

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний університет
Навчально-науковий інженерний інститут ім. Ю.М. Потебні

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

Пояснювальна записка

до магістерської роботи

рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

на тему Підвищення енергоефективності електроприводів
в умовах виробництв

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1412-2
Прокопенко Д.В.

(прізвище та ініціали) (підпис)

спеціальності

141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

141.00.11 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва)

Керівник

Артемчук В.В.

(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя
2023 рік

Запорізький національний університет

Навчально-науковий інженерний інститут ім. Ю.М. Потебні

(повне найменування вищого навчального закладу)

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень
(повна назва кафедри)


Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва)

Спеціалізація _____
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма 141.00.11 Електроенергетика,
електротехніка
(шифр і назва)
та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д.т.н., доц.  В.Л. Коваленко
“ 07 ” грудня 2023 року

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту

Прокопенко Дмитро Володимирович

1. Тема роботи: Підвищення енергоефективності електроприводів в умовах виробництв

Керівник роботи: Артемчук В.В.
затверджені наказом ЗНУ від « 01 » травня 2023 року № 639 - с _____




2. Строк подання студентом роботи: 01 грудня 2023 року _____

3. Вихідні дані до роботи: поточний тариф вартості електроенергії; _____
внутрішньозаводські електромережі напругою 6 - 10 кВ; цехові споживачі _____
електроенергії; асинхронні двигуни _____

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які рекомендовано _____
розробити): вступ; аналіз впливу якості електроенергії на енергоефективність _____
електроприводів змінного струму; розробка заходів з підвищення _____
енергоефективності приводів; економічний ефект від впровадження _____
енергозберігаючих заходів _____

5. Перелік графічного матеріалу: титульна сторінка; крива напруги при наявності комутаційних перешкод; крива напруги при насиченні сердечників силових трансформаторів; схема перетворювача частоти; схема автономного інвертора напруги

6. Консультанти розділів дипломної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Артемчук В.В., професор		
Розділ 2	Артемчук В.В., професор		
Розділ 3	Артемчук В.В., професор		
Нормоконтроль	Бандуренко І.І., асистент		

7. Дата видачі завдання _____ 01.06.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів магістерської роботи	Примітка
1	Оцінка впливу якості електроенергії на енергоефективність електроприводів	01.10.2023	
2	Підвищення енергоефективності приводів	01.11.2023	
3	Економічний ефект від впровадження енергозберігаючих заходів	01.12.2023	

Студент



(підпис)

Прокопенко Д.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник дипломної роботи



(підпис)

Артемчук В.В.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтролер



(підпис)

Бандуренко І.І.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Проведено аналіз ефективності заходів з енергозбереження, враховуючи використання електроприводів різної потужності в умовах промислових підприємств. Запропоновані конкретні заходи, спрямовані на зниження втрат в електропривідній системі. Проведено оцінку зменшення енерговитрат в елементах електроприводів підприємства, акцентуючи увагу на покращенні якості живлячої енергії. Зазначено, що вжиті заходи сприяли підвищенню загальної продуктивності та ефективності енергоспоживання у відповідності до нових стандартів та вимог сучасної промисловості.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: електрична енергія, ефективність, електропривід, електричний двигун, промислове підприємство.

ABSTRACT

An analysis of the effectiveness of energy-saving measures was carried out, taking into account the use of electric drives of different power in the conditions of industrial enterprises. Specific measures aimed at reducing losses in the electric drive system are proposed. An assessment of the reduction of energy consumption in the elements of the company's electric drives was carried out, emphasizing the improvement of the quality of the supply energy. It is noted that the measures taken contributed to the increase of the overall productivity and efficiency of energy consumption in accordance with the new standards and requirements of modern industry.

KEY WORDS: electric energy, efficiency, electric drive, electric engine, industrial enterprise.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ОЦІНКА ВПЛИВУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ	10
1.1 Показники якості електроенергії в промислових мережах	15
2 ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРИВОДІВ	26
2.1 Підвищення ефективності використання електроприводів	26
2.2 Аналіз та вибір схеми перетворювача	29
2.3 Вибір елементів схеми перетворювача частоти	36
3 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ЗАХОДІВ	54
3.1 Визначення економічного ефекту від впровадження розроблених заходів	54
3.2 Питання охорони праці	63
ВИСНОВКИ	71
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	72
ДОДАТКИ	75

ВСТУП

Енергозбереження виступає однією із важливих складових стратегій щодо збереження природи та вирішення екологічних проблем. Групою споживачів електроенергії, що забирають більше половини загальної виробленої енергії, є електродвигуни різної потужності та призначення. Таким чином, виявлення можливостей енергозбереження в цій галузі є настійною необхідністю.

Зараз виникає проблема, оскільки більшість електродвигунів функціонують у нерегульованому режимі, що призводить до низької ефективності. Дослідження показують, що багато електродвигунів працюють з коефіцієнтом завантаження, який не перевищує 50% при експлуатації електропривода. Внаслідок цього, робота таких приводів у недовантаженому режимі призводить до значних енергетичних втрат, що не компенсується зниженням коефіцієнта потужності, оскільки загальна встановлена потужність асинхронних двигунів у країні становить приблизно 40...50 млн кВт [1].

Очікується, що розвиток енергоємних технологій буде супроводжуватися підвищенням надійності та безаварійної роботи машин і механізмів. Це, в свою чергу, вимагатиме збільшення частки регульованого електропривода. Фахівці стверджують, що використання регульованого електропривода для різних механізмів дозволить заощадити понад 46% енергоресурсів. На сьогодні промисловість України потребує активного розвитку та широкого впровадження методів і засобів управління промисловим електроприводом для підвищення енергоефективності.

З метою кращого розуміння об'єкта досліджень, розглянемо окремі поняття [1].

Енергозбереження - це комплекс заходів, спрямованих на раціональне використання енергетичних ресурсів, що призводить до зменшення потреби в паливно-енергетичних ресурсах на одиницю кінцевого продукту та зменшення шкідливого впливу на навколишнє середовище.

Енергоефективність – властивість устаткування, чи технології виробництва, що характеризує міру використання енергії на одиницю кінцевого продукту. Енергоефективність оцінюється за допомогою показників як кількісно (кВтг, тонни умовного палива, кДж на одиницю кінцевого продукту), так і якісно (низька, висока).

Енергоменеджмент – керування раціональним використанням енергії на всіх стадіях її виробництва, передачі, розподілу і споживання, включаючи комплексне оптимальне розв’язання технічних, економічних і екологічних проблем, пов’язаних з цим процесом.

Енерговикористання – комплекс дій персоналу об’єкта, роботи його устаткування і технологій, пов’язаних із процесами від виробництва енергії до її споживання.

Енергоаудит – складова енергоменеджменту, зорієнтована на обстеження об’єкта з погляду його енерговикористання (виявлення фактів нераціонального використання енергії, визначення заходів для енергозбереження, оцінки технічних і економічних можливостей щодо їх реалізації). Цей вид діяльності спрямований на зменшення споживання енергетичних ресурсів суб’єктами господарювання за рахунок підвищення ефективності використання енергії.

Енергоконсалтинг – консультаційна діяльність, спрямована на роз’яснення переваг реалізації енергозбереження, надання практичної допомоги в розв’язанні енергетичних проблем замовника, вибір і обґрунтування енергоефективних рішень, популяризацію знань, навчання персоналу.

Електропривод – це електромеханічний пристрій, що здійснює кероване перетворення електричної енергії в механічну, а також зворотне перетворення і призначений для надавання руху робочим машинам та механізмам. Електропривод є тою ланкою, що зв’язує енергосистему з технологічними установками. У деякій мірі електропривод виконує роль регулятора цих зв’язків.

Енергоефективність представляє собою характеристику технічного обладнання або технологій виробництва, яка визначає, наскільки ефективно використовується енергія для вироблення одиниці кінцевого продукту. Оцінка енергоефективності здійснюється шляхом використання якісних показників (низька, висока) та кількісних параметрів (кількість кВтг, тонни умовного палива, кДж на одиницю кінцевого продукту).

Енергоменеджмент включає управління раціональним використанням енергії на всіх етапах її виробництва, передачі, розподілу і споживання. Цей підхід передбачає комплексне оптимальне вирішення технічних, економічних і екологічних завдань, що виникають у зв'язку з цим процесом.

Енерговикористання охоплює сукупність заходів персоналу об'єкта, функціонування його обладнання і технологій, пов'язаних із процесами від виробництва енергії до її споживання.

Енергоаудит, що є частиною енергоменеджменту, спрямований на аналіз об'єкта з точки зору його енерговикористання. Він виявляє факти нераціонального використання енергії, визначає заходи для збереження енергії та оцінює технічні і економічні можливості їх реалізації. Мета енергоаудиту полягає в зменшенні споживання енергетичних ресурсів суб'єктами господарювання шляхом підвищення ефективності використання енергії.

Енергоконсалтинг представляє собою консультаційну діяльність, спрямовану на пояснення переваг впровадження заходів з енергозбереження, надання практичної допомоги у вирішенні енергетичних проблем, обрання і обґрунтування енергоефективних рішень, а також на популяризацію знань і навчання персоналу.

Електропривод – це електромеханічний пристрій, призначений для керованого перетворення електричної енергії в механічну і зворотного перетворення. Він служить для надання руху робочим машинам та механізмам і виступає ланкою, що забезпечує зв'язок між енергосистемою та технологічними установками. В певному сенсі, електропривод виконує функцію регулятора цих взаємозв'язків.

Щодо втрат електроенергії, загальні втрати електричної енергії можна розподілити на дві основні категорії: номінальні втрати, які залежать від робочих умов при встановлених номінальних режимах та оптимальних параметрах системи електропостачання, і додаткові втрати, що виникають через відхилення від номінальних режимів та параметрів. Енергозбереження в цьому контексті базується на мінімізації як номінальних, так і додаткових втрат.

В порівнянні з іншими видами приводів, електропривод має численні переваги, такі як висока ККД, менший рівень шуму, можливість швидкого регулювання швидкості, компактні розміри обладнання та можливість реалізації рекуперації у деяких випадках.

Оскільки понад 90% виробленої енергії витрачається електротехнологічними установками, освітлювальними споживачами та електроприводами (електроприводи у середньому споживають близько 60% загальної електроенергії, а в окремих випадках цей показник може сягати 80%), ефективне впровадження заходів з енергозбереження може значно підвищити результативність. Наприклад, зменшення обертання двигуна до швидкості робочого механізму може призвести до економії енергії та поліпшення технологічного процесу. Більшість сучасних електроприводів, які зараз використовуються у промисловості, є простими і часто нерегульованими. Наприклад, це стосується приводів для компресорних і насосних станцій, вентиляторів, конвеєрів, кранів та інших механізмів у будівельній галузі.

Отже, розробка та широке впровадження енергозберігаючих заходів у промисловому електроприводі залишається актуальною задачею. Об'єктом дослідження є система електроприводу промислових підприємств, а предметом – втрати енергії в системі електроприводів цих підприємств.

Метою даної роботи є проведення аналізу та визначення можливих шляхів підвищення енергоефективності електроприводу в умовах

промислових підприємств. Для досягнення цієї мети передбачені наступні задачі досліджень:

1. Аналіз можливостей підвищення ефективності експлуатації систем електроприводу промислових підприємств і оцінка енергозберігаючих заходів: Ця задача включає в себе огляд та аналіз технічних можливостей оптимізації роботи електроприводів на промислових підприємствах, а також визначення ефективних заходів з енергозбереження.
2. Дослідження теплових процесів електроприводів: Аналіз теплових втрат у системі електроприводу, вивчення причин і обставин, які призводять до розподілу теплової енергії, а також визначення оптимальних шляхів зменшення цих втрат.
3. Визначення можливих напрямків економії електричної енергії технологічними установками: Аналіз та ідентифікація областей, де можна впроваджувати енергозберігаючі рішення у технологічних процесах, включаючи оптимізацію режимів роботи обладнання та використання електроприводів.
4. Оцінка економічної ефективності від впровадження енергозберігаючих заходів: Проведення оцінки витрат та вигідності впровадження запропонованих заходів для підвищення енергоефективності електроприводу на промислових підприємствах.

Наукова новизна даного дослідження полягає в теоретичному обґрунтуванні ефективності розроблених енергозберігаючих заходів у системі електроприводу промислових підприємств. Практична цінність роботи полягає в розробці конкретних енергозберігаючих заходів, які можуть бути впроваджені в систему електроприводу промислових підприємств з метою оптимізації їхньої енергоефективності.

1 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

Електромагнітна сумісність технічних пристроїв розглядає процеси, які відбуваються у складі електротехнічних комплексів і систем, з урахуванням генерації електромагнітних завад, їх впливу на електрообладнання, ступінь захисту та корекції негативного впливу [3]. З'явлення нових пристроїв перетворювальної техніки та модернізація зростаючої кількості промислових електроустановок, зокрема, застосування регульованого електроприводу, призводять до погіршення якості електроенергії в живильних мережах підприємств. Це створює необхідність у зміцненні вимог до електромагнітної сумісності, які ставляться до промислових установок. Нормування показників якості електроенергії в таких умовах визначається як одне з ключових питань вищезазначеної проблеми [1-3].

Показники якості електроенергії, які регламентуються державними стандартами, виступають визначальною точкою у практично всіх сферах, пов'язаних із електроустановками. Це відноситься як до проектування нових об'єктів, так і до пуско-налагоджувальних робіт, дослідження стану електрообладнання, прийняття рішень щодо модернізації та інших аспектів.

Міжнародні стандарти, які регулюють електромагнітну сумісність електроустановок, включають в себе відомий Європейський стандарт EN 50160: "Характеристики напруги електричної енергії, що постачається системами розподілу загального призначення" (1994 р.), а також стандарт Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) 1000-2-4: "Електромагнітна сумісність. Рівні ЕМС на промислових об'єктах для низькочастотних перешкод провідності".

Показники якості електроенергії (ПКЕ) в системах електропостачання промислових підприємств формуються через режим роботи електроустановок, які вносять спотворення, і, таким чином, постійно змінюються. Таким чином,

ГОСТ 13109-97 "Електрична енергія. Вимоги до якості електричної енергії в електричних..." представляє собою основний документ, який регулює ці показники.

Отже, стандарт ГОСТ 13109-97 визначає ряд показників якості електроенергії, які включають:

1. Відхилення напруги (dU_y): Цей показник вказує на величину відхилення напруги від заданого значення.
2. Розмах зміни напруги (або амплітуда коливань напруги - КН): Визначається різницею максимального та мінімального значення напруги.
3. Інтенсивність (доза) флікера: Вимірює ступінь інтенсивності флікера, що виникає в результаті зміни яскравості освітлення.
4. Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої лінійного (фазного) напруги: Вказує на ступінь спотворення форми синусоїдального сигналу.
5. Коефіцієнт n -й гармонійної складової напруги: Відображає вміст гармонік у напрузі.
6. Коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній та нульовій послідовності: Визначає нерівномірність напруги за різними фазами.
7. Тривалість провалу напруги: Характеризує тривалість періоду, протягом якого напруга падає нижче встановленого рівня.
8. Імпульс напруги: Описує характер інтенсивних, короткочасних змін напруги.
9. Коефіцієнт тимчасової перенапруги: Вказує на тимчасове збільшення напруги відносно стандартного значення.
10. Відхилення частоти: Визначається як величина відхилення частоти електроенергії від номінального значення.

Зазначимо, що деякі види спотворень електроенергії, наприклад, відхилення живильної частоти, застосовуються досить рідко на практиці. Тому

будемо розглядати методи розрахунку лише основних показників якості електроенергії, пов'язаних з найбільш поширеними спотвореннями в мережі.

