійності функціонування ВГП в цілому і їх електромеханічного комплексу в тому числі. В свою чергу, надійність електромеханічної системи ВГП залежить від надійності роботи СД, що, у свою чергу, в значній мірі визначається надійністю функціонування головного збудника двигуна і кількістю його пусків. Встановлено, що близько 70% від загальної кількості відмов СД є результатом руйнування його пускової обмотки. Незважаючи на той факт, що в загальній гамі кількості електричних двигунів (ЕД), що ремонтуються, в результаті їх експлуатації в залізородних шахтах, СД становлять близько 20%, але в матеріальних витратах підприємств на їхній ремонт суми в десятки разів перевищують витрати на ремонт усіх інших разом взятих типів ЕД.

Таким чином, створення схемотехнічних рішень і методів формування пускових характеристик є одним із важливих завдань у системі електроприводів вентиляторів головного провітрювання гірничорудних підприємств. Тим більше, що на сьогодні в електромеханічних комплексах ВГП вітчизняних шахт

встановлені та застосовується системи прямого пуску СД, що несе в собі системоутворюючі недоліки:

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

Все це створює комплекс негативних проблем як у 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 більшості існуючих систем регулювання синхронного електропривода ВГП обмежені, оскільки цей процес здійснюється тільки за системою збудження СД, тобто шляхом зміни величини статорної напруги, але не його частоти. Така система збудження СД енергетично малоефективна і громіздка в об'ємі, що теж є вагомим негативом для умов шахт.

Окрім цього, як черговий одіозний ефект систем, відзначимо такий факт, як недостатня ефективність компенсації реактивної потужності в шахтних електричних мережах, де саме високовольтні СД в комплексі електромеханічних систем ВГП є основним засобом для її компенсації.

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

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст роботи базується на результатах досліджень, що проводились на кафедрі автоматизованих електромеханічних систем у промисловості та транспорті Криворізького національного університету у відповідності до наукового напрямку „Розроблення комплексу заходів по енергозбереженню на підприємствах залізорудної промисловості”. Результати дисертаційної роботи одержано під час виконання НДР „Розроблення комплексу заходів з енергозбереження на підприємствах залізорудної промисловості” (№ НДР 0114U003457); НДР „Розроблення енергозберігаючих заходів на підприємствах гірничодобувної промисловості” (№ НДР 0115U003180); НДР „Спосіб зниження струмів витоку в електричних комбінованих мережах залізорудних шахт” (№ НДР 0116U1788); НДР „Аспекти теорії та практики оцінки електроенергетичної конкурентоспроможності залізорудних підприємств” (№ НДР 0118U006520). 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”.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної 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.

Відповідно до вказаної в роботі мети вирішуються такі **основні 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 і частоти вихідної напруги;

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

Об'єктом 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.

Предметом дослідження є енергоорієнтовані пускові характеристики синхронного електропривода вентиляторів головного провітрювання шахт.

Методи дослідження. Теоретичні положення дисертаційної роботи засновані на складових теорій електропривода та напівпровідникової перетворювальної техніки. Для аналізу електромагнітних процесів синхронного електропривода використано елементи математичного аналізу. Аналіз електромагнітних процесів у колі синхронного електричного двигуна з вентиляторним навантаженням проведено із залученням методів математичного та фізичного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що:

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

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

– досліджено електромеханічні процеси і запропоновано метод роздільного регулювання величини і частоти вихідної напруги багаторівневого перетворювача

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

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

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: [1] – показано вплив відхилень напруги в межах від - 10% до + 10% на роботу електропривода стаціонарних установок гірничорудних підприємств; [2] – запропоновано спосіб роздільного керування напругою і частотою при пуску потужного синхронного електропривода за допомогою багаторівневого перетворювача частоти; [3] – 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; [4] – підвищення енергоефективності залізородних шахт шляхом упровадження регульованого електроприводу вентилятора головного провітрювання, розглянуто можливість застосування багаторівневих каскадних схем інверторів; [5] – 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; [6] – досліджено споживанням електроенергії стаціонарними установками на залізорудних шахтах; [7] – 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, створення умов для максимально можливої продуктивності електромеханічних систем гірничих машин і механізмів, організаційні заходи; [8] – показано актуальність автоматизованого управління енергетичними потоками в умовах підземного видобутку залізної руди. Визначено вектор стану об'єкта, основні інформаційні параметри, керуючий вплив та обурення; [9] – при моделюванні проведено дослідження прямої системи пуску та пуску з покровою зміною величини напруги і частоти й отримано експериментальні дані для оцінювання енергоефективності варіативних методів пуску електроприводів синхронного електропривода головних вентиляторних установок шахт; [10] – проведено моніторинг електропостачання гірничорудних підприємств із застосуванням економіко-математичних методів, що дозволило оцінити і спрогнозувати зміни показників енерговитрат підприємства; [12] – проаналізовано рівні споживання електричної енергії стаціонарними установками залізорудних підприємств; [13] – розглянуто вимоги до систем пуску і збудження синхронного електропривода, проаналізовані відомі системи і способи управління ними, також описані переваги і недоліки цих систем; [14] – виконано аналіз енергетичної ефективності вентиляторів головного провітрювання залізорудних шахт і запропоновані нові методи підвищення ефективності їх використання.