Розмах зміни δU_t визначається виразом:

$$U_t = \sqrt{\frac{\int_{f_2}^{f_4} G_U(f) df + \int_{f_1}^{f_3} G_U(f) df}{\int_0^{\infty} G_U(f_0) df}} = \sqrt{\frac{\int_{f_2}^{f_4} G_U(f) df + \int_{f_1}^{f_3} G_U(f) df}{U_{ном}}},$$

де $G_U(f)$ - функція енергетичного спектра напруги;

f_1, f_2 - допустимі відхилення частоти;

f_3, f_4 - нижня і верхня межі частот, в яких оцінюється напруга. Тут $f_2 \leq f \leq f_4$

і $f_3 \leq f \leq f_1$. Згідно нормативних документів допускаються короткочасні відхилення напруги в діапазоні $\pm 10\%$, при цьому протягом 95 % доби відхилення напруги не повинно перевищувати $\pm 5\%$.

Коефіцієнт несиметрії напруги трифазної мережі визначається відсотковим співвідношенням діючого значення напруги зворотної послідовності основної частоти трифазної системи, позначеного як U_2 , до номінального значення фазної напруги, позначеного як $U_{ном.мф}$.

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_{ном.мф}} \cdot 100$$

Крім того, нормується значення коефіцієнта нульової послідовності $K_{0U} \%$, який визначається відношенням напруги нульової послідовності основної частоти U_0 до номінального значення фазної напруги $U_{ном.ф}$:

$$K_{0U} = \frac{U_0}{U_{ном.ф}} \cdot 100.$$

Згідно з джерелом [11], прийнятні значення коефіцієнтів зворотної та нульової послідовностей для будь-якого трифазного споживача становлять 2%, при цьому гранично допустима величина (ПДВ) складає 4%. Несинусоїдальність напруги визначається коефіцієнтом спотворення його кривої, відсоткове значення якого обчислюється як відношення діючого значення вищих гармонік U_n до номінальної напруги.

$$K_U = \frac{1}{U_{ном}} \sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2} \cdot 100,$$

де U_n - діюче значення напруги n-ої гармоніки;

$N = 22$ - номер останньої з врахованих гармонік. Допустиме і гранично допустиме значення залежить від класу напруги. Так наприклад, для мереж 6 кВ допустиме значення цього показника становить 5 %, а гранично допустиме – 8 %.

Крім коефіцієнта несинусоїдальності, також підлягають нормуванню коефіцієнти для кожної гармонійної складової до 22-го порядку включно. Останні визначаються за допомогою виразу:

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{ном}} \cdot 100,$$

Допустимі та гранично допустимі значення коефіцієнтів гармонійної складової також регламентуються в залежності від класу напруги. Слід відзначити, що в джерелі [3] висунуті більш жорсткі вимоги до парних гармонік, де допустимі значення в середньому в 2-5 разів нижчі, ніж для непарних гармонік.

Таким чином, якість електричної енергії визначається комплексом її показників, при яких електроприймачі можуть нормально функціонувати і

виконувати свої завдання. Відхилення від допустимих значень цих параметрів ускладнює нормальну роботу електромеханічних перетворювачів або може вимагати значного зниження навантаження. Слід також відзначити, що навіть у межах стандартів допустимого діапазону значень показників якості електроенергії може спричиняти зниження ефективності роботи обладнання.

1.1 Показники якості електроенергії в промислових мережах

Необхідно проаналізувати причини відхилення показників якості електроенергії від нормативних при вживанні заходів для покращення роботи електроустаткування в умовах низької якості електроенергії. Спершу слід ретельно визначити фактори, які спричиняють погіршення якості електроенергії, оцінити реальні значення стандартних показників та порівняти їх із допустимими значеннями. Слід відзначити, що на даний момент відсутні повні дані щодо комплексної оцінки якості електроенергії в мережах промислових підприємств в Україні.

Багато металургійних заводів мають електроприводи прокатних станів чорнових і заготівельних клітей як основних споживачів електроенергії. Потужність таких приводів часто досягає кілька мегават (навіть до 13 МВт, наприклад, у електропривода блумінга ВАТ "Арселор-Міттал" у м. Кривий Ріг). Проведена модернізація, пов'язана зі заміною системи "генератор-двигун" (Г-Д) на систему тирісторного перетворювача - двигун (ТП-Д), призвела до поліпшення регульовальних властивостей. Однак водночас використання систем ТП-Д на головних приводах прокатних станів призвело до суттєвого спотворення цехової напруги [10]. В мережі спостерігаються вищі гармоніки навіть 23-38 порядку, включаючи як парні, так і непарні [10, 11]. Коефіцієнти окремих гармонійних складових перевищують допустимі значення в 5-7 разів.

Важливо відзначити, що характер несинусоїдальності, тобто гармонійний склад напруги, залежить від особливостей технічних об'єктів

(установок), які викликають спотворення, їхнього режиму роботи, параметрів системи електропостачання та інших факторів. Однією з найбільш поширених причин несинусоїдальності, особливо в мережах малої потужності, є насичення сердечників силових трансформаторів цехових підстанцій. Це явище типове для невеликих підприємств і технологічних об'єктів сільського господарства. Насичення магнітопроводу цих трансформаторів може виникати внаслідок роботи нагрівальних елементів, зварювального обладнання та інших потужних споживачів. Типовий зразок кривої напруги живлення у таких умовах має "усічений" вид, і спектральний аналіз відображає наявність третьої гармоніки (див. рисунок 1.1).

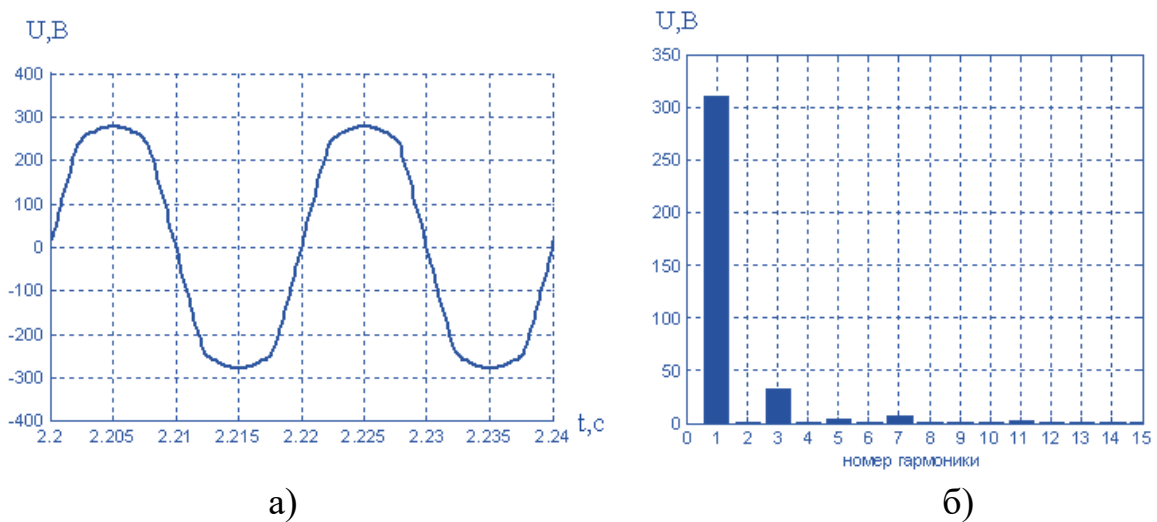


Рисунок 1.1 – Крива напруги при насиченні сердечників силових трансформаторів (а) та її спектральний склад (б)

Як відомо, наявність третіх гармоній є шкідливою як для асинхронних двигунів, так і для трансформаторів, особливо тих, чий первинні обмотки з'єднані в трикутник. Це пояснюється тим, що треті гармонії утворюють нульову послідовність, а опір електричних обмоток цих трансформаторів невеликий (визначається індуктивністю розсіювання). З'єднання обмоток у трикутник створює контур для протікання струмів третьої гармоніки. Це

призводить до збільшення втрат, підвищення температури обмоток і зниження ефективності роботи вказаного електрообладнання.

Ще однією поширеною причиною спотворення синусоїдальності є наявність потужних напівпровідникових перетворювачів в мережі [12-16]. Під час комутації цих пристроїв, струми, які ними споживаються, мають пікові значення. Це призводить до «провалів» напруги на входах інших споживачів, як показано на рисунку 1.2.

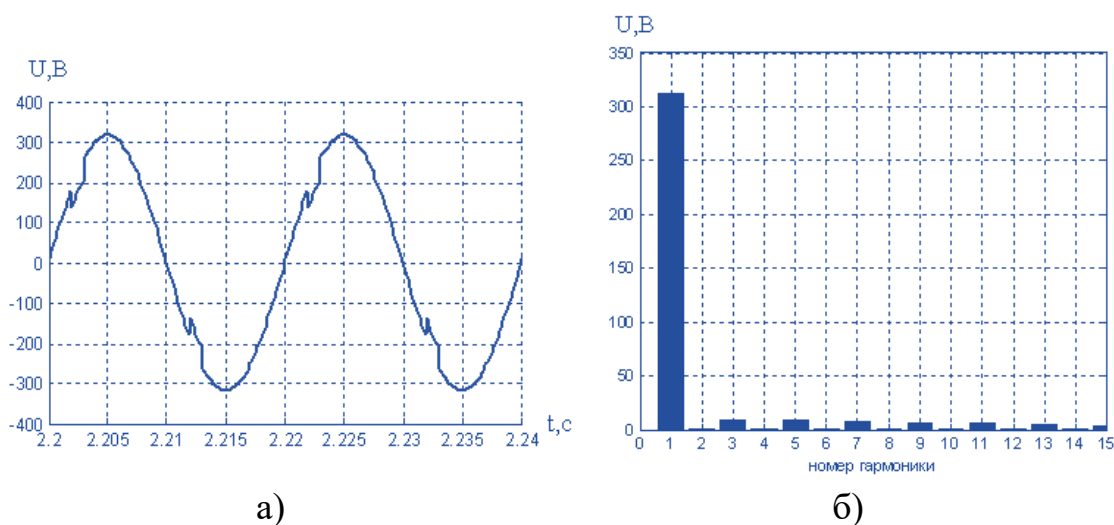


Рисунок 1.2 – Крива напруги при наявності комутаційних перешкод (а) та її спектральний склад (б)

Зазначена форма кривої є характерною для електромереж великих промислових підприємств, таких як металургійні, нафтопереробні та гірничозбагачувальні комбінати, де застосовуються потужні регульовані електроприводи з випрямлячами або перетворювачами частоти. На практиці виявлено, що, незважаючи на заходи з покращення електромагнітної сумісності, показники якості напруги в таких випадках продовжують перевищувати граничні значення, визначені нормами.

Спектральний склад напруги, яка спотворена напівпровідниковими перетворювачами, містить практично всі гармоніки вищого порядку (рис. 1.2, б). Хоча ці гармоніки мають слабкий вплив на пульсації моменту асинхронних

двигунів [12 – 16], вони призводять до додаткових втрат в сталі зазначених двигунів та трансформаторів. Це призводить до підвищеного нагрівання та зниження енергоефективності та надійності електрообладнання.

У разі наявності потужних споживачів у цеховій мережі, які живляться від напівпровідникових перетворювачів із фазоімпульсним регулюванням (гальванічні ванни, дугові печі), порушується симетрія синусоїди напруги, а в спектрі з'являється яскраво виражена друга гармоніка (рисунок 1.3). Ця гармоніка, як відомо, породжує струми зворотної послідовності, що утворюють гальмівний електромагнітний момент на валу двигуна. Також збільшуються вібрації в механічній частині, прискорюється знос і зменшується надійність обладнання.

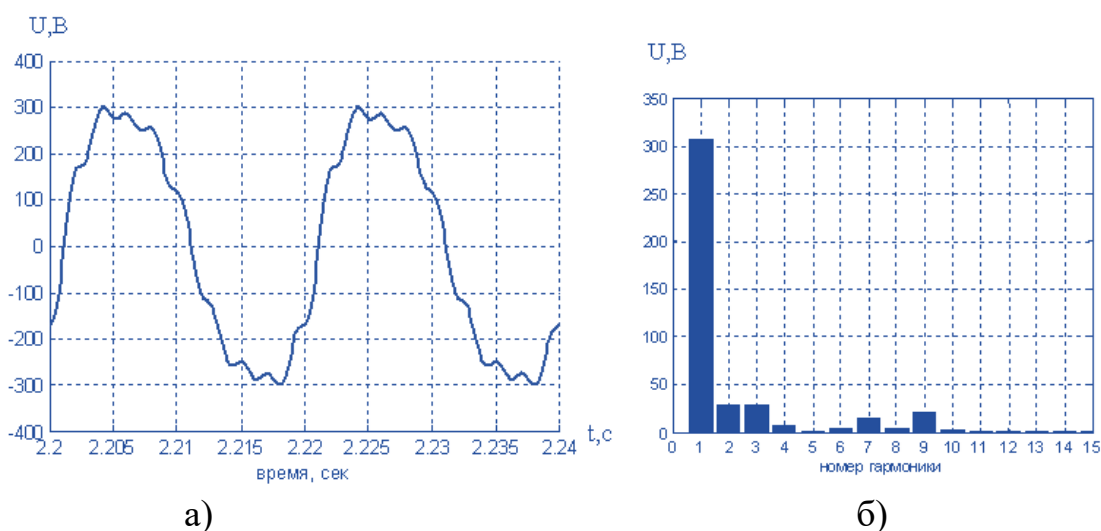


Рисунок 1.3 – Крива напруги з переважаючою другою гармонікою (а) та її спектральний склад (б)

Вивчення характеристик та кількісна оцінка показників якості електроенергії в мережах промислових підприємств розкривають невідповідність якості електричної енергії вимогам стандарту ГОСТ на численних підприємствах України. Присутні спотворення, спричинені впливом напівпровідникових перетворювачів, насиченням магнітопроводів трансформаторів і іншими факторами. Хоча коефіцієнт спотворення

синусоїдальності кривої напруги відповідає вимогам стандарту, спостерігається суттєве перевищення значень коефіцієнтів гармонійних складових напруги за окремими гармоніками. Це свідчить про перевагу використання останніх при оцінці енергоефективності асинхронних двигунів, які працюють у невідповідних умовах живлення. Також зауважується істотна різниця у якості електроенергії на вході підприємства та у його цехах.

Для поліпшення якості електроенергії на промислових підприємствах запропоновано ряд заходів. Це включає використання "індивідуальних" LC-фільтрів для захисту особливо відповідальних електроприводів, застосування "групових" пристроїв для компенсації впливу неякісної електроенергії на рівні цеху (наприклад, силові активні випрямлячі), та придушення спотворень напруги в місцях їх виникнення. Останнє передбачає модернізацію силової частини електроприводу та систем автоматичного регулювання, а також обережний вибір параметрів електроприводу. Як варіант, може бути варто відмовитися від впровадження заходів, якщо їх економічна доцільність піддається сумнівам. Зазначено, що в Україні ще не розроблено єдиної методики для обґрунтованого вибору заходів, спрямованих на зменшення негативного впливу неякісної електроенергії на енергоефективність виробництва.

Розвиток методів підвищення якості електроенергії на підприємствах та їх цехах орієнтований на поліпшення ключових показників якості, таких як несиметрія та спотворення синусоїдальності [20-25]. На сучасному етапі вирішення цих завдань здійснюється переважно в двох напрямках:

1. Активна фільтрація напруги живлення: Для трифазних споживачів, активні фільтри фактично представляють собою автономні інвертори, у яких ланцюг постійного струму обладнаний конденсатором [16-18]. Основний принцип їхньої дії полягає в перерозподілі напруги між фазами шляхом використання енергії, яка накопичується в конденсаторі. Для цього в систему управління ключами інвертора вводиться сигнал

задання на синусоїдальний струм у кожній фазі, а також сигнал зворотного зв'язку по струмах в фазах мережі живлення.

2. Застосування пасивних резонансних фільтрів: Цей метод передбачає використання пасивних елементів, які резонують на конкретних частотах, для поглиблення спотворень та усунення небажаних складових з напруги. Використання пасивних резонансних фільтрів спрямоване на зменшення впливу гармоній та інших несумісних компонентів у системі живлення.

Спрощена схема пристрою активної фільтрації подана на рисунку 1.4.