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

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

– 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);

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

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

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 16 робіт, з яких 1 монографія, 4 статей у наукових фахових виданнях, 1 статті у міжнародних періодичних виданнях, які внесені до міжнародної науково-метричної бази даних Scopus, 4 статті у наукових журналах і збірниках наукових праць, 5 – у

матеріалах конференцій, за результатами дисертаційної роботи отримано 1 патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 221 сторінок, з яких основний зміст викладений на 182 сторінках друкованого тексту, містить 96 рисунків, 8 таблиці. Список використаних джерел складається з 125 найменувань. Додатки містять акти впровадження результатів роботи, список публікацій за темою дисертації і відомості про апробацію результатів дисертації.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, викладено наукову новизну, практичне значення і реалізацію отриманих результатів, наведено відомості про апробацію і публікації.

У **першому розділі** проведено оцінювання режимів функціонування електроприводів вентиляторів головного провітрювання на залізорудних підприємствах із підземним способом добутку залізорудної сировини.

Проведені дослідження дозволили встановити, що підвищення енергоефективності ВГП має значний потенціал у зниженні енерговитрат даних видів енергоємних споживачів ЕЕ залізорудних шахт. При цьому вектор вирішення проблеми лежить у системі пуску СД цих видів електромеханічних комплексів. Підтверджено, що основною версією забезпечення економікоенергетичного функціонування ВГП є використання в їх комплексах систем електропривода із плавним пуском, з необхідним діапазоном зміни частоти обертання СД при незначному зменшенні к.к.д. вентилятора.

Виходячи з цього, встановлені основні вимоги до системи електропривода ВГП:

- 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 ВГП можливо шляхом створення електроенергоефективного і надійного варіанта синхронного електропривода ВГП з полегшеною системою пуску СД, у якій будуть використані напівпровідникові перетворювачі в статорному колі, котрі забезпечують плавний і квазічастотний спосіб регулювання.

Другий розділ присвячений аналітичним дослідженням аналізу режимів роботи синхронного електропривода в умовах вентиляторів головного провітрювання залізорудних шахт.

Визначено і досліджено особливості різних варіантів пуску СД та умови надійного втягування її в синхронізм.

Зазначено, що в існуючих варіантах має місце ускладнення конструкції ротора, оскільки необхідно вбудовувати пускову короткозамкнену обмотку, яка в

перехідних процесах виконує роль демпферної, для згладжування коливань. При цьому обмотка збудження СД також використовується при пуску, для чого до неї на час пуску підключають зовнішній резистор. Це захищає обмотку збудження також від надвисокої напруги в процесі пуску. Величину опору зовнішнього резистора беруть на порядок більше активного опору обмотки збудження, $R_R \gg R_r$, і регулюють у функції кута навантаження θ_r , що дорівнює куту між векторами магнітних полів статора й ротора. Таким же чином керують формою і величиною напруги збудження синхронної машини.

Незважаючи на все це, ліквідувати основний недолік асинхронного пуску – наявність 5-10-кратного пускового струму не вдається. Це вагома проблема, тим паче, що згідно технічної конструкції СД вони мають обмеження з 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 є можливий після повного охолодження, а це значний проміжок часу, що недопустимо в умовах шахтних ВГП.

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

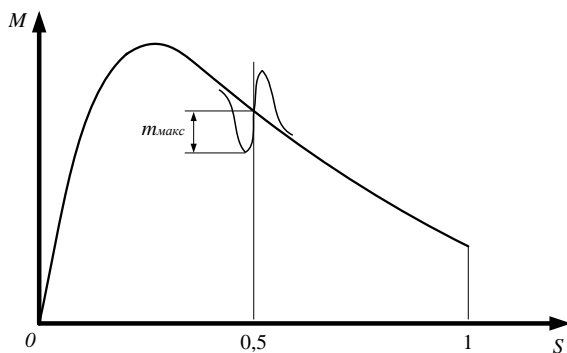


Рисунок 1 – Механічна характеристика явнопольосної синхронної машини при асинхронному пуску

При асинхронному пуску явнопольосної синхронної машини має місце наступна аномалія. При $\omega_r - 0 < \omega_s/2$ ($S > 0,5 + 0,0$) спостерігається збільшення моменту, а при $\omega_r + 0 < \omega_s/2$ ($S > 0,5 - 0,0$) - зменшення в порівнянні з нормальною характеристикою, рис. 1.

Це пояснюється несиметрією ротора по осях d та q . З теорії електричних машин відомо, що струм статора в системі координат статора:

$$\bar{i}_s = U_s \left[\frac{\bar{Y}_d + \bar{Y}_q}{2} \exp j\theta_s + \frac{\bar{Y}_d - \bar{Y}_q}{2} \exp(1-2S) j\theta_s \right], \quad (1)$$

де U_s – напруга статора; θ_s - положення вектора \bar{u}_s в нерухомій системі координат; \bar{Y}_d - провідність схем заміщення; \bar{Y}_q - суміжні вектори з \bar{Y}_d ; якщо $\bar{Y}_d = Y \cdot \exp j\theta$ то $\bar{Y}_q = Y \cdot \exp(-j\theta)$.

Перша складова \bar{i}_s у рівнянні (1) – це вектор змінного струму, що обертається у прямому напрямку з частотою ω_s . Друга складова \bar{i}_s у рівнянні (1) – це вектор змінного струму, що обертається у зворотному напрямку з частотою

$$(1-2S)\omega_s = \omega_s - 2 \cdot \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \cdot \omega_s = (-\omega_s + 2\omega_r). \quad (2)$$

де S – ковзання, ω_s - синхронна швидкість обертання статора, ω_r - синхронна швидкість обертання ротору.