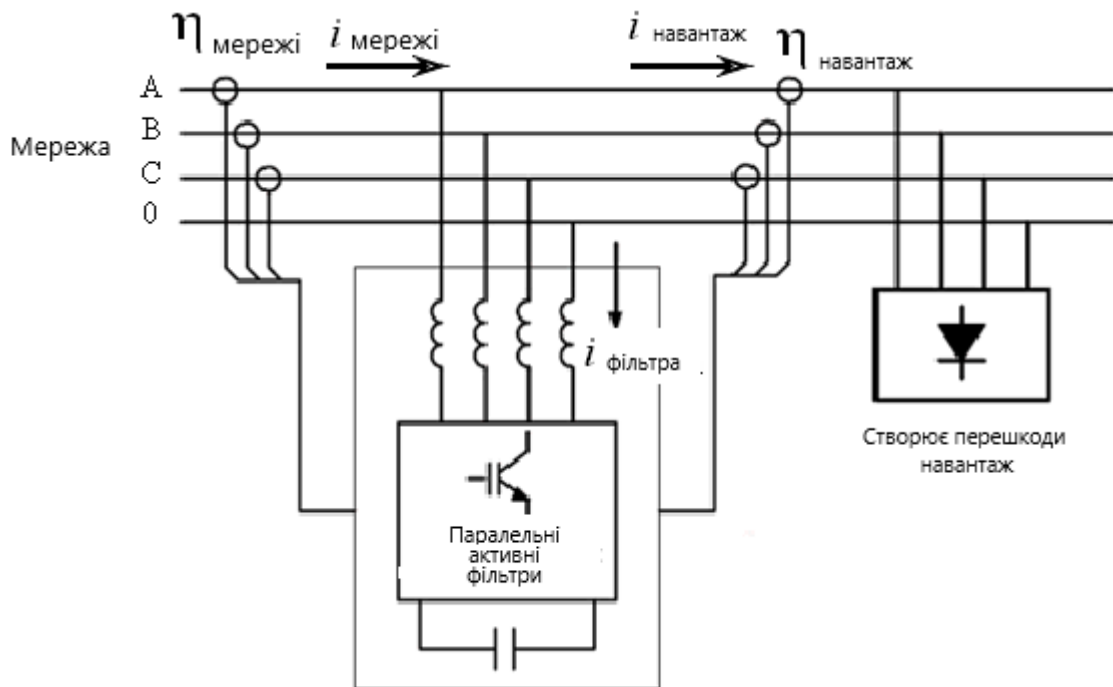


Рисунок 1.4 – Спрощена принципова схема силового активного фільтра

Активні фільтри виокремлюються беззаперечними перевагами, які визначають їх ефективність у вирішенні проблем неякісної електроенергії.

Серед цих переваг важливі такі аспекти:

1. Адаптація до форм кривих фазних напруг: Активні фільтри гнучко реагують на різноманітні форми кривих фазних напруг, адаптуючись до поточних умов.

2. Незалежність від рівня навантаження: Робота активних фільтрів не залежить від рівня навантаження споживачів, забезпечуючи стабільну ефективність.
3. Компенсація несиметрії і несинусоїдальності: Активні фільтри в змозі компенсувати як несиметричність, так і спотворення синусоїдальності фазних напруг.
4. Можливість компенсації декількома споживачами: Одним активним фільтром можна компенсувати спотворення напруги для кількох споживачів.
5. Корекція коефіцієнта потужності: Активні фільтри дозволяють вирішувати завдання корекції коефіцієнта потужності у споживачів.

Однак, слід відзначити, що головним недоліком активних фільтрів є їх висока вартість. При необхідності компенсації великих реактивностей, особливо під час пуску, силові ключі повинні мати велику потужність, що робить такі пристрої порівнянно вартісними із частотними перетворювачами.

У той час як сучасні частотні перетворювачі повністю вирішують проблеми неякісної напруги живлення для асинхронних двигунів, вони також пропонують ряд додаткових переваг. Зокрема, це можливість здійснення плавного пуску з контрольованими струмами і моментом, регулювання швидкості виробничого механізму, реалізація зворотного зв'язку та захисти за технологічними параметрами.

В умовах високої ефективності та багатофункціональності частотні перетворювачі стають більш перспективними для вирішення викликів, пов'язаних із якістю електроенергії. Можливе інтегрування функцій активних фільтрів безпосередньо в частотні перетворювачі, що відкриває можливість для одночасного регулювання швидкості та групової корекції напруги живлення.

Пасивні фільтри, зокрема послідовні та паралельні LC-ланцюги, налаштовані на резонансні режими [18-22], є іншим підходом до покращення якості електроенергії. Вони вирізняються низькою вартістю, довговічністю та

мінімальними вимогами до обслуговування, надаючи при цьому ефективний захист асинхронних двигунів.

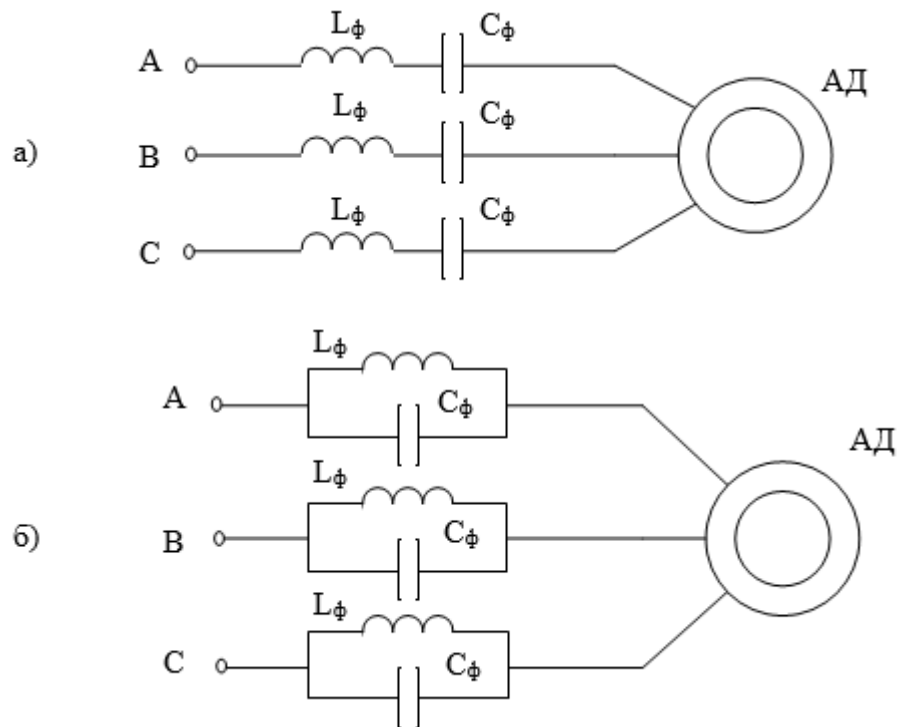


Рисунок 1.5 - Схеми підключення послідовних (а) і паралельних пасивних LC-фільтрів

Недоліки пасивних фільтрів включають:

1. Неможливість коригування несиметрії напруги живлення: Пасивні фільтри не здатні ефективно виправляти асиметрію напруги живлення, що виникає через нерівномірний розподіл між фазами електроприймачів.
2. Нестабільність резонансних режимів для деяких типів фільтрів через нестабільність параметрів споживачів: Резонансні режими у пасивних фільтрах можуть бути нестабільними для певних типів фільтрів через зміни параметрів споживачів, що може впливати на їхню ефективність.

Для успішного застосування індивідуальних пасивних фільтрів потрібно вирішувати такі завдання:

а) Вибір типу фільтра: Обирання типу фільтра, який найефективніше коригує напругу на вході автоматичного пристрою.

б) Визначення параметрів фільтра: Розрахунок індуктивності та ємності фільтра, які забезпечують оптимальну роботу автоматичного пристрою.

в) Знаходження компромісу між технічними вимогами і вартістю: Проведення техніко-економічного обґрунтування для досягнення оптимального співвідношення між технічними характеристиками, такими як індуктивність, ємність та потужність елементів фільтра, та їхньою вартістю.

Для аналізу та покращення якості електроенергії на промисловому підприємстві чи в окремому цеху можна класифікувати різноманітні методи відповідно до показників якості, що підлягають покращенню. Ці методи можна розподілити за впливом на різні параметри, такі як несиметрія, спотворення синусоїдальності тощо [24].

Симетрію напруги, що виникає внаслідок нерівномірного розподілу між фазами електроприймачів, можна контролювати, обмежуючи її до допустимих меж за допомогою схемних рішень або використанням спеціальних симетрувальних пристроїв [25 - 29]. Останній підхід дозволяє компенсувати еквівалентні струми зворотної послідовності, які виникають внаслідок несиметричних навантажень, і пов'язані з ними напруги. Розрізняють такі методи симетрування, як індивідуальний, груповий, централізований та комбінований.

Індивідуальні симетрувальні пристрої розташовуються безпосередньо біля електроприймачів. При груповому симетруванні в різних точках мережі встановлюється кілька таких пристроїв, кожен з яких відповідає за певний сегмент мережі і підключений до групи несиметричних електроприймачів. У випадку централізованого симетрування в розподільній мережі використовується один такий пристрій. Комбінований підхід передбачає застосування двох чи трьох різновидів симетрувальних пристроїв.

Індивідуальний метод дозволяє вирішувати проблему несиметрії безпосередньо на рівні споживача, але водночас вимагає нераціонального

використання потужності силових елементів захисних пристроїв. Централізований підхід потребує меншої потужності для елементів симетрувальних пристроїв, але при цьому залишається проблема несиметрії струмів у мережі з нерівномірно розподіленими навантаженнями. Груповий метод поєднує переваги і недоліки індивідуального та централізованого підходів. Вибір методу симетрування визначається, головним чином, параметрами мережі та характеристиками навантаження.

Симетрувальні пристрої можуть бути реалізовані у вигляді некерованих або керованих залежно від графіка навантаження. Існує значна кількість схем таких пристроїв, які мають як електричні, так і електромагнітні зв'язки між їхніми елементами. На рисунку 1.6 наведено спрощені принципові схеми симетрувальних пристроїв [26].

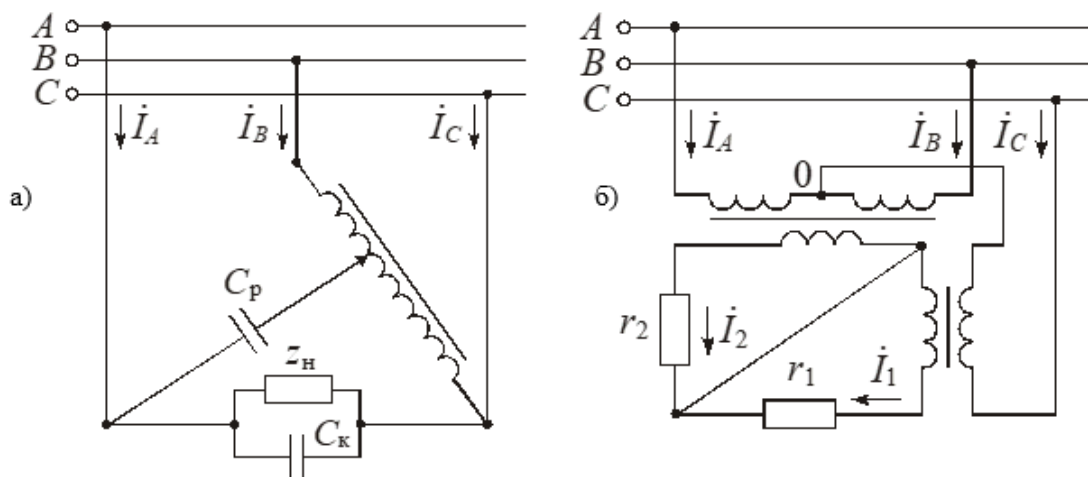


Рисунок 1.6 - Спрощені схеми пристрою автотрансформаторного (а) і трансформаторного (б) типів

Застосування також знаходять компенсуючі пристрої [28 - 30], що складаються із фільтрів вищих гармонік, зібраних на основі БК симетруючого пристрою та несиметричних фільтрів. Спрощена принципова схема фільтрокомпенсуючого пристрою представлена на рисунку 1.7. Його принцип дії полягає в створенні резонансу напруг на частотах вищих гармонік. Послідовні LC-ланцюги для останніх є ланцюгами короткого замикання.

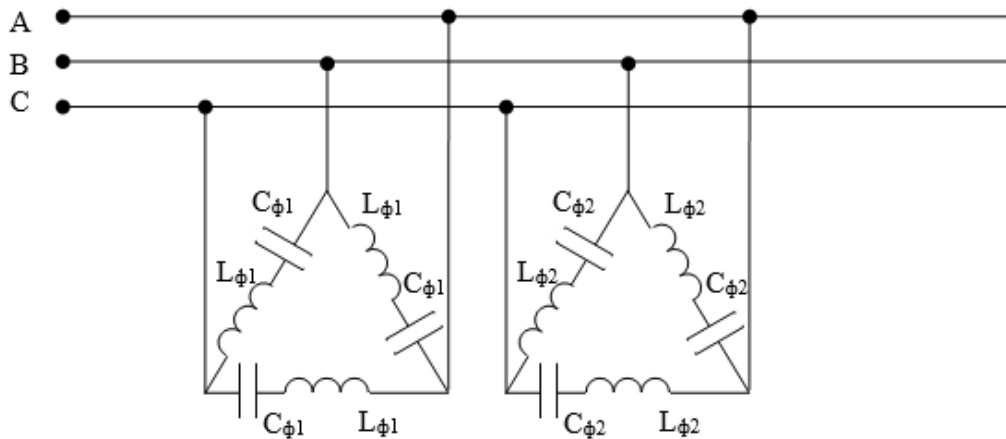


Рисунок 1.7 – Спрощена принципова схема фільтрокомпенсуючого пристрою

Зменшення рівнів вищих гармонік в електричних мережах становить частину загального завдання з редукції впливу нелінійних навантажень на мережу живлення та покращення якості електроенергії в системах електропостачання підприємств. Комплексний підхід до цього завдання, що ґрунтується на використанні багатофункціональних пристроїв, виявляється економічно більш виправданим, ніж, наприклад, застосування заходів щодо поліпшення форми струму мережі перетворювача. Один із прикладів таких багатофункціональних пристроїв - резонансні фільтри, відомі як фільтрокомпенсуючі пристрої. Вони, крім зниження рівнів вищих гармонік, вводять реактивну потужність в мережу живлення.

При паралельному з'єднанні LC-ланцюгів, налаштованих на частоти окремих гармонік, створюється цепочковий фільтрокомпенсуючий пристрій. У цьому випадку дефіцит реактивної потужності на шинах підстанції може бути повністю скомпенсований за допомогою батарей конденсаторів, і встановлена потужність конденсаторів використовується на рівні 80-90%. Таким чином, фільтрокомпенсуючі пристрої представляють собою найбільш простий і економічний тип фільтрів, що обумовило їх широке використання.

2 ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРИВОДІВ

2.1 Підвищення ефективності використання електроприводів

У напрямку поліпшення ефективності використання електроприводів визначено ряд заходів:

- а) Виключення або мінімізація режимів холостого ходу;
- б) Оптимізація динамічних режимів;
- в) Вибір раціонального способу регулювання швидкості в залежності від характеру навантаження;
- г) Вибір раціонального способу і діапазону регулювання швидкості електропривода залежно від технологічних умов роботи машин і механізмів;
- д) Підвищення завантаження робочих машин;
- е) Мінімізація струму і втрат енергії АД при зміні навантаження;
- ж) Використання акумуляторів енергії за необхідності;
- з) Використання компенсаторів реактивної потужності.

У контексті приводів змінного струму варіантом схеми керованого пуску може служити схема з тиристорним регулятором напруги (ТРН) у колі статора. Вартість таких пристроїв приблизно в п'ять разів нижче вартості систем частотно-регульованого електропривода. В окремих випадках застосування пускових систем може підвищити час наробітку на відмову синхронних двигунів у кілька разів, а також робочих коліс відцентрового насоса на 15 – 75% тощо. Іноді пуски двигунів утруднюються через високу концентрацію робочого тіла в робочій частині турбомеханізму (наприклад, руда в млині), заклинювання коліс насосів та інше. За таких умов, навіть при повній напрузі живлення, пусковий момент двигуна може бути меншим моменту зрушення механізму, і традиційна схема ТРН для пуску таких технологічних машин не завжди дає необхідного позитивного результату. У цьому випадку є виправданим переведення ТРН у режим перетворювача частоти, що дозволяє здійснити передпускове прокручування агрегату при

частотах 0 – 0,7 Гц. Використання пускових пристроїв дозволяє вирішити дві пов'язані задачі: забезпечити реальне енергозбереження засобами електропривода і зберегти працездатність механічного й електромеханічного устаткування.

Зниження продуктивності машин і установок може впливати на ресурс їх працездатності через збільшення числа пусків електричних двигунів, особливо в регульованих електроприводах. Враховуючи це, важливо враховувати наступне:

1. У випадках значного зниження продуктивності пристроїв і відсутності можливості використання регульованого електропривода через його високу вартість, ефективним резервом економії електроенергії можуть бути періодичні відключення енергоємних споживачів (з умови непорушення технологічного процесу). Для цього можна використовувати спеціалізоване енергозберігаюче устаткування, таке як пускові системи, які забезпечують як безпосередню економію енергоресурсів, так і працездатність електричних машин.
2. Відхилення напруги живлення, особливо через відсутність засобів ефективного регулювання, може спричинити зростання споживаної реактивної потужності асинхронними двигунами, втрати генерування синхронними машинами, збільшення втрат у сталі та підвищення аварійності двигуна.
3. Неякісна напруга живлення та порушення використання енергії можуть викликати не лише збільшення втрат, але й появу змінних складових електромагнітного моменту двигуна. Ці змінні складові можуть спричинити високочастотні вібрації елементів конструкції, передчасне старіння ізоляції та збільшення аварійності електроустаткування.
4. Важливим аспектом є загальний стан електричних машин підприємства, оскільки неякісний технічний стан електричних машин має прямий вплив на витрати на їх ремонт і може призвести до збитків через зупинку або порушення технологічного процесу. Важливо враховувати, що стан

електричних машин залежить не лише від якості ремонту, але і від зміни характеристик електротехнічної сталі, що може впливати на розподіл втрат у двигуні та зміни теплового балансу, що призводить до зменшення реальної навантажувальної здатності [16].

Як правило, необхідність регулювання швидкості чи моменту електроприводів виробничих механізмів визначається технологічними вимогами. Наприклад, для точного позиціонування кабіни ліфта може бути необхідне зниження швидкості перед зупинкою. Однак існують механізми безперервного транспорту, такі як конвеєри, вентилятори та насоси, які працюють із нерегульованими асинхронними електроприводами, що надають руху робочих органів постійну швидкість незалежно від завантаження механізмів. У випадку неповного завантаження робота із постійною швидкістю характеризується підвищеною питомою витратою електроенергії порівняно з номінальним режимом. Зниження швидкості механізмів безперервного транспорту при недовантаженні дозволяє виконувати необхідну роботу з меншою питомою витратою електроенергії. У такому випадку економічний ефект може бути вищим також за рахунок поліпшення експлуатаційних характеристик технологічного устаткування. Наприклад, при зниженні швидкості може зменшитися знос тягового органу транспортера, а термін служби трубопроводів може збільшитися завдяки зниженню тиску [21].

З іншого боку, висувається необґрунтоване бажання використовувати плавно регульовані системи привода з великим діапазоном регулювання для цих установок. Для механізмів з вентиляторним характером навантаження можна отримати досить великий діапазон регулювання продуктивності, не перевищуючи 20% зміни швидкості [8].

Ще одним напрямком енергозбереження є розробка спеціальних схем, які мінімізують негативний вплив на енергетичні показники при відхиленні навантаження від номінального режиму. Спеціальні регулятори електричної енергії (регулятори напруги), розташовані між джерелом живлення і статором двигуна, крім енергозбереження також виконують інші функції, такі як

керування режимами пуску і гальмування, регулювання швидкості і моменту, захист і діагностика. Це підвищує технічний рівень привода та збільшує його надійність.

При роботі асинхронних двигунів часто відбувається недовикористання встановленої потужності, завищення їх потужності та недовантаження. Регулювання напруги на статорі асинхронного двигуна при постійній частоті є найекономічнішим режимом його роботи при зміні навантаження. Це мінімізує споживаний двигуном струм і, отже, втрати електроенергії в ньому [4-8].

Регулювання напруги асинхронного двигуна у функції струму дозволяє знизити втрати електроенергії до 5%, що при широкому застосуванні асинхронного електропривода дозволяє отримати значний економічний ефект. Проблема акумуляторів енергії для систем електропривода є досить важливою. Акумулятори енергії з різними принципами акумуляції можуть бути перспективними насамперед для транспортних систем.

Використання спеціалізованих енергозберігаючих устаткувань, таких як регулятори напруги, та нові технології, такі як малогабаритні ємнісні акумулятори, може призвести до створення ефективних накопичувально-компенсуючих пристроїв для сучасних електроприводів з відповідними системами керування [3-6].

2.2 Аналіз та вибір схеми перетворювача

Регулювання швидкості асинхронних двигунів (АД) шляхом зміни частоти подачі напруги є широко використовуваним методом для якісного управління швидкістю АД. Принцип цього методу базується на можливості зміни швидкості АД, відповідно до виразу $w_0 = 2\pi f_1 / p$, шляхом зміни частоти f_1 живлячої напруги, що призводить до отримання різних штучних характеристик. Цей метод забезпечує плавне регулювання швидкості в широкому діапазоні, і отримані характеристики відзначаються високою

жорсткістю. На відміну від інших методів, частотний спосіб регулювання швидкості АД не призводить до збільшення його ковзання, що дозволяє знизити втрати потужності.

Для досягнення оптимальних показників роботи АД, таких як коефіцієнти потужності, корисної дії і перевантажувальної здатності, необхідно одночасно змінювати частоту та напругу, яка подається на АД. Закон зміни напруги в цьому випадку залежить від характеру моменту навантаження M_c . Наприклад, при постійному моменті навантаження $M_c = \text{const}$ співвідношення буде мати вигляд

$$U_1/f_1 = \text{const.}$$

Для характеру, вентилятора моменту навантаження, співвідношення матиме вигляд

$$U_1/f_1^2 = \text{const,}$$

а при моменті навантаження, обернено пропорційному швидкості

$$U_1/\sqrt{f_1} = \text{const.}$$

Цей частотний метод регулювання дозволяє досягти оптимальних показників порівняно з іншими методами і може бути успішно використаний навіть з найпростішим типом асинхронного двигуна - з короткозамкнутим ротором. Реалізація частотного способу використовує перетворювач частоти (рисунок 2.1), який дозволяє також регулювати напругу на статорі АД.

Перетворювачами частоти називають пристрої, які здійснюють перетворення змінної напруги однієї частоти, яка може бути постійною або регульованою, в змінну напругу іншої частоти, також постійної або регульованої. Такі пристрої, які використовують однокаскадне перетворення частоти, отримали назву перетворювачів частоти з безпосереднім зв'язком або

циклоконверторів за кордоном (останніми роками їх також називають матричними перетворювачами, оскільки вони базуються на повністю керованих вентелях). Термін «безпосередній зв'язок» використовується для відрізнєння цих перетворювачів частоти від двокаскадних (багатокаскадних) перетворювачів, що складаються з випрямляча та автономного інвертора, також відомих як перетворювачі частоти з проміжною ланкою постійного струму чи напруги, залежно від типу автономного інвертора (струму чи напруги).

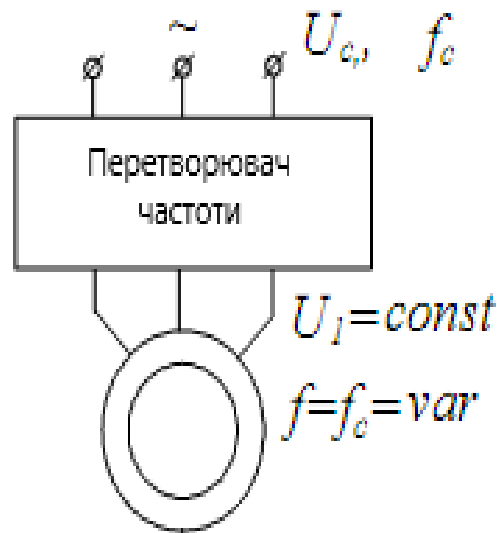


Рисунок 2.1 – Схема частотного регулювання швидкості АД за допомогою ПЧ

Для забезпечення двигуном електроенергії з визначеними параметрами амплітуди та частоти напруги в кожній фазі, а також для управління та регулювання параметрів потоку енергії вводиться статичний перетворювач частоти (ПЧ). З метою отримання максимального коефіцієнта корисної дії (ККД) та мінімізації спотворення, необхідно живити двигун квазібезперервним струмом, який досягається високою частотою широкосмугового модульованого сигналу (ШІМ) в управлінні. Цей етап вирішує завдання покращення енергетичних та динамічних характеристик приводу.

У сучасний період найбільш розповсюдженим та перспективним типом

електроприводу (ЕП) є електропривід із перетворювачем частоти, де використовується ланка постійного струму – асинхронний двигун (ПЧ-АД). У більшості випадків для цього типу приводу застосовується автономний інвертор напруги (АІН) із широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ).

Докладно розглянемо схему перетворювача для живлення асинхронного двигуна, який використовується для витяжного вентилятора (димососа) сушарки сировини для виготовлення вогнетривів і живиться від мережі 380 В, 50 Гц. Для даного приводу обрано трифазну схему перетворювача, що оптимально відповідає цим умовам. Розглянемо складові схеми перетворювача детальніше: силова частина включає вхідні дроселі, напівкерований випрямляч, дроселі в колі постійного струму, блок конденсаторів і вихідний інвертор, який базується на IGBT-модулях (див. рис. 2.2).

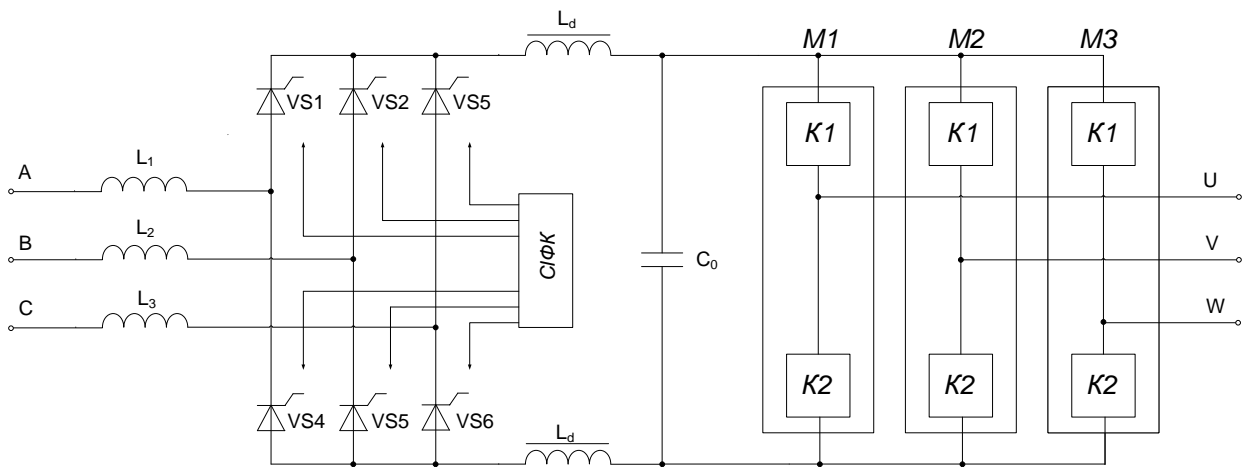


Рисунок 2.2 – Схема перетворювача частоти

Випрямляч складається з тиристорно-діодних модулів, які зібрані за схемою Ларіонова. Вони призначені для випрямлення вхідної змінної напруги та забезпечення з'єднання силової частини електропривода з мережею. Хоча мостова схема має вдвічі більше напівпровідників, вона має численні переваги перед нульовою схемою, що призвело до її широкого застосування в електроприводах. Всі напівкеровані випрямлячі мають невеликий зсув

споживаного струму відносно живильної напруги, але їх форма споживаного струму несиметрична, і діапазон регулювання випрямленої напруги обмежений, що ускладнює можливість інверторного режиму. Такі випрямлячі застосовуються в основному в тих випадках, коли не вимагається великий діапазон регулювання та в нереверсивних електроприводах.

Блок конденсаторів та дроселів в колі постійного струму створюють низькочастотний фільтр для випрямленої напруги.

Вихідний інвертор містить модулі IGBT та відповідні схеми захисту (див. рис. 2.3).

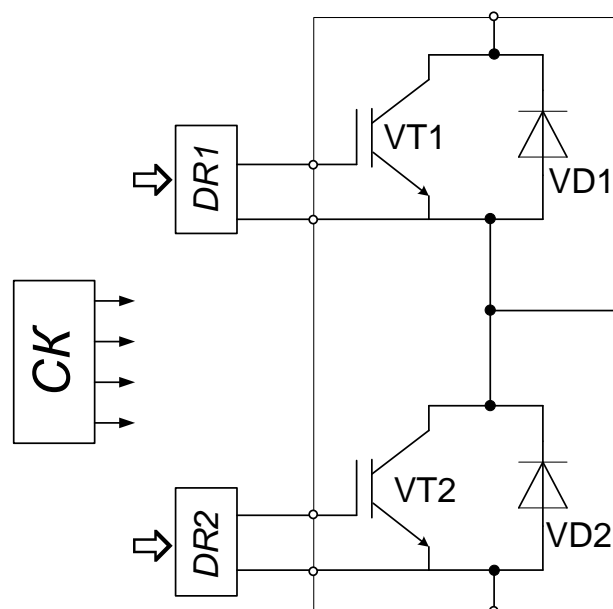


Рисунок 2.3 – IGBT модуль

Інвертор складається з трьох фазових модулів і забезпечує на вихідних клеммах U, V, W (рис. 2.4) трифазну напругу, виконуючи функції регулювання частоти і напруги.

IGBT-модулі, які знаходяться в інверторі, виконують комутацію електродвигуна з ланкою постійної напруги з високою частотою тактів. Цей процес забезпечує встановлення синусоїдальної характеристики струму, яку проілюстровано на рис. 2.5. Напруга розглядається між двома вихідними клеммами, і максимально можлива амплітуда зв'язаної вихідної напруги

залежить від величини напруги проміжного контура U_d .

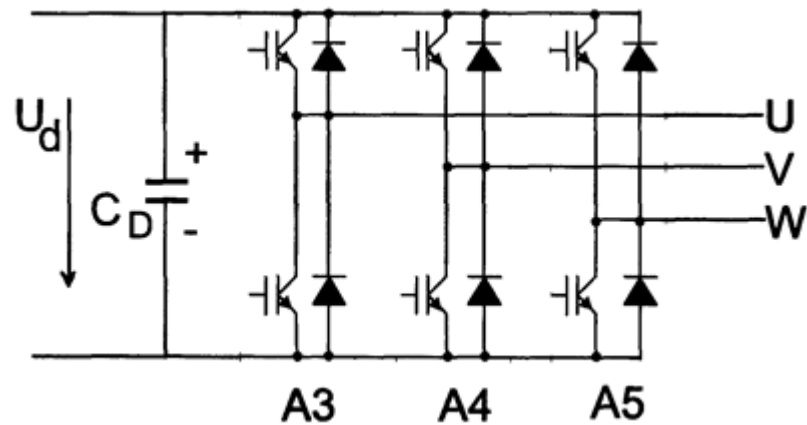


Рисунок 2.4 – Схема автономного інвертора напруги

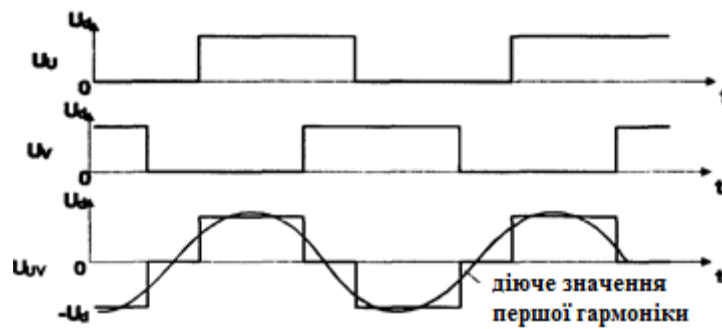


Рисунок 2.5 – Тимчасові діаграми роботи інвертора в повноблоковому режимі

Ефективне значення вихідної напруги можна регулювати шляхом використання широко-імпульсної модуляції (ШІМ), яка ґрунтується на зміні тривалості відкриття транзисторів і короткочасних виключень в межах коливань першої гармоніки. Частота, з якою повторюється форма кривої вихідної напруги, визначається частотою на виході інвертора і проілюстрована на рисунку 2.6.