Складові струму \bar{i}_s створюють моменти:

- перша складова створює додатний (що обертає ротор у прямому напрямку) момент;
- друга складова діє двояко: при $S > 0,5$ її частота обертання $(1 - 2S)\omega_s < 0$, момент діє на статор у зворотному напрямку, отже, на ротор – у прямому напрямку, збільшуючи основний додатний 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

$$m_{\text{макс}} \leq (1,3 - 2,7) \frac{3U_s^2}{\omega_s} \cdot \frac{|\bar{Y}_d - \bar{Y}_q|^2}{|\bar{Y}_d + \bar{Y}_q|^2}. \quad (3)$$

де U_s – напруга статора; ω_s - синхронна швидкість обертання статора; \bar{Y}_d - провідність схем заміщення; \bar{Y}_q - суміжні вектори з \bar{Y}_d .

Описане явище повинно бути зведене до нуля задля запобігання зриву процесу розгону СД при розробці алгоритму функціонування перспективної системи пуску.

У ході досліджень встановлено вплив зниження якості електричної енергії у синхронному електроприводі, при зниженні напруги живлення в електричній мережі, визначені умови регулювання збудження СД. Доведено, що в синхронному електроприводі при короткому замиканні у високовольтній мережі живлення, обґрунтовано застосування резисторного гасіння поля для швидкого і надійного розбудження синхронної машини.

Як результат аналізу електромагнітних процесів при частотному регулюванні синхронного електропривода, рекомендовані до застосування закони сталості поточкозчеплення, струму і моменту СД. Обґрунтовано сталість опору зовнішнього пускового резистора в колі ротора при частотному пуску СД, розроблена рекомендація щодо суміщення пускового опору і для гасіння поля.

У **третьому розділі** представлений аналіз і вибір базують систем пуску і збудження СД електроприводів вентиляторів головного провітрювання шахт.

Розроблено вимоги до систем пуску і збудження синхронного електропривода, на відповідність яким проаналізовані відомі системи і способи управління ними, виконано порівняння і вибір варіантів для процесу подальших досліджень.

Обґрунтовані і прийняті, як оптимальні з гами існуючих, багаторівневі перетворювачі напруги, оскільки саме ці види дозволяють керувати високим рівнем вихідної напруги з найкращим спектром гармонік напруг і струмів.

Доведено, що для електроприводів ВГП найбільше підходить топологія перетворювання напруги живлення СД з допомогою послідовного з'єднання Н-мостів.

Запропоновано 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.

Сутність методу полягає у тому, що ШІМ напруги здійснює використання тільки одного блоку перетворювача на всьому протязі процесу, наприклад, тільки $U1$. Він же формує імпульси модуляції U_d таким чином, що інтегральна крива сумарної вихідної напруги перетворювача має форму трапеції. Максимальна амплітуда вихідної напруги $U_{d\Sigma}$ поділена на n -ступенів за числом блоків, максимум рівня напруги кожного ступеня $U_d = U_{d\Sigma}/n$. На першому ступені діє тільки один блок, усі останні знаходяться в нульовій позиції (наскрізна провідність). Перший блок регулює амплітуду вихідної напруги від 0 до U_d шляхом ШІМ (рис. 2, 3), 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 і періоду напруги двигуна. Тоді

$$(i \cdot U_d) \left(\frac{nT_s}{i} \right) = const. \quad (4)$$

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

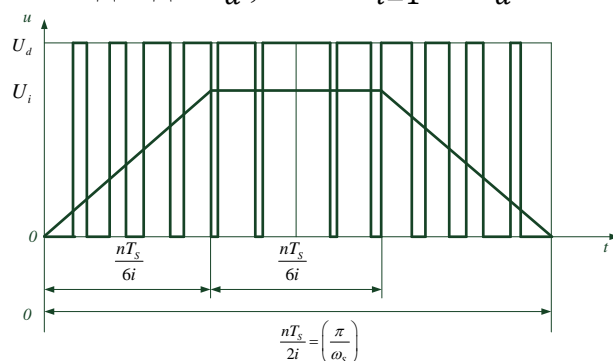


Рисунок 2 – Інтегральна трапецеїдальна крива проміжної напруги на першому місці

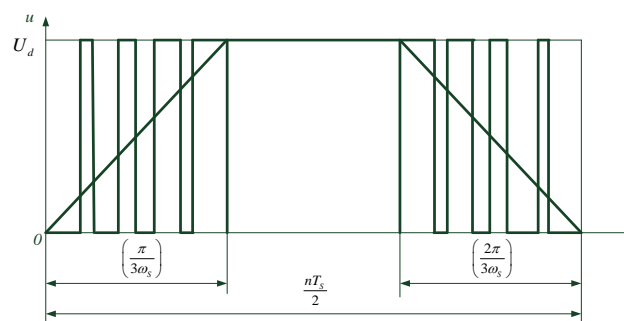


Рисунок 3 – Інтегральна трапецеїдальна крива максимальної напруги на першому місці

Подальше нарощування рівня вихідної напруги на другому ступені відбувається введенням у роботу другого блоку, $U2$, усі інші, що вище за другий, залишаються у нульовій позиції. Другий блок утворює 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. 4, 5).