Оскільки фазові і частотні зрушення напруги інвертора можуть бути довільно регульованими, це відкриває можливість використовувати електродинамічне гальмування, використовуючи здатність асинхронного тягового двигуна функціонувати у режимі генератора. У такому випадку

інвертор передаватиме енергію назад у проміжний контур.

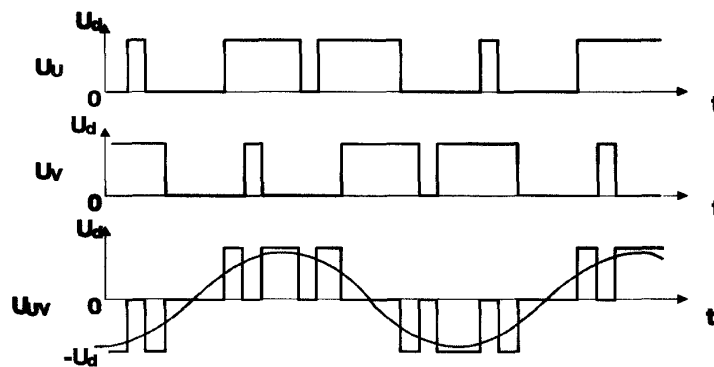


Рисунок 2.6 – Тимчасові діаграми роботи інвертора в режимі ШІМ

Під час режиму генератора в напрямі моментів двигунів відбувається протилежне порядку проходження фаз. У результаті, напруга і струм мають великий фазовий зсув, який проілюстровано на рис. 2.7. Завдяки контролю коливань першої гармоніки інвертор визначає фазове положення між напругою і струмом.

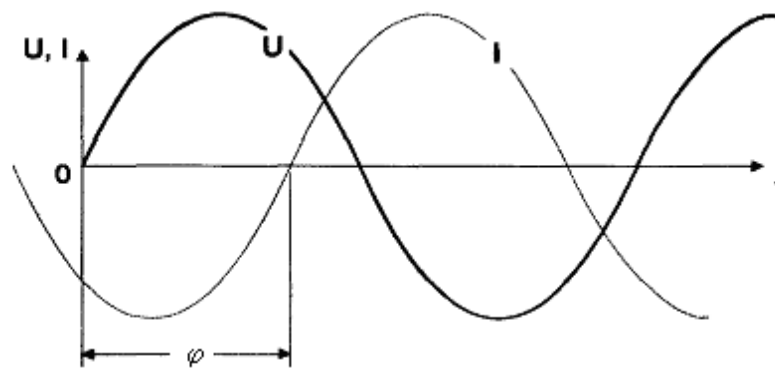


Рисунок 2.7 – Тимчасова діаграма інвертора в режимі гальмування

Напруга, що виходить з імпульсного інвертора, не має чіткої синусоїдальної форми і включає вищі гармоніки. Навіть з урахуванням згладжування струмом індуктивності розсіювання двигуна, в системі присутні вищі гармоніки, які можуть викликати коливальні моменти та втрати в самому двигуні. Завдяки високій частоті перемикань (тактова частота) в імпульсному інверторі, пульсація струму мінімізується.

2.3 Вибір елементів схеми перетворювача частоти

Наукове обґрунтування та вибір напівпровідникових пристроїв у силовій електроніці є важливою задачею. Серед найбільш поширених типів таких пристроїв визначаються: діоди низькочастотні, швидковідновлювані, з підвищеною швидкодією, лавинні; тиристори – що не замикають (Th), що замикають (GTO), фототиристори; силові біполярні транзистори (BJT); силові польові Моп-транзистори (MOSFET); біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT).

У сучасних розробках силових напівпровідникових модулів застосовуються різноманітні типи приладів. Виробництво дискретних силових напівпровідникових приладів ведеться багатьма фірмами, і разом з ним розробляються силові напівпровідникові модулі, які використовують усі вищезазначені типи приладів.

Близько 150 компаній у всьому світі займаються виробництвом силових напівпровідникових приладів і модулів. Номенклатура їхніх виробів налічує кілька тисяч, а діапазон основних параметрів охоплює широкий спектр: від 10 до 4500 А за струмом, від 100 до 8000 В за напругою, і від десятків герц до 1 МГц за частотою.

При виборі елементів для силової схеми перетворювача, важливо враховувати витрати на систему керування. Логічна частина системи керування залежить від типу і потужності силових напівпровідникових перетворювачів (СНП), які використовуються у силовій схемі. Виконавчі пристрої системи керування, такі як вузли формування траєкторії робочої точки (ФТРТ), прямо пов'язані з характеристиками та параметрами СНП.

З огляду на необхідність збільшення струмів пристроїв ФТРТ, зростає їх потужність. При цьому виникають певні труднощі у створенні джерел живлення для розв'язання потенційних проблем між вузлами ФТРТ.

У порівнянні із силовими біполярними транзисторами (BJT), силові

польові транзистори MOSFET та IGBT вимагають менше потужності для ФТРТ, оскільки їхнє керування базується на потенційному, а не струмовому принципі.

При розрахунках силової схеми перетворювача, дотримуються методики, яка описана у [3]. Починаючи з визначення напруги ланки постійної напруги, проводяться докладні розрахунки елементів системи.

Визначаємо напругу ланки постійної напруги:

$$U_d = \frac{U_{d0}}{k_u},$$

де U_{d0} – випрямлена напруга, $U_{d0} = U_n \cdot 2.34 = 380 \cdot 2.34 = 889 \text{ В}$;

k_u – коефіцієнт запасу по напрузі, $k_u = 1.05 \div 1.15$, приймаємо $k_u = 1.05$;

$$U_d = \frac{889}{1.05} = 846 \text{ В}$$

Визначаємо величину зворотної напруги (клас) силових напівпровідникових приладів (IGBT транзисторів), вживаних в автономному інверторі:

$$U_{обр.} = U_d \cdot k_1,$$

де k_1 – коефіцієнт, що враховує можливі перенапруження в контактній мережі при спрацьовуванні розрядника від атмосферних перенапружень і наявність захисного модуля в ланцюзі тягового перетворювача $k_1 = 1.5 \div 2.0$.

$$U_{обр.} = U_d \cdot k_1 = 846 \cdot 2.0 = 1692 \text{ В}$$

Приймаємо транзистори 20-го класа ($U_{обр.}=2000 \text{ В}$).

Величину діючого значення першої гармоніки фазної напруги обмотки, статора асинхронного двигуна, визначаємо за наступною формулою:

$$U_{1\Phi(ном)} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_d = 0,45 \cdot U_d,$$

$$U_{1\Phi(ном)} = 0,45 \cdot 846 = 380 \text{ В}$$

Лінійна напруга обмотки дорівнює:

$$U_{1л(ном)} = \sqrt{3} \cdot U_{1\Phi(ном)},$$

$$U_{1л(ном)} = \sqrt{3} \cdot 380 = 660 \text{ В}$$

Величина номінального струму фази статора при з'єднанні обмоток по схемі „зірка” визначається по формулі:

$$I_{1\Phi(ном)} = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{3 \cdot U_{1\Phi(ном)} \cdot \eta_{дв} \cdot \cos \varphi}$$

де $\eta_{дв}$ – коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна, $\eta_{дв} = 0,94$;

$P_{ном}$ – номінальна потужність асинхронного тягового двигуна, $P_{ном} = 75 \text{ кВт}$;

$\cos \varphi = 0,86 \div 0,9$.

$$I_{1\Phi(ном)} = \frac{75 \cdot 10^3}{3 \cdot 380 \cdot 0,94 \cdot 0,9} = 78 \text{ А}$$

Пусковий діючий струм АІН рівний:

$$I_{1\Phi(\text{пуск})} = 1,4 \cdot I_{1\Phi(\text{ном})},$$

$$I_{1\Phi(\text{пуск})} = 1,4 \cdot 78 = 109 \text{ A}$$

Амплітудне значення пускового струму АІН рівне:

$$I_{1\Phi(\text{ампл})} = \sqrt{2} \cdot I_{1\Phi(\text{пуск})},$$

$$I_{1\Phi(\text{ампл})} = \sqrt{2} \cdot 109 = 154 \text{ A}$$

Максимальне значення струму на транзисторі АІН рівне:

$$I_{\tau(\text{max})} = 1,15 \cdot I_{1\Phi(\text{ампл})},$$

де 1,15 – коефіцієнт, що враховує пульсацію струму в ланцюзі фази статора асинхронного тягового двигуна.

$$I_{\tau(\text{max})} = 1,15 \cdot 154 = 177 \text{ A}$$

Середній струм транзистора АІН рівний:

$$I_{\tau(\text{ср})} = \frac{I_{\tau(\text{max})}}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot (1 + \cos \varphi),$$

$$I_{\tau(\text{ср})} = \frac{177}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot (1 + 0,9) = 76 \text{ A}$$

Середнє значення струму в кожному діоді АІН рівне наближеному середньому значенню струму в транзисторі:

$$I_{д(ср)} = I_{т(ср)} = 76 \text{ А}$$

Середнє значення струму в початковій стадії пуску визначається по формулі:

$$I_{т(пуск)} = \frac{I_{т(max)}}{\pi}$$

$$I_{т(пуск)} = \frac{177}{\pi} = 56 \text{ А}$$

Граничне значення струму в транзисторі АІН, що замикається, рівне:

$$I_{т(пред)} = I_{т(пуск)} = 56 \text{ А}$$

Струм, споживаний АІН, рівний:

$$I_d = 1,35 \cdot I_{1\Phi(ном)} \cdot \cos \varphi$$

$$I_d = 1,35 \cdot 78 \cdot 0,9 = 95 \text{ А}$$

Потужність, підведена до АІН, визначається таким чином:

$$P_d = U_d \cdot I_d,$$

$$P_d = 846 \cdot 95 = 80,2 \text{ кВт}$$

Місткість фільтрового конденсатора ланки постійної напруги визначаємо по наступній формулі:

$$C = \frac{k_n \cdot I_d}{628 \cdot \Delta U_{c(\max)}},$$

де k_n – коефіцієнт пульсації випрямленого струму, $k_n=1,2\div 1,3$

$\Delta U_{c(\max)}$ – допустима пульсація напруги на конденсаторі, В

$$\Delta U_{c(\max)} = 0,05 \cdot U_d = 0,05 \cdot 846 = 42,3 \text{ В}$$

$$C = \frac{1,25 \cdot 96}{628 \cdot 42,3} = 4517 \text{ мкФ}$$

Місткість фільтрового конденсатора для придушення пульсації напруги, обумовленою роботою АІН, рівна

$$C' = \frac{I_{1(\text{ампл})}}{2\pi \cdot f \cdot \Delta U_{c(\max)}},$$

де $f = 6 \cdot f_{1(\text{ном})}$ – частота комутації

$$C' = \frac{154}{2\pi \cdot 6 \cdot 450 \cdot 42,3} = 193 \text{ мкФ}$$

Місткість фільтрового конденсатора, обумовлена придушенням пульсацій напруги, викликаних управлінням мережевим перетворювачем по методу ШІМ:

$$C'' = \frac{I_d}{8 \cdot f_{1(\text{ном})} \cdot \Delta U_{c(\text{max})}},$$

де $f_{1(\text{ном})}$ – тактова частота перетворювача

$$C'' = \frac{96}{8 \cdot 450 \cdot 42.3} = 630 \text{ мкФ}$$

Середнє значення струму у момент пуску:

$$I_{d\text{max}} = I_d \cdot K,$$

де K – коефіцієнт перевантаження, приймаємо $K = 2.5$.

$$I_{d\text{max}} = 96 \cdot 2.5 = 240 \text{ А}$$

Струм фази перетворювача:

$$I_v = \frac{I_d}{3},$$

$$I_v = \frac{96}{3} = 32 \text{ А}$$

Струм фази у момент пуску:

$$I_{v.\max} = \frac{I_{d.\max}}{3}$$

$$I_{v.\max} = \frac{240}{3} = 80 \text{ A}$$

Розрахунок дроселя для контуру випрямленого струму. Граничний коефіцієнт $K_{\text{сп}}=0.05$. Індуктивний опір мережі живлення для мостових схем:

$$X_d = 2,0 \cdot X_0 = 2,0 \cdot 0,48 = 0,96.$$

Граничне значення струму при α_{\max} :

$$I_{d.\text{сп}} = (0,05 \div 0,1) \cdot I_{d.\text{н}} = 0,05 \cdot 96 = 4,8 \text{ A}$$

Індуктивність дроселя:

$$\begin{aligned} L_{\delta} &= \left(\frac{U_{d0}}{I_{d.\text{сп}}} \cdot K_{\text{сп}} - 2X_d \right) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cdot \left(\frac{846}{4,8} \cdot 0,05 - 2 \cdot 0,96 \right) = \\ &= 0,022 = 22 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \end{aligned}$$

Обмеження пульсацій випрямленого струму:

Амплітуда першої гармоніки випрямленої напруги $\frac{U_{dm}}{U_{d0}} = 0,2$, при $\alpha=30^\circ$:

$$U_{dm} = 0,2 \cdot 889 = 178 \text{ B.}$$

Допустиме діюче значення першої гармоніки струму:

$$I_l = (0,07 \dots 0,1) \cdot I_d = 0,1 \cdot 96 = 9,6 \text{ A.}$$

Розробка системи керування перетворювачем. Система керування, розроблена для даного проекту, базується на напівпровідникових елементах, які можуть працювати на високих частотах, що сприяє отриманню високої якості напруги на виході. У ролі виконавчого силового елемента виступають IGBT модулі.

Основні елементи та вузли нової системи керування включають:

Контролер: Він відповідає за загальне управління електроприводом. Склад контролера включає мікропроцесори, енергонезалежний запам'ятовуючий пристрій, ланцюги введення аналогових і цифрових сигналів, реле, ланцюги управління інвертором, а також зв'язок з пультом управління та зовнішнім обладнанням. В програмі мікропроцесора втілені алгоритми оптимізації процесів горіння.

Пульт управління: Цей елемент містить алфавітно-цифровий індикатор, світлодіоди та кнопки для виведення інформації та введення команд оператора електроприводу.

Драйвери: Призначені для безпосереднього управління транзисторами вихідного інвертора. Вони забезпечують гальванічну розв'язку ланцюгів управління щодо напруги силової частини і захист транзисторів від струмів короткого замикання. Блок аналогових входів: Призначений для введення в систему управління сигналів від датчиків технологічних параметрів або аналогового датчика.

Датчик напруги та Датчики струму: Вони вимірюють величини випрямленої напруги на виході випрямляча та струму електроприводу відповідно, забезпечуючи захист системи. Блок живлення власних потреб і Блок живлення контролера: Вони відповідають за перетворення напруги ланки постійного струму вхідної або трифазної змінної напруги, необхідної для функціонування системи управління електроприводом.

Блок живлення зовнішніх навантажень: Цей блок відповідає за формування напруги живлення для датчиків технологічних параметрів і аналогового датчика. Система імпульсного формування керуючих сигналів (СІФК): Ця система призначена для управління вхідним силовим випрямлячем. Її завдання включає формування імпульсів для керування елементами силового випрямляча та забезпечення необхідного режиму роботи.

Керування IGBT модулями за допомогою драйверів. Біполярний транзистор з ізолюваним затвором (IGBT), який є повністю керованим напівпровідниковим пристроєм і має тришарову структуру, включає в себе механізми ввімкнення та вимикання, реалізовані через подачу та зняття позитивної напруги між затвором і джерелом.

IGBT представляє еволюцію технології силових транзисторів зі структурою метал-оксид-напівпровідник, керованих електричним полем (MOSFET-Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistor). Він об'єднує в собі два транзистори в одній напівпровідниковій структурі: біполярний, який формує силовий канал, і польовий, який формує канал керування. IGBT вводиться у силовий ланцюг через виводи біполярного транзистора E (емітер) і C (колектор), а в ланцюг керування - вивідом G (затвор).

Отже, IGBT має три зовнішні виводи: емітер, колектор, затвор, в той час як з'єднання емітера і стоку (D), бази і джерела (S) є внутрішніми. Це об'єднання дозволяє поєднати переваги польових і біполярних транзисторів: високий вхідний опір з великим струмовим навантаженням і низьким опором у ввімкненому стані.

Процес включення IGBT розділяється на два етапи: після подачі позитивної напруги між затвором і джерелом відбувається відкриття польового транзистора, формується n-канал між джерелом і стоком. Рух зарядів призводить до відкриття біполярного транзистора і виникнення струму від емітера до колектора. Таким чином, польовий транзистор керує роботою біполярного.

Зона безпечної роботи IGBT дозволяє надійно працювати без додаткових ланцюгів формування траєкторії перемикачів при частотах від 10 до 20 кГц для модулів з номінальними струмами в кілька сотень ампер. Ці характеристики відрізняють IGBT від біполярних транзисторів, з'єднаних за схемою Дарлінгтона.

Так само, як у випадку дискретних компонентів, MOSFET здійснили витіснення біполярних транзисторів у ключових джерелах живлення з напругою до 500 В, а дискретні IGBT виконують аналогічні функції у джерелах з вищими напругами (до 3500 В). На сьогодні транзистори IGBT виготовляються у вигляді модулів, як правило, у прямокутних корпусах із однобічним притиском і охолодженням ("Mitsubishi", "Siemens", "Semikron", тощо) та у таблетковому виконанні із двостороннім охолодженням ("Toshiba Semiconductor Group"). Модулі з однобічним охолодженням виготовляються у міцному пластмасовому корпусі з паяними контактами та ізольованою підставою, де всі електричні контакти розташовані у верхній частині корпусу, а відведення тепла здійснюється через основу.

Сучасні IGBT-модулі широко використовуються в створенні некерованих і керованих випрямлячів, автономних інверторів для живлення двигунів постійного і змінного струму середньої потужності, перетворювачів індукційного нагрівання, зварювальних апаратів, джерел безперебійного живлення, а також в побутовій та студійній техніці.

Завдяки невеликому струму керування IGBT, ланцюг керування може бути здійснений у конструктивно компактному драйвері. Ефективно розташовувати ланцюги драйвера в безпосередній близькості до силового ключа. У багатьох модулях IGBT, драйвери вже включені безпосередньо в їхню структуру. "Інтелектуальні" транзисторні модулі (ІТМ), що базуються на IGBT, також включають "інтелектуальні" пристрої захисту від струмів короткого замикання та системи діагностики для захисту від втрати керуючого сигналу, одночасної провідності в протилежних гілках силової схеми, втрати напруги живлення та інших аварійних ситуацій. У структурі ІТМ на базі IGBT

також може бути введена система керування з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) та однокристальний блок управління. В багатьох модулях передбачена схема активного фільтра для корекції коефіцієнта потужності та зниження вмісту вищих гармоній у живильній мережі.

Під час проектування силової схеми перетворювача були обрані IGBT транзистори від японської компанії HITACHI MBN400D33. Для цього типу модулів, відповідно до рекомендацій [12, 13], був обраний керуючий драйвер типу IGD608 від швейцарської компанії ST-Concept Technology Ltd.

Однією з ключових складових драйвера є імпульсний стабілізатор напруги, завданням якого є гальванічна ізоляція напруги джерела живлення системи керування від робочої напруги IGBT-транзистора, керованого конкретним драйвером. Гальванічна ізоляція досягається за допомогою імпульсного трансформатора з напругою ізоляції 8 кВ. До вторинної обмотки трансформатора підключено випрямний блок для подачі напруги на структурні вузли драйвера. Вхідна позитивна напруга в діапазоні 12 – 16 В подається на вивід VCC. Споживаний драйвером струм становить 450 мА. На вході також розташований накопичувальний конденсатор ємністю не менше 250 мкФ. Типова напруга живлення становить 15 В. Вимоги до імпульсів включають обмеження максимального робочого струму, що не перевищує 30 мА, з типовим значенням 10 мА. Через блок вхідного ланцюга, трансформаторний зв'язок і приймач імпульсів, керуючий імпульс подається на блок керуючої логіки.

Блок керуючої логіки призначений для формування необхідної форми керуючого імпульсу на затворі IGBT-транзистора. Крім того, на керуючу логіку надходить інформація від блоку перевірки напруги та блоку перевірки нагрівання силового IGBT-транзистора. Керуюча логіка генерує імпульс необхідної форми, який подається на підсилювач, вихід G якого подається на затвор IGBT-транзистора через проміжний опір розміром 5,6 Ом. Емітер IGBT-транзистора підключений до виводу драйвера E. Крім того, управляюча логіка подає імпульси на контролер виходу, який представляє собою ланку

зворотного зв'язку між драйвером і системою керування. Контролер виходу взаємодіє з системою керування через оптронний зв'язок і має виходи стану SO+ і SO-. Залежно від типу системи керування, вони можуть бути підключені у випадку мікропроцесорної системи керування або залишатися непідключеними. Через вивід драйвера С_b підключається ланцюг корекції, який складається з конденсатора ємністю 330 нФ.

Блок IGBT транзистора обладнаний вбудованими стабілітронами для захисту напруги стабілізації, яка не перевищує 15 В. Звичайна напруга на затворі IGBT транзистора складає 12 В і формується підсилювачем.

Блок перевірки перегріву силового IGBT транзистора підключається через виводи ME та Ref. Якщо перевірка перегріву не виконується, то вивід Ref повинен бути з'єднаний з виводом E через стабілітрон, напруга стабілізації якого складає 7,5 В. Вивід ME пов'язаний з виводом E за допомогою опору 68 Ом, конденсатора 5,6 нФ із виводом COM.

Обраний драйвер гарантує час наробітку на відмову не менше 2,5 млн. годин при розсіюванні потужності 6 Вт. Драйвер може постачати імпульсний струм 8 А при тривалості імпульсу 1 мс. Діапазон робочих температур становить від мінус 40 до плюс 105 °С. Робоча частота вбудованого блоку живлення складає 100 кГц.

З аналізу роботи та перерахованих характеристик впливає необхідність розробки блоку живлення для напруги 15 В, який забезпечить струм живлення драйвера не менше I_Д=450 мА. З урахуванням застосування n=6 драйверів IGD608, загальний струм джерела живлення становитиме:

$$I_{\text{БП}} = n \cdot I_{\text{Д}},$$

$$I_{\text{БП}} = 6 \cdot 0,45 = 3,15 \text{ А.}$$

Оскільки драйвер вже має вбудовану гальванічну розв'язку, це дозволяє зменшити кількість додаткових елементів в схемі і підвищити надійність системи.

Розробка системи керування драйверами. Керуючі драйвери отримують вхідні сигнали від системи керування, при цьому струм керування повинен знаходитися в межах від 10 мА до 30 мА згідно з паспортними даними драйвера [12, 13].

У розробленій силовій схемі шість IGBT транзисторів виконують роль автономного трифазного інвертора за мостовою схемою. Таким чином, перші шість транзисторів мають чітко визначений алгоритм роботи, який може бути виконаний в програмному режимі або реалізований за допомогою складного генератора імпульсів, що має шість вихідних каналів, зсунутих один відносно іншого.

Для мікропроцесорної системи реалізація комутатора фаз є відносно простою та нераціональною через обмежені обчислювальні потужності навіть в простих мікропроцесорах. Функцію комутатора каналів можна легко реалізувати на типовому мікроконтролері.

Мікроконтролер - це пристрій, який виконує функції логічного аналізу та керування і реалізується на одному або декількох кристалах. Зменшення функцій арифметичних операцій призводить до зменшення їхньої апаратурної складності і розвитку функції логічного керування.

Обрано однокристальний мікроконтролер загальнопромислового застосування типу K1816BE48 [13...17]. Цей однокристальний мікроконтролер у єдиному корпусі містить повний набір елементів для реалізації всіх необхідних функцій для побудови цифрової системи обробки даних і використовується в різноманітних системах автоматичного керування. Умовне графічне позначення мікросхеми наведено на рисунку 2.8.

Мікросхема конструктивно виконана в 40-вивідному корпусі, має ультрафіолетовий перепрограмуваний постійний запам'ятовувальний пристрій ємністю 1 Кбайт, обсяг пам'яті даних ємністю 64 байт. Всі виводи електрично сумісні з виводами мікросхем серій ТТЛ за рівнями напруг і струмів. Максимальна тактова частота 6 МГц. Напруга живлення 4,75 – 5,25 В. Далі наведемо призначення виводів зображеної мікросхеми. З огляду на, що у

вітчизняній літературі відсутня однаковість у ряді символічних імен виводів, у даному описі вони приводяться у двох варіантах. У дужках вказується номер виводу.

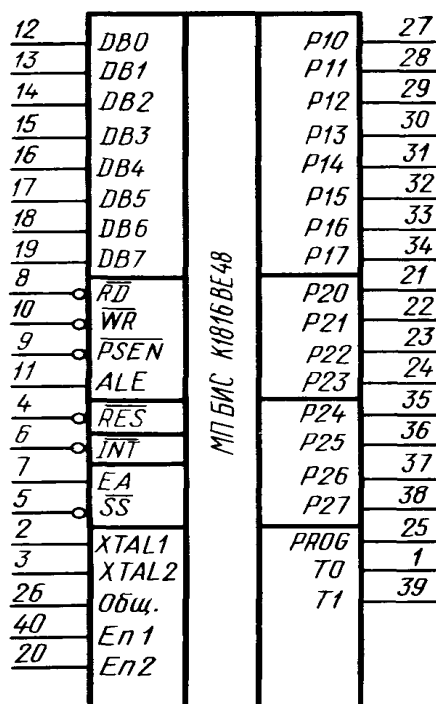


Рисунок 2.8 – Умовне графічне позначення мікросхеми K1816BE48

T0 (1) і T1 (39) – входи сигналу, що перевіряє за допомогою команд умовного переходу.

X1 (2) – вхід зовнішнього синхронізуючого імпульсу (від 1 до 6 МГц) або вхід підключення кварцового осцилятора.

X2 (3) – другий вхід для підключення кварцового осцилятора.

СКИДАННЯ, RES (4) – вхід, по якому відбувається ініціалізація процесора (загальне скидання).

КРОК, SS (5) – вхід, що використовується при покроковому виконанні програми.

ЗПР, INT (6) – вхід переривання.

РВД, EA (7) – вхід сигналу зовнішнього доступу.

ЧТ, RD (8) – вихідний стробуючий сигнал при читанні із зовнішньої пам'яті.

РВП, PSEN (9) – сигнал, що дозволяє звертання до зовнішньої пам'яті програм.

ЗП, WT (10) – вихідний строб, що діє під час запису із шини процесора в зовнішню пам'ять даних або пристрою вводу-виводу.

САВП, ALE (11) – строб адреси зовнішньої пам'яті.

Порт BUS.0-7 (12-19) – двонаправлений 8-розрядний канал.

ЗЕМЛЯ, V_{ss} (20) – потенціал землі.

Порт P.0-7 (21-24, 35-38) – квазидвонаправлений 8-розрядний порт вводу-виводу даних.

ПРОГ/СТБВВ, PROG (25) – вхід програмуючого імпульсу +25В; вихід стробуючого сигналу керування вводом-виводом.

V_{доп}, V_{DD} (26) – живлення для програмування СППЗУ; +25 В під час програмування, +5 В під час роботи для СППЗУ.

Порт P1.0-7 (27-34) – квазидвонаправлений 8-розрядний порт вводу-виводу даних.

V_{осн}, V_{CC} – основне живлення +5 В подається під час роботи та при програмуванні СППЗУ.

Програма комутатора каналів буде займати невеликий обсяг пам'яті, тому не передбачається підключення додаткових програмних пристроїв. Для керування шістьма драйверами будуть використані порти P1.0-5 (27-32).

Сигнали, що подаються на драйвери, будуть проходити через проміжні підсилювачі, оскільки вихід мікроконтролера забезпечує струм 0,4 мА при рівні логічної одиниці ТТЛ.

Розрахунок генератора тактових імпульсів. З [18] ми використовуємо схему генератора прямокутних імпульсів, побудовану на логічних елементах типу 2I-НІ (DD1.1-1.4). Мультивібратор реалізовано на елементах DD1.1-1.2. Елементи DD1.3-1.4 застосовуються для запобігання можливого жорсткого порушення коливань при підключенні напруги живлення, відомого як

замерзання мультівібратора. Мультівібратор виконується на інтегральній мікросхемі К155ЛА3.

Резистори R1 і R2 вибираються з урахуванням обмеження вихідного струму інтегральної мікросхеми в стані логічної одиниці.

$$R_1 = R_2 \geq \frac{U_{ВВЛХ}^1}{I_{ВВЛХ}^1},$$

де $U_{ВВЛХ}^1 = 4,5 \text{ В}$ – напруга логічної одиниці на виході елемента [18];

$I_{ВВЛХ}^1 = 0,4 \text{ мА}$ – струм логічної одиниці обраного елемента.

$$R_1 = R_2 \geq \frac{4,5}{0,4} = 11250 \text{ Ом}$$

Приймаємо відповідно до ДСТУ 2825 – 67 зі стандартного ряду опорів Е24 [19] величину опору 12 кОм.

Тривалість імпульсу визначимо по формулі:

$$t_{И} = \frac{1}{Q \cdot f},$$

де Q – шпаруватість. Т.к. у цьому випадку шпаруватість не грає ролі, а необхідно лише наявність переднього фронту імпульсу, то приймаємо її рівної 2.

$$t_{им} = \frac{1}{2 \cdot 900} = 0,000555 \text{ с.}$$

Параметри формуючих конденсаторів визначимо по формулі:

$$t_H = C \cdot (R_{BHX}^1 + R_1) \cdot \ln \frac{U_{BHX}^1}{U_{ГР}}$$

де $R_{BHX}^1 = 2,5 \text{ кОм}$ – вихідний опір закритого елемента;

$U_{ГР} = 1,8 \text{ В}$ – гранична напруга елемента.

Ємність конденсатора визначаємо по перетвореній формулі:

$$C = \frac{t_{им}}{(R_{BHX}^1 + R_1) \cdot \ln \frac{U_{BHX}^1}{U_{ГР}}}$$

$$C = \frac{0,000555}{(2500 + 12000) \cdot \ln \frac{4,5}{1,8}} = 41 \cdot 10^{-9} \text{ Ф.}$$

Приймаємо зі стандартного ряду E24 ємності конденсаторів $C_1 = 43 \text{ нФ}$,
а $C_2 = 39 \text{ нФ}$.

3 ЕКОНОМІЧНИЙ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ЗАХОДІВ

3.1 Визначення економічного ефекту від впровадження розроблених заходів

З аналізу електроспоживання цеху за місяць випливає, що найбільше електроенергії використовується сушильними барабанами, зокрема - електроприводом димососа. На рисунку 3.1 показано загальний вигляд асинхронного двигуна димососа сушильного барабану, до якого встановлюється перетворювач частоти. Вибір ПЧ здійснюється на підставі паспортних даних цього перетворювача.