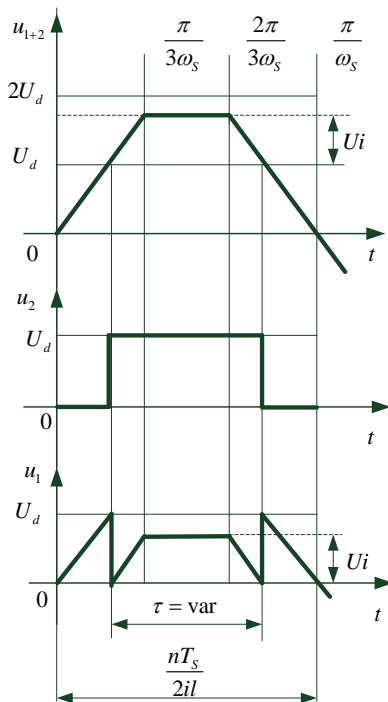


Рисунок 4 – Інтегральні криві проміжної напруги на другому ступені регулювання

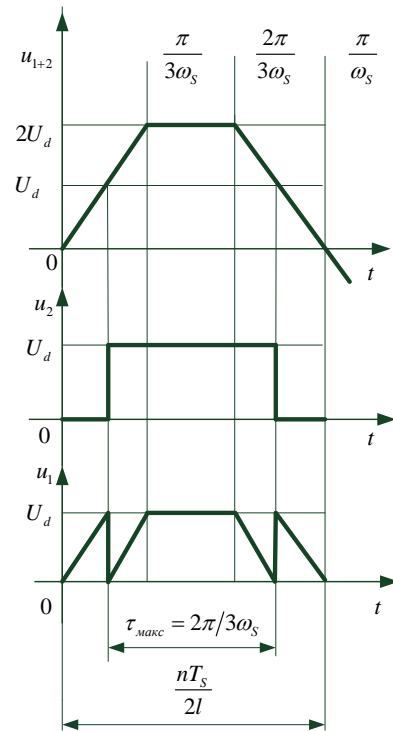


Рисунок 5 – Інтегральні криві максимальної напруги на другому ступені регулювання

Перетворювач частоти забезпечує плавне регулювання величини і частоти вихідної напруги у відповідності до закону $U_s/f_s = const$, а також довгострокову роботу синхронного електропривода на проміжних позиціях з частотою, що необхідна за технологічним процесом ЕМК ВГП.

Передбачений спосіб почергового керування блоками IGBT перетворювача частоти дозволяє суттєво знизити динамічні втрати в IGBT, тим самим підвищити коефіцієнт корисної дії перетворювача та сформувати оптимальну криву вихідної напруги.

Спрощений розрахунок максимуму перехідного струму підтвердив, що такий спосіб є доцільним, оскільки перехід із низького рівня напруги на більш високий відбувається практично миттєво, шляхом збільшення кута регулювання провідності α , а перехід за частотою відбувається поступово шляхом змінення набору напівхвилі вхідної напруги. Отже, можна стверджувати, що «стрибок» напруги відбувається при незмінній частоті, інакше кажучи, відбувається перехід на більш високу частотну характеристику $U_s + \Delta U/f_s = const$, при якій струм СД відповідно більше.

Для зниження величини перехідного струму запропонована роздільна зміна величини напруги та частоти при переході: спершу підвищується напруга до проміжного рівня U_Δ , після чого відпрацьовується підвищення частоти до наступного допустимого значення, при досягненні якого рівень напруги

підвищується з проміжного рівня U_{Δ} до значення, що відповідає усталеній частоті (рис. 7).

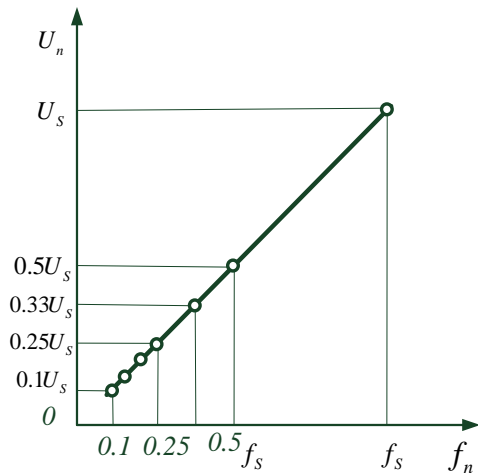


Рисунок 6 – Закон квазічастотного регулювання напруги

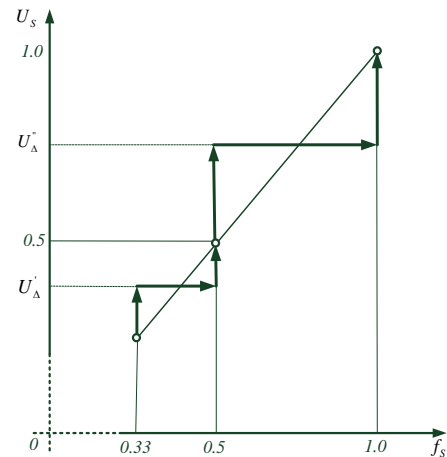


Рисунок 7 – Перехідна характеристика роздільної зміни величини напруги і частоти

Проміжний рівень визначаємо, виходячи з умов, що перехідні струми на першому етапі переходу і на третьому етапі переходу повинні бути рівні між собою.

На останньому ступені, при переході з частоти 0,5 відносних одиниць на 1,0 відносних одиниць:

$$\frac{U_{\Delta}''}{0,5} = \frac{1,0}{U_{\Delta}''}; U_{\Delta}'' = \sqrt{0,5 \times 1,0} = 0,707; \quad (5)$$

Перевірка

$$I_{\max} (0,5 \rightarrow \Delta'') = \frac{0,707}{0,5} I_H = 1,414 I_H; \quad (6)$$

$$I_{\max} (\Delta'' \rightarrow 1,0) = \frac{1,0}{0,707} I_H = 1,414 I_H. \quad (7)$$

де ΔU – проміжна напруга; I_H – номінальний струм.

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

На рис. 8 представлено запропонований варіант системи збудження СД, що забезпечує високу надійність всього ЕМК.

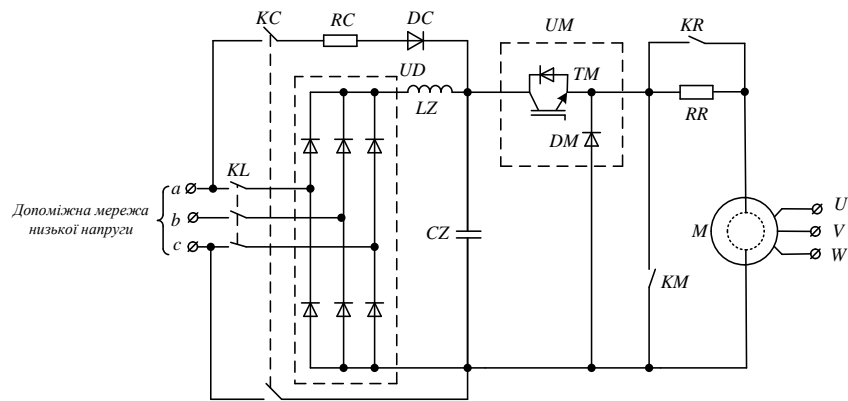


Рисунок 8 – Принципова схема запропонованого IGB транзисторного збудника синхронного двигуна

У четвертому розділі наведено результати моделювання перехідних процесів у СД різними системами пуску електромеханічного комплексу ВГП шахт.

Обґрунтовано, що саме шляхом модельних досліджень можна проаналізувати та оптимізувати для реальних умов ВГП способи регулювання режимів їх функціонування. Пов'язано це з тим фактом, що в силу ряду технічних обставин та умов безпеки проведення експериментальних досліджень, в умовах діючих установок вентиляторів головного провітрювання, вкрай обмежено, а нерідко взагалі заборонено правилами безпеки та технічної експлуатації.

У процесі моделювання досліджено перехідні процеси при прямому пуску і покроковій зміні величини напруги та частоти СД з вентиляторним навантаженням.

Для моделювання перехідних режимів використовуємо модель, наведену на рис. 9.

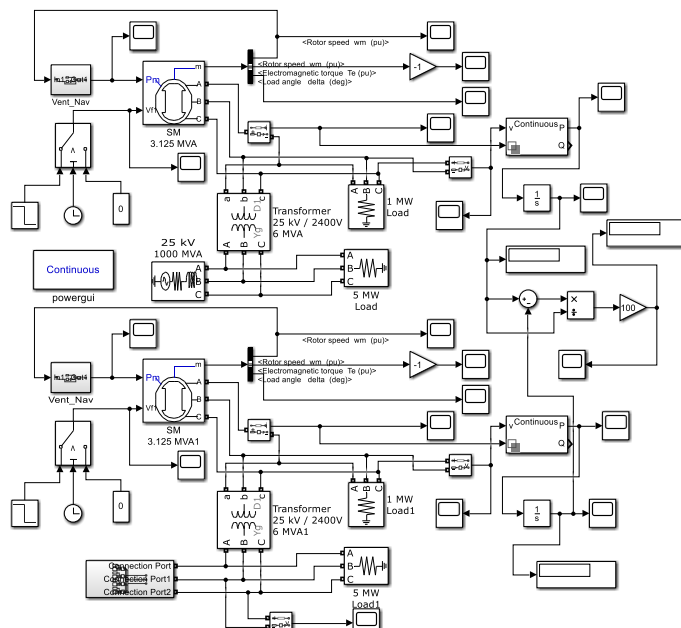


Рисунок 9 – Структура моделі для одночасного дослідження прямої і покрокової зміни величини напруги та частоти систем пуску синхронного двигуна

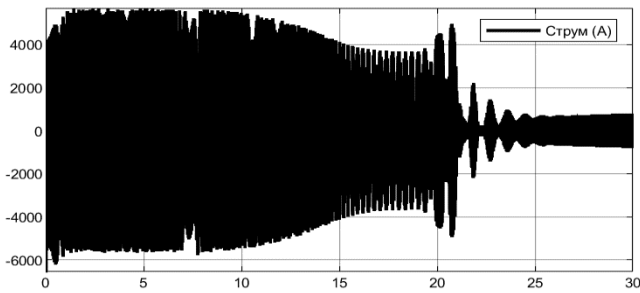


Рисунок 10 – Струм синхронного електродвигуна при прямому пуску з подальшим утягуванням у синхронізм

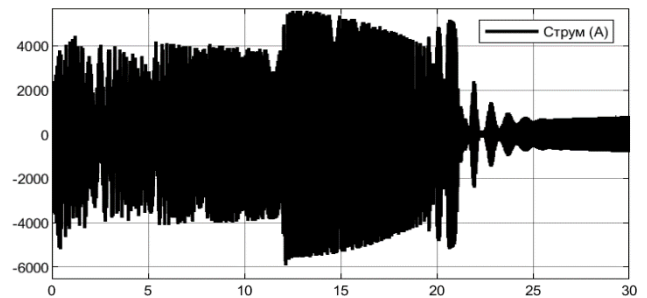


Рисунок 11 – Струм при пуску з покроковою зміною величини напруги та частоти синхронного електродвигуна з подальшим утягуванням у синхронізм

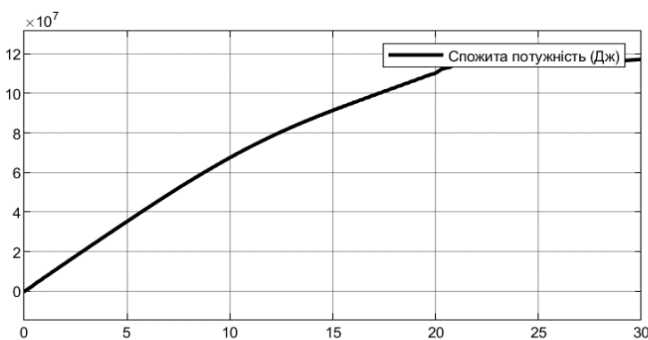


Рисунок 12 – Споживання енергії (Дж) при прямому пуску синхронного електродвигуна з подальшим утягуванням у синхронізм