Рисунок 3.1 – Загальний вид асинхронного двигуна 5AM280S6e3Y3

Вибір перетворювача частоти здійснюється на основі паспортних даних асинхронного двигуна, які подані в таблиці 3.1, та враховуючи формули, викладені у підрозділі 2.2. Асинхронні двигуни компресора є ключовими

електроживильниками у компресорній станції та мають великий коефіцієнт корисної дії для споживачів, що перевищують 100 кВт.

Таблиця 3.1 – Характеристика двигуна асинхронного двигуна

Параметри	Характеристика
Серія	5AM280S6e3Y3
Потужність, кВт	75
Кількість обертів, об/хв.	750
Коефіцієнт потужності	0,84
Струм при 380В, А	141,0
ККД, %	93,8
Відношення пускового струму до номінального	2,0
Маса, кг	790

На рисунку 3.2 подано зальний вид перетворювач частоти Lenze 8200.



Рисунок 3.2 – Загальний вид перетворювача частоти Lenze

У таблиці 3.2 наведено основні характеристики перетворювача Lenze.

Таблиця 3.2 – Характеристики перетворювача Lenze.

Параметри	Характеристика
Бренд	Lenze
Потужність	150.00 кВт
Кількість фаз/напруги на вході	3-ф/380 (трифазний 380в) В
Кількість фаз/напруги на виході	3-ф/380 В
Струм номінальний	200.00 А
ЕМС фільтр	+
Вбудований регулятор	ПД
Ціна	230261 грн.

Наступний найдешевший перетворювач частоти зображено на рисунку 4.3.



Рисунок 3.3 – Загальний вид перетворювача частоти KEB

Основні характеристики ПЧ бренду КЕВ наведені у таблиці 3.3

Таблиця 3.3 – Характеристики перетворювача КЕВ

Параметри	Характеристика
Бренд	КЕВ
Серія	Combivert F5 Compact
Sku	23.F5.C0R/C2R-940A
Потужність	150.00 кВт
Кількість фаз/напруги на вході	3-ф/380 (трифазний 380в) В
Кількість фаз/напруги на виході	3-ф/380 В
Струм номінальний	200.00 А
Ступінь захисту по ІР	20
Вбудований регулятор	ПД
Скалярний режим управління	+
Ціна	173003 грн

На рисунку 3.4 представлено загальний вигляд широко використовуваного серед споживачів перетворювача частоти Schneider. З таблиці 3.4 впливає наявність одного з ключових параметрів перетворювача частоти - аналогового входу типу 4-20 мА.



Рисунок 3.4 – Загальний вид перетворювача частоти Schneider

Можливість використання аналогового входу типу 4-20 мА надає можливість подальшого автоматичного налаштування заданого режиму роботи з пульта контролюю-вимірювальних пристроїв.

Таблиця 3.4 – Характеристики перетворювача Schneider.

Параметри	Характеристика
Бренд	Schneider Electric
Потужність	150.00 кВт
Кількість фаз/напруги на вході	3-ф/380 (трифазний 380В) В
Кількість фаз/напруги на виході	3-ф/380 В
Струм номінальний	200.00 А
Максимальна вихідна частота	500 Гц
Ступінь захисту по IP	20
Линейний закон управління U/f	+
Квадратичний закон управління U/f_2	+
Максимальна кількість фіксованих швидкостей	16
Кількість/тип аналогових виходів	1: 0-10V або 0(4)-20mA
Кількість релейних виходів	2
Протокол Ethernet IP	VW3A3E316
Ціна	238848 грн

Розрахунок повної пускової потужності двигунів:

$$S_{\text{пуск.АД}} = \frac{75 \cdot 2}{0,938 \cdot 0,84},$$

Розрахунок у потрібного пускового струму АД:

$$I_{пуск.АД} = 141 \cdot 2,$$

$$I_{пуск}^* = 2,$$

Наступні умови для частотного перетворювача:

$$150 \text{ кВт} \geq 126 \text{ кВт},$$

$$200 \text{ А} \geq 188 \text{ А},$$

Частотний перетворювач Schneider відповідає вимогам для вибору ПЧ. З урахуванням характеру навантаження сушильного барабана сировиною за технологією, на рисунку 3.5 демонструється зміна електричного навантаження на асинхронний двигун.

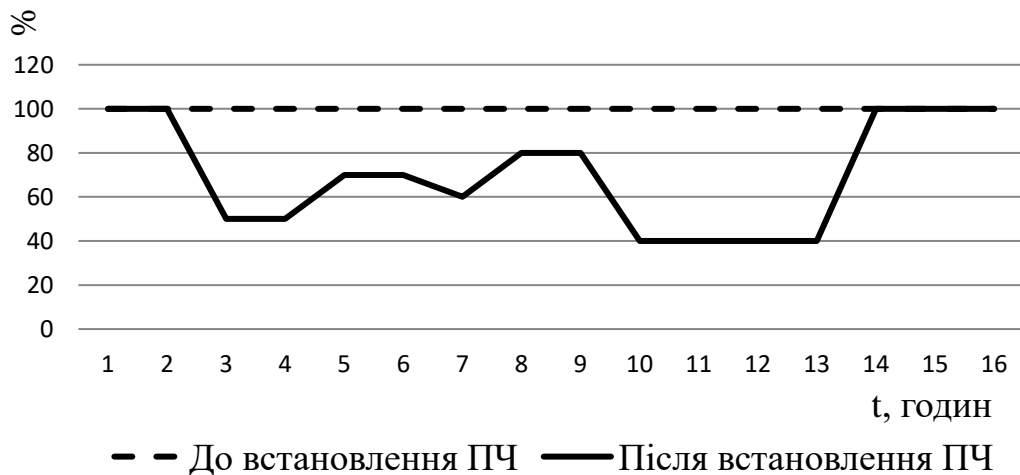


Рисунок 3.5 – Графік зміни навантаження електричного двигуна

Зниження навантаження на електричний двигун призводить до зменшення споживання електричної енергії. Метод розрахунку економічної доцільності проекту передбачає врахування технологічного процесу, в якому сушильний барабан працює 16 годин і кожна година з частотним

перетворювачем характеризується різним використанням повної потужності електричного двигуна димососа.

Формули для розрахунку використовуються для визначення економії потужності за n-у годину.

$$W_e^n = W \cdot (1 - K^n),$$

де W – потужність електродвигуна димососа,

K_n – коефіцієнт використання після встановлення перетворювача частоти, який вказано у таблиці 4.5.

$$W_e^1 = 75 \cdot (1 - 1) = 75 \text{ кВт.}$$

Результати розрахунків за формулою приведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.5 – Коефіцієнт використання потужності двигуна

Година	1	2	3	4	5	6	7	8
Коефіцієнт n-ої години	1	1	0,5	0,5	0,7	0,7	0,6	0,8
Година	9	10	11	12	13	14	15	16
Коефіцієнт n-ої години	0,8	0,4	0,4	0,4	0,4	1	1	1

В рисунку 3.6 наведено графік зміни річного споживання електричної енергії, пов'язаного з встановленням перетворювача частоти на електричний двигун димососа сушильного барабану. Дані про цю зміну також представлені в таблиці 3.6.

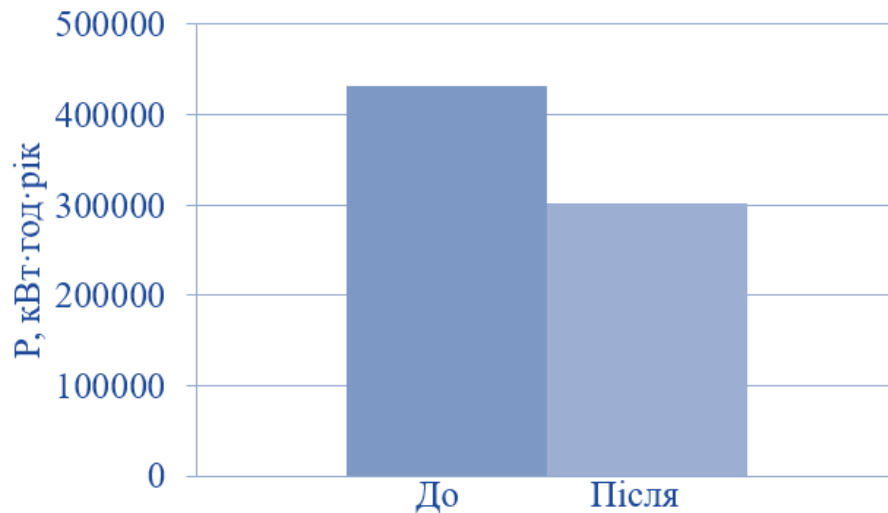


Рисунок 3.6 – Діаграма економічного ефекту після встановлення ПЧ

Формули для розрахунку РП:

$$РП = \sum W_e^n \cdot T \cdot 365,$$

де T – дійсний тариф; $T=2,49$ грн·кВт·год;

$\sum W_e^n$ – зекономлена потужність за добу;

$$РП = 360 \cdot 2,49 \cdot 360 = 322704 \text{ грн.}$$

Таблиця 3.6 – Результати розрахунків за формулою

Година	1	2	3	4	5	6	7	8
Потужність, кВт	0	0	37.5	37.5	22.5	22.5	30	15
Година	9	10	11	12	13	14	15	16
Потужність, кВт	15	45	45	45	45	0	0	0
Сумарна потужність	360							

На рисунку 3.7 зображено економічний ефект установки ПЧ до асинхронного двигуна димососа у грошовому еквіваленті.

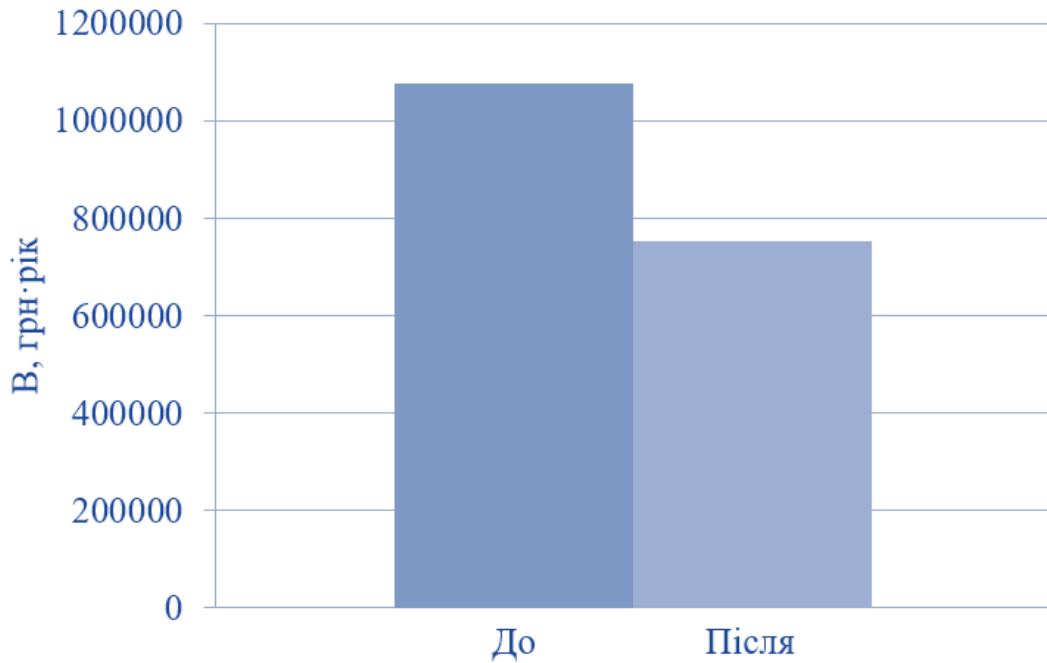


Рисунок 3.7 – Економічний ефект встановлення ПЧ

Формула для розрахунку терміну окупності:

$$PP = \frac{KB}{PP},$$

де KB – розмір капіталовкладень;

PP – річний прибуток;

$$PP = \frac{238848}{322704} = 0,74 \text{ року.}$$

Термін окупності проекту складає 9 місяців, що підтверджує його рентабельність, оскільки цей період менший за 5 років. Впровадження заходів щодо встановлення перетворювачів частоти на момент їхнього впровадження виявилось неактуальним через високу вартість обладнання. Однак з кожним роком це обладнання стає все більш доступним завдяки зростанню конкуренції на ринку.

3.2 Питання охорони праці

Характеристика потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів:

Обов'язки формувальника включають в себе ряд операцій, таких як формування вручну або за допомогою хвостового молотка динасових, магнезіальних та шамотних виробів, які можуть мати нескладну конфігурацію або виступи, поглиблення, виїмки та гострі кути на поверхні. Також до обов'язків входить обробка карбідокремнієвих стержнів на механічному вібраційному верстаті та виливання гіпсових форм, формування плавлених вогнетривів і смолопекової заготівки, заповнення форм формовою масою і трамбування її, а також опрацювання сформованих виробів, маркування, посипання дрібним піском або шамотом, складання на рівні щитки та віднесення на вагонетки або в сушила. До завдань також входить складання, розбирання і змащення форм, транспортування сформованих виробів у сушила, формування карбідокремнієвих стержнів на вібростолі вручну, виявлення і усунення несправностей обладнання, налагодження механічного вібраційного верстата.

Кожен формувальник повинен мати знання про будову і правила експлуатації хвостового молотка, механічного вібраційного верстата, вимірювального інструменту, підйомних механізмів, склад і властивості формових мас і суспензій, види і розміри форм, способи готування формових мас, правила транспортування виробів, режим сушіння виробів, способи формування, прийоми опрацювання виробів, види браку під час формування і способи його попередження, правила читання креслень та слюсарські навички.

Основними потенційно небезпечними і шкідливими факторами при обслуговуванні обладнання шамотного цеху є:

- Рухомі машини і механізми, такі як вантажопідйомні крани та пересувний бункер.
 - вантажі, що переносяться кранами;

- Падаючі предмети, такі як деталі форм та інструмент.
- небезпечний рівень напруги в електричному колі, що може призвести до замикання через тіло людини.

Основні шкідливі виробничі фактори включають:

- Підвищена запиленість повітря робочої зони.
- Підвищений рівень шуму на робочому місці.
- Підвищений рівень вібрації.
- Знижена температура повітря робочої зони.

Ці фактори можуть призвести до професійних захворювань. Для забезпечення безпеки та гігієни праці важливо вживати технічні рішення.

Мікроклімат робочої зони визначається параметрами, такими як температура, відносна вологість повітря, теплове випромінювання.

Оптимальний мікроклімат забезпечує підтримку теплової рівноваги між організмом і навколишнім середовищем. У таблиці 3.7 представлені прийняті припустимі (оптимальні) параметри повітряного середовища в робочій зоні робочої ділянки.

З урахуванням нормативних величин та даних з таблиці 4.1 можна зробити висновок, що мікроклімат у цеху відповідає встановленим вимогам щодо безпеки та гігієни праці.

Освітлення виробничих приміщень важливо забезпечити як природним, так і штучним світлом. Оскільки природне освітлення через віконні отвори є недостатнім, особливо на робочих місцях, штучне освітлення вважається необхідним. Для цього використовують електричні джерела світла, які можна регулювати за необхідністю, контролювати інтенсивність світлового потоку та його напрямки.

Проведемо розрахунок штучного освітлення за методом світлового потоку. Розміри приміщення: довжина – 8 м, ширина – 6 м, висота – 3 м. Розрахункова висота:

$$h = 3 - 0,8 = 2,2 \text{ м,}$$

де 0,8 м – висота розрахункової поверхні.