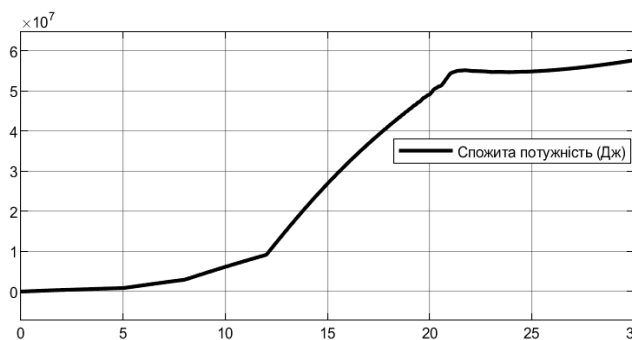


Рисунок 13 – Споживання енергії (Дж) при пуску з покроковою зміною величини напруги та частоти синхронного електродвигуна з подальшим утягуванням у синхронізм

Встановлено що варіант покрокової зміни напруги та частоти живлення практично не збільшує час запуску СД в порівнянні з існуючим, зате спожита при пуску активна енергія зменшується до 50% (з 115000000 джоулів, яка дорівнює 3833333,3 Вт, до 57670000 джоулів, яка дорівнює 1922333,3 Вт). Також при цьому способі пуску знижується пусковий струм, який в існуючих варіантах сягав рівня 2-4 номінальних значень.

Для продовження досліджень з метою оцінювання енергетичних показників при варіативності формувань форм кривих напруг при процесі пуску СД використано метод Рунге-Кутта 4-го порядку, оскільки цей метод досить точний, дає помилку $\sigma = 0,628 \cdot 10^{-8}$ при розрахунку з допустимим за стійкістю рішення кроком інтегрування у восьмому дев'ятому знаку.

Як бачимо з рис. 14, застосування ШІП для формування ступеневої або трапецеїдальної напруги, без фільтруючих пристроїв, призводить до пульсацій струму статора з амплітудою 100% - 125% а, пульсації моменту можуть досягати 40% - 60% номінального значення.

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{d\psi_{RA}}{dt} &= -I_{RA}(R_R + R_{RAZ}) - \left(\psi_{RB} + \psi_{fB} \frac{L_{fB}}{L_f} \right) \omega + U_R \sin \theta_{Uf}; \\
 \frac{d\psi_{RB}}{dt} &= -I_{RB}(R_R + R_{RAZ}) - \left(\psi_{RA} + \psi_{fA} \frac{L_{fA}}{L_f} \right) \omega + U_R \sin \theta_{Uf}; \\
 E_{Sa} &= \frac{2L_{SR}}{3L_R} \cdot \frac{d\psi_{RA}}{dt} + \frac{2L_{Sa}}{3L_a}; \\
 E_{Sb} &= \frac{2L_{SR}}{3L_R} \cdot \left(-0,5 \frac{d\psi_{RA}}{dt} + 0,866 \frac{d\psi_{RB}}{dt} \right); \\
 E_{Sc} &= \frac{2L_{SR}}{3L_R} \cdot \left(0,5 \frac{d\psi_{RA}}{dt} + 0,866 \frac{d\psi_{RB}}{dt} \right); \\
 \frac{dI_a}{dt} &= \frac{U_{Sa} - I_a R_S - E_{Sa}}{L_S}; \\
 \frac{dI_b}{dt} &= \frac{U_{Sb} - I_b R_S - E_{Sb}}{L_S}; \\
 \frac{dI_c}{dt} &= \frac{U_{Sc} - I_c R_S - E_{Sc}}{L_S}; \\
 M_E &= \frac{3L_{SR} A (\psi_{SA} \psi_{RB} - \psi_{SB} \psi_{RA})}{2}; \\
 \frac{d\omega}{dt} &= \frac{M_E + M_H}{j}; \\
 \frac{d\theta}{dt} &= \omega.
 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Результати розрахунку перехідних процесів по току статора, на коротко замкнутої пускової обмотки та обмотки збудження СД, наведені на рис. 14.

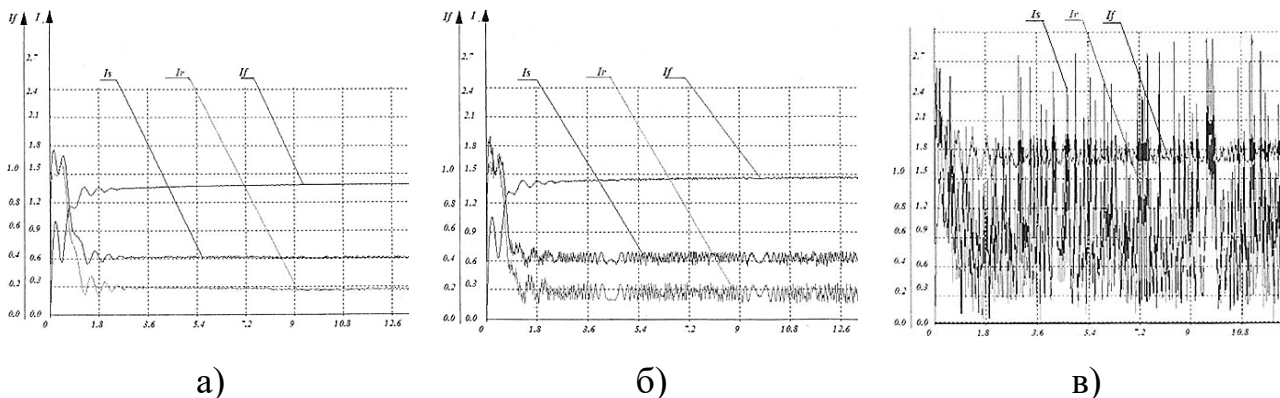


Рисунок 14 – Перехідні процеси струмів синхронного двигуна при синусоїдальній модуляції (а), при трапецеїдальній формі фазної напруги (б), при ступінчастій формі фазної напруги (в)

Отримані результати даного етапу досліджень – лише квінтесенція їх, яка полягає в тому, що споживання електроенергії менше при синусоїдальній фазній напрузі, не дивлячись на більш тривалий період пуску. При однакових показниках

перехідних процесів при прямокутній і трапецеїдальній фазній напрузі енергетика трапецеїдальної напруги все ж вбачається кращою.

Так, амплітуда низькочастотної модуляції моменту становить 50% - 70%. При формуванні синусоїдальної напруги амплітуда пульсацій струму становить 70%. Амплітуда пульсацій моменту становить 20% - 40%. Пуск СД до синхронної швидкості при синусоїдальній напрузі в 1,5 раза довше, ніж при прямокутній або трапецеїдальній напрузі.

Виходячи з вище викладених, протирічних даних доцільно було дослідити споживання електроенергії системою ШП – СД при раціональних законах управління за один цикл роботи.

Потужність, споживана електромеханічної системи для обраної системи координат і системи диференціальних рівнянь, що моделюють перехідні процеси, визначається:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{SA} = 1,5 \cdot I_A; \\ I_{SB} = 0,866 \cdot (I_B - I_C); \\ U_A = 1,5 \cdot U_{SA}; \\ U_B = 0,866 \cdot (U_{SB} - U_{SC}); \\ P = \frac{3 \cdot (U_A \cdot I_{SA} + U_B \cdot I_{SB} + R_B \cdot I_B^2)}{2} \end{array} \right. \quad (9)$$

або

$$P = R_s \cdot I_s^2 + R_r \cdot I_r^2 + R_f \cdot I_f^2 + \omega M. \quad (10)$$

Споживання електроенергії в загальному випадку:

$$E = \int_0^{T_k} P dt. \quad (11)$$

де P - потужність споживана СД, T_k - час циклу.

Споживання електроенергії розраховується за алгоритмами чисельного інтегрування.

На рис. 15 представлені перехідні процеси за швидкістю і відносні споживання електроенергії за один цикл пуску і навантаження.

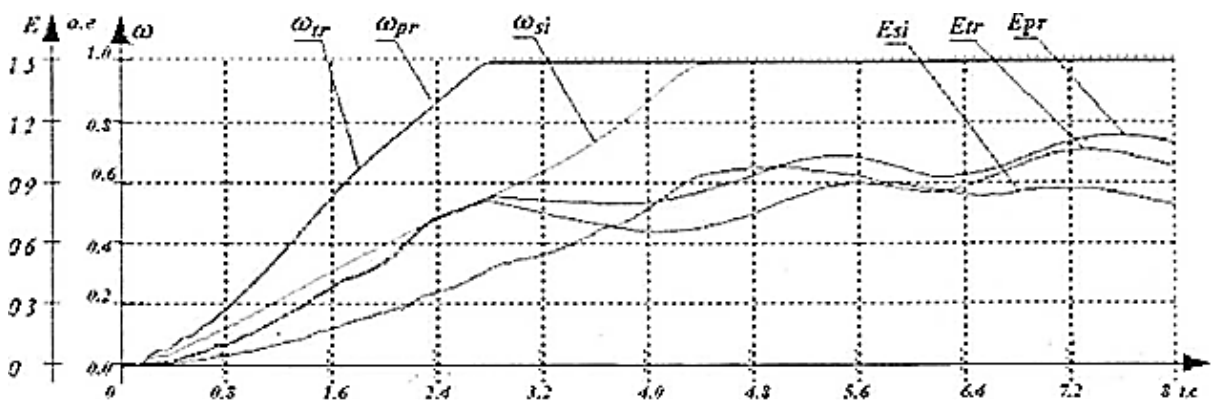


Рисунок 15 – Перехідні процеси за швидкістю ω і споживання електроенергії

На рис. 15 прийняті наступні позначення: $\omega_{si}, \omega_{pr}, \omega_{tr}$ - відповідно для синусоїдальної, прямокутної і трапецеїдальної форми фазної напруги, споживана електроенергія E_{si}, E_{pr}, E_{tr} - відповідно для синусоїдальної, прямокутної і трапецеїдальної форми фазної напруги.

Як свідчать результати, споживання електроенергії при трапецеїдальній напрузі на 10%, а при прямокутній – на 15% більше, ніж при «синусоїдальному варіанті». Для зниження пульсацій струму доцільно застосувати фільтр між широтно-імпульсним перетворювачем частоти і СД.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі знайшла свій подальший розвиток теорія аналізу та синтезу синхронних електроприводів з імпульсними системами пуску синхронних двигунів у 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 комплексі структур 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, обґрунтовано 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.

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

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, вибрати оптимальний варіант. Запропоновані варіанти математичних моделей синхронного двигуна в складі електромеханічного комплексу для систем обертових і нерухомих координат, що орієнтуються 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-го 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, що дозволяє зменшити перехідні значення струмів до рівнів допустимого при квазічастотному 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, 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.

8. Отримані в результаті моделювання дані 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.

9. 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. Отримані в дисертаційній роботі теоретичні й експериментальні дослідження та нові патентоспроможні схемотехнічні рішення використані в науково-дослідних роботах Криворізького національного університету та передані ТОВ «НВК Криворіжелектромонтаж» для створення вітчизняного високоєфективного електрообладнання і 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 у 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.