Таблиця 3.7 – Нормовані величини температури, відносної вологості й швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень

Період року	Категорія робіт	Температура			Відносна вологість		Швидкість руху, м/с	
		Оптимальна	Допустима		Оптимальна	Допустима	Оптимальна, не більш ніж	Допустима на робочих місцях
			Верхня межа	Нижня межа		На робочих місцях, не більше		
			Постійна	Постійна				
Холодний	Середньої важкості 2а	18-20	23	17	40-60	75	0,2	Не більш ніж 0
Теплий	Середньої важкості 2а	21-23	27	18	40-60	60 при 270С	0,3	0,2-0,4

Площа приміщення:

$$S = 6 \cdot 8 = 48 \text{ м}^2.$$

Визначимо індекс приміщення:

$$i = \frac{A \cdot B}{(A + B) \cdot h},$$

де A і B – довжина та ширина приміщення, м;

h – висота підвісу світильників над розрахунковою поверхнею, м.

$$i = \frac{6 \cdot 8}{(6 + 8) \cdot 2,2} = 1,56.$$

Оскільки стіни і стеля приміщення бетонні, то приймаємо коефіцієнт віддзеркалення стелі і стін $\rho_{стелі} = 50 \%$, $\rho_{стін} = 30 \%$ відповідно.

Коефіцієнт використання світлового потоку становить $\eta = 50 \%$.

Необхідний світловий потік ламп світильників:

$$F = \frac{E \cdot k_3 \cdot S \cdot z}{N \cdot \eta},$$

де E – найменша нормована освітленість, $E = 300$ лк, так як розряд зорових робіт дорівнює 3;

k_3 – коефіцієнт запасу, $k_3 = 1,4$;

S – площа приміщення, м²;

z – поправочний коефіцієнт для переходу від найменшої освітленості до середньої (зазвичай значення його набувають в межах 1,1 – 1,2), $z = 1,1$;

N – кількість світильників;

η – коефіцієнт використання, тобто відносна доля потоку лампи, падаюча на поверхню S .

Розрахуємо за формулою (5.4) добуток $F \cdot N$.

$$F \cdot N = \frac{300 \cdot 1,4 \cdot 48 \cdot 1,1}{0,5} = 44352 \text{ лм.}$$

З метою досягнення необхідного рівня освітленості виробничих приміщень рекомендується використовувати джерела світла з урахуванням освітленості в межах від 150 до 300 люкс. Для цього відповідають люмінесцентні лампи типу ЛХБ80 (2×80 Вт). Зазначені лампи мають довжину 1,5 метра, ширину 0,4 метра та світловий потік 3840 люменів.,

Отже, потрібне число ламп:

$$N = \frac{44352}{3840} \approx 12 \text{ шт.}$$

Враховуючи, що світильники є дволамповими і для забезпечення нормальної потужності освітлення виробничого приміщення потрібно 6 світильників, приймаємо, що кількість світильників по довжині складатиме 2 шт., а по ширині – 3 шт.

Застосовуємо світильники ШОД, оскільки вони забезпечують більш рівномірне освітлення. Кожен світильник обладнаний двома люмінесцентними лампами ЛХБ потужністю 2×80 Вт і з світловим потоком 3840 лм.

Схема розташування світильників представлена на рисунку 3.8, де ряди світильників орієнтовані паралельно стіні з вікнами. У ряді встановлено два світильники.

Це забезпечить ефективне та рівномірне освітлення виробничого приміщення.

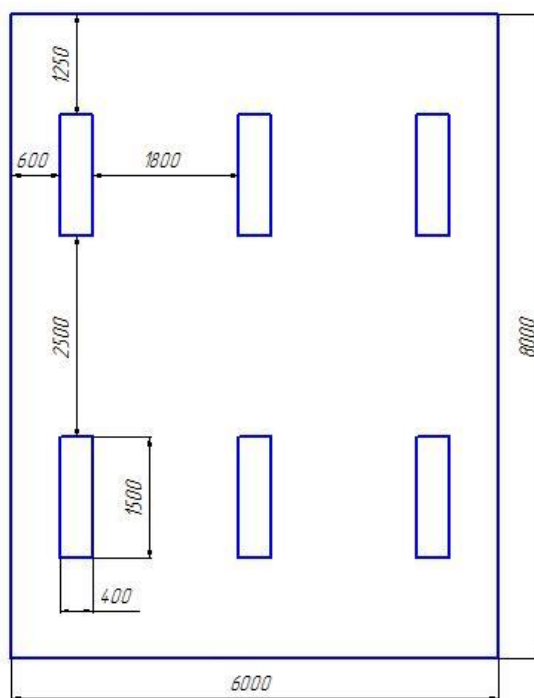


Рисунок 3.8 – Схема розташування світильників

Всі необхідні розрахунки для розташування світильників проводимо за формулами:

$$la = \frac{1}{2} \cdot La,$$

$$lv = \frac{1}{3} \cdot Lb$$

$$la = 1,25 \text{ м}, lv = 0,6 \text{ м},$$

де L – відстань між сусідніми світильниками (рядами люмінесцентних світильників).

La – відстань між сусідніми світильниками по довжині приміщення, $La = 2,5$ м.

Lb – відстань між сусідніми світильниками по ширині приміщення, $Lb = 1,8$ м.

l – відстань від крайніх світильників або рядів світильників до стіни.

З погляду електробезпеки, у випадку виявлення несправності в електричному обладнанні, формувальник повинен негайно припинити виконання роботи, повідомити майстра і викликати чергового електрика. Самостійне усунення неполадок в електрообладнанні заборонено. Після усунення несправності пуск обладнання повинен виконати лише черговий електрик за заявкою майстра.

Дозволяється користуватися переносними електросвітильниками лише при напрузі не вище 36 В, а в сирих підвальних приміщеннях - не вище 12 В.

Під час загоряння електропроводів, приладів, та електрообладнання, їх слід відключити від мережі і гасити осередок пожежі тільки сухим піском, порошковим, пінним вогнегасником або сухими інертними матеріалами (роздрібненим шамотом, динасом, кварцитом).

Забезпечення електробезпеки регламентується Правилами устрою електроустановок (ПУЕ):

- Застосування захисного заземлення для захисту людей від ураження електричним струмом при можливому пошкодженні ізоляції.
- Недоступність токоведучих частин для випадкового дотику.
- Застосування ізоляції та поточний контроль.
- Посилення вимог до електропроводок.
- Застосування попереджувальних сигналізацій, написів і плакатів.
- Використання індивідуальних засобів захисту та пристроїв.
- Посилення вимог до кваліфікації персоналу електромонтажних організацій (згідно з ГОСТ Р 50571 1-93, п. 4.1.1).

Щодо пожежної безпеки, формувальник повинен вміти користуватися засобами пожежогасіння (піском, землею, вогнегасниками і т.д.) та знати місця зберігання протипожежного інвентарю. У разі виникнення пожежі слід повідомити керівництво цеху та диспетчера підприємства, викликати пожежну охорону і до її прибуття намагатися ліквідувати загоряння самостійно відповідно до інструкції з пожежної безпеки.

Необхідно застосовувати відповідні засоби гасіння під час пожежі електропроводів, приладів та електрообладнання, такі як сухий пісок, порошковий або пінний вогнегасник, або сухі інертні матеріали (шамот, динас, кварцит). При пожежі пально-мастильних матеріалів воду застосовувати не слід. Тут ефективнішими будуть земля, пісок, вогнегасники.

Також важливо утримувати проходи та доступ до протипожежного інвентарю, вогнегасників і гідрантів, щоб у разі потреби вони були легко доступні. Палити можна лише у визначених місцях.

Кожен формувальник повинен бути ознайомлений з планом ліквідації аварій на підприємстві, зокрема в тій частині, яка стосується його робочого місця та ділянки виконання робіт.

Засоби індивідуального захисту для формувальників на вогнетривких підприємствах включають спецодяг, обрані відповідно до норм та стандартів:

Костюм бавовняний (згідно ГОСТ 27575-87) - призначений для захисту від забруднень та механічних впливів, служить протягом 12 місяців.

Фартух брезентовий з нагрудником (згідно ГОСТ 12.4.029-76) - захищає від механічних впливів, використовується протягом 12 місяців.

Спецвзуття - черевики шкіряні (згідно ГОСТ 28507-90) - захищають від механічних впливів, служать протягом 12 місяців.

Рукавиці комбіновані (згідно ГОСТ 12.4.010-75) - призначені для захисту рук, служать протягом 2 місяців, антивібраційні рукавиці за ТУ 78-349-75 використовуються при роботі з віброінструментом.

До цих засобів індивідуального захисту також включаються захисна каска, захисні окуляри, протипиловий респіратор, засоби захисту органів слуху, а при роботі в умовах знижених температур - зимовий спецодяг (куртка на утепленій прокладці, згідно ГОСТ 29335-92) на 36 місяців.

Дотримання внутрішнього трудового розпорядку передбачає, зокрема:

Прибуття на змінно-зустрічні збори перед початком робочої зміни для одержання завдань на виконання робіт.

Виконання робіт згідно інструкції з охорони праці, а також виконання вказівок старшого формувальника і майстра.

Відмова від роботи, якщо умови не відповідають вимогам інструкції з охорони праці.

Підтримання робочого місця та устаткування в справному стані та чистоті.

Зберігання необхідного інструменту в справному стані.

Заборона доступу сторонніх осіб на ділянку виконання робіт.

Запобігання розпиттю спиртних напоїв на робочому місці, а також відсутність нетверезого та наркотичного стану під час роботи.

Знання та вміння надавати першу (долікарську) допомогу потерпілому, що є важливим аспектом безпеки на робочому місці.

ВИСНОВКИ

Аналіз якості електроенергії на промислових підприємствах в Україні вказує на перевищення допустимих рівнів хоча б одного з нормованих показників якості електроенергії. Зауважимо, що інтегральні показники симетрії і сінусоїдальності знаходяться в нормі, однак коефіцієнти окремих гармонійних складових значно перевищують гранично допустимі величини. Також важливо відзначити, що при однакових показниках якості електроенергії, спектральний склад напруги може істотно змінюватися через вплив типу електроприймачів та їхнього режиму роботи.

Одним з ключових напрямків для зниження енергоспоживання є впровадження енергозберігаючого обладнання, основою для якого є частотно-регульований електропривід (ЧРП) - асинхронний електродвигун, керований від перетворювача частоти (ПЧ). Частотні перетворювачі широко використовуються для рішення різних технологічних завдань, особливо з урахуванням великого поширення асинхронних електродвигунів (близько 90% ринку). Основні переваги таких систем - простота конструкції, висока надійність, доступність та легкість підключення.

У цьому контексті була розроблена та реалізована система керування електроприводом компресорної станції з асинхронним двигуном за допомогою пакету програм MatLAB. Частотне керування дозволяє зберігати високий коефіцієнт корисної дії двигуна, забезпечуючи ефективність роботи в різних режимах, включаючи рухові та гальмівні, та дозволяє використовувати асинхронний електродвигун як привід.

Це допомагає досягти економічної вигоди та підвищити загальну продуктивність систем електропостачання на промислових підприємствах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1 Технічне діагностування автоматичних аналогових керуючих пристроїв електропривода [Текст] : монографія / В. В. Грабко, С. М. Бабій ; ВНТУ. - Вінниця : ВНТУ, 2010. - 107 с.

2 Жежеленко, І.В. Показники якості електроенергії та її контроль на промислових підприємствах - М.: Енергоруаотом видан., 1986- 168с.

3 Неклепаев, Б. Н. Электрична частина станцій та підстанцій. Підручник для студентів вузів.- М.: Енергія, 1976.-552с.

4 Усатенко, С. Т. Даченюк Т.К., Терехова М.В. Виконання електричних схем по ЕСКД: Посібник.- М.: Видавництво стандартів, 1989. - 325с.

5 Осипова, Л.Ю. Споживачі електричної енергії / Для студ. ЗДІА спец. "ЕМ" ден. і заоч. форм навчання: конспект лекцій / ЗДІА. - Запоріжжя: ЗДІА, 2004. - 155 с.: іл.

6 Качан, Ю.Г. Основи енергозбереження / Для студ. ЗДІА спец. 7.000008 "ЕМ": Конспект лекцій / ЗДІА. - Запоріжжя: ЗДІА, 2005. - 183 с.: іл.

7 Самойлов, М. В. Основи енергозбереження: навч. Посібник для вузів / М.В. Самойлов, В.В. Паневчик, А.Н. Ковалев. - 3-вид., стереотип. - Мн.: БГЕУ, 2004. - 198 с.: іл.

8 Брусиловский, Е.М. Експлуатація систем електропостачання: навч. Посібник / Е.М. Брусиловский, В.В. Петунін. - М.: ДОСААФ, 1983. - 136 с.

9 Гульков, Г.И. Системы автоматического управления электроприводами [Текст] / Учебное пособие для среднего специального образования по специальностям "Автоматизированные электроприводы", "Городской электрический транспорт", "Монтаж и эксплуатация электрооборудования" / Гульков Г.И., Петренко Ю.Н., Бачило Т.В., под общ. ред. Петренко Ю.Н. - Минск : ИВЦ Минфина, 2014. - 365 с

10 Керовані випрямлячі: Навчальний посібник/М.М. Казачковський. – Дніпропетровськ: НГА України, 1999. – 229 с.

11 Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. – 6-е изд., доп. и перераб. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.

12 Уильямс Б. Силовая электроника: приборы, применение, управление; Справ. пособие: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с.

13 Лещев А.И. и др. Практические рекомендации по применению IGBT транзисторов. Электровозостроение: Сб. науч. тр. ОАО «ВЭЛНИИ». – 1999. – Т.41. – стр. 179-187.

14 Internet www.ST-CONCEPT.com

15 Internet www.IGBT-Driver.com

16 Микропроцессорные автоматические системы регулирования. Основы теории и элементы: Учеб. пособие / В.В.Солодовников, В.Г.Коньков, В.А.Суханов, О.В.Шевяков; Под. ред. В.В.Солодовникова. – М.: Высш. шк., - 1991. 225 с.

17 Микропроцессоры: В 3-х кн. Кн. 1. Архитектура и проектирование микроЭВМ. Организация вычислительных процессов: Учеб. для втузов/ П.В.Нестеров, В.Ф.Шаньгин, В.Л.Горбунов и др.; Под ред. Л.Н.Преснухина, - Мн.: Выш. шк., 1987. – 414 с.

18 Сташин В.В., Урусов А.В., Мологонцева О.Ф. Проектирование цифровых устройств на однокристалльных микроконтроллерах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 224 с.

19 Скаржепа В.А., Луценко А.Н. Электроника и микросхемотехника. Ч. 1. Электронные устройства информационной автоматики: Учебник / Под общ. ред. А.А.Краснопрошиной. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 431 с.

20 Бирюков С.А. Применение цифровых микросхем серий ТТЛ и КМОП. – М.: ДМК, 2000. – 240 с.

21 Нефедов А.В. Интегральные микросхемы и их зарубежные аналоги: Справочник. Т. 5. – М.: КУБК-а, 1997. – 608 с.

22 Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. О технико-экономической целесообразности работы асинхронных двигателей в сетях с некачественной электроэнергией / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов

// Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – Вип.80. – Дніпропетровськ, 2008. – С.58-62.

23 Energy distribution annual report 2009, U.S. Department of Energy data storage and statistic service. – Режим доступа: www.doe.gov/stat/enreport 2009

24 Качан Ю.Г, Николенко А.В., Кузнецов В.В. О количественной оценке качества электрической энергии в сетях промышленных предприятий / Ю.Г.Качан, А.В.Николенко, В.В. Кузнецов // Гірн. електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – Вип. 84. – Дніпропетровськ, 2010. – С.9-16.

25 Franklin M.P. Pamplona, Venemar A. Souza Harmonic Passive Filter Planning In Radial Distribution Systems Using Microgenetic Algorithm // IEEE 11th International Conf. on Harmonics and Quality of Power. – 2004.

26 Шидловский А.К., Москаленко Г.А. Симметрирующие устройства с трансформаторными фазосдвигающими элементами / А.К. Шидловский, Г.А. Москаленко. – К.: Наук. думка, 1984. – 204 с.

27 Fujita, T. Yamasaki, and H. Akagi A hybrid active filter for damping of harmonic resonance in industrial power systems // IEEE Trans. Power Electron. – vol. 15. – no. 2. – Mar. 2000. – PP. 215–222.

28 Проектирование электрических машин. /Под ред. И.П.Копылова – М.: Энергия, 1980. – 326 с.