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

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». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2021.

Дисертація присвячена розв'язанню актуального завдання – 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.

Основними складовими вирішення цього завдання є аналіз методів і засобів пуску синхронних двигунів із позицій функціональності їх у комплексі електроприводів вентиляторів головного провітрювання шахт за рівнем процесу енергоефективності; обґрунтування і розробка, 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 електроприводів вентиляторів головного провітрювання шахт.

Проведений комплекс лабораторних і модельних випробувань енергоефективності запропонованих методів плавного пуску синхронних двигунів електромеханічних комплексів вентиляторів головного провітрювання шахт підтвердили результати теоретичних досліджень.

Розроблені і запропоновані для практичної реалізації згідно отриманих результатів рішення дозволять у значній мірі вирішити проблему підвищення енергоефективності електромеханічних комплексів вентиляторів головного провітрювання шахт, шляхом запровадження в практику розробок ефективних методів плавного пуску приводних синхронних двигунів. Їх позитив – зменшення пускових струмів синхронного електричного двигуна і зменшення споживання електричної енергії в процесі пуску електромеханічного комплексу вентилятора головного провітрювання залізорудних шахт.

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". – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2021.

The dissertation is devoted to the solution of the urgent task - increase of energy efficiency of electromechanical complexes of fans of the main ventilation of mines, by development and introduction in practice of their functioning of effective methods of smooth start of driving synchronous motors with work of the last within energy-oriented starting characteristics.

The main components of solving this problem are the analysis of methods and means of starting synchronous motors from the standpoint of their functionality in the complex of electric drives of fans of the main ventilation of mines according to the level of energy efficiency process; substantiation and development of structures of energy-efficient synchronous electric drives and methods of their control for conditions of fans of the main ventilation of iron ore mines; modernization of the method of cyclic alternating control of units of multilevel IGBT transistor converter of electric energy for power supply of synchronous motors of electromechanical complexes of fan

installations of mines and comparative estimation of modes of their work taking into account the offered principle of separate change of size and frequency of output voltage; development of the principle and method of formation of the optimal curve of output voltage of the frequency converter and its implementation in the structure of energy-efficient systems of electric drives of fans of the main ventilation of mines.

Given the growing trend of electricity prices and increasing the share of the energy segment in the cost of mining, substantiated and proposed a variable approach to reduce this negative process by reducing the energy intensity 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.

A variant of the excitation system of synchronous motors is proposed, which provides high reliability; the method of regulating the magnitude and frequency of the output voltage of the cycloconverter has been modernized by separately controlling these processes, which allows to reduce the transient values of currents to the levels allowed for quasi-frequency control.

The obtained simulation data indicate the presence of high-frequency components in the currents of a synchronous motor in trapezoidal and stepwise form of phase voltage formation, which creates additional difficulties in the implementation of feedback signals, because it requires the presence of filter-compensating devices. Reduces the speed of a closed speed control system of the drive motor. 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 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.

The complex of laboratory and model tests of energy efficiency of the offered methods of smooth start of synchronous motors of electromechanical complexes of fans of the main ventilation of mines was confirmed by results of theoretical researches.

The solutions developed and proposed for practical implementation according to the obtained results will significantly solve the problem of increasing the energy efficiency of electromechanical complexes of fans of the main ventilation of mines, by introducing into practice the development of effective methods of smooth starting of synchronous motors. Their positive is the reduction of starting currents of the synchronous electric motor and the reduction of electric energy consumption in the process of starting the electromechanical fan complex of the main ventilation of iron ore mines.

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

АНОТАЦИЯ

***Пересунько И.И.* Формирование энергоориентированных пусковых характеристик синхронного электропривода вентиляторов главного проветривания шахт. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы». – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2021.

Диссертация посвящена решению актуальной задачи - повышение энергоэффективности электромеханических комплексов вентиляторов главного проветривания шахт, путем разработки и внедрения в практику их функционирования эффективных методов плавного пуска приводных синхронных двигателей с работой последних в энергоориентированных пределах пусковых характеристик.

Основными составляющими решения этой задачи является анализ методов и средств пуска синхронных двигателей с позиций функциональности их в комплексе электроприводов вентиляторов главного проветривания шахт по уровню процесса энергоэффективности; обоснование и разработка, структур энергоэффективных синхронных электроприводов и способов управления им для условий вентиляторов главного проветривания железорудных шахт.

Проведенный комплекс лабораторных и модельных испытаний энергоэффективности предложенных методов плавного пуска синхронных двигателей электромеханических комплексов вентиляторов главного проветривания шахт подтвердили результаты теоретических исследований.

Разработаны и предложены для практической реализации согласно полученных результатов решения позволят в значительной степени решить проблему повышения энергоэффективности электромеханических комплексов вентиляторов главного проветривания шахт, путем введения в практику разработок эффективных методов плавного пуска приводных синхронных двигателей. Их позитив - уменьшение пусковых токов синхронного электродвигателя и уменьшения потребления электрической энергии в процессе пуска электромеханического комплекса вентилятора главного проветривания железорудных шахт.

Ключевые слова: электромеханические комплексы и системы, пусковые характеристики, синхронный электродвигатель, вентилятор главного проветривания, импульсный преобразователь, плавный пуск, электрическая энергия.

Підп. до друку 18.08.2021 р. Формат 60x84 1/16.
Ум. друк. арк. 1,3. Облік. вид. арк. 1,1. Наклад 100 пр. Зам. 58/21.

Видавець і виготовлювач ПП Щербатих О.В. м. Кременчук, вул. Софіївська, 36Б, 39601

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного
реєстру видавців, виготовників і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 2129 від 17.03.2005 р.