

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

Електротехніка та енергоефективність
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота
другий (магістрський) рівень
(рівень вищої освіти)

на тему Підвищення енергоефективності електроприводу в умовах
промислових підприємств

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1419
спеціальності 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)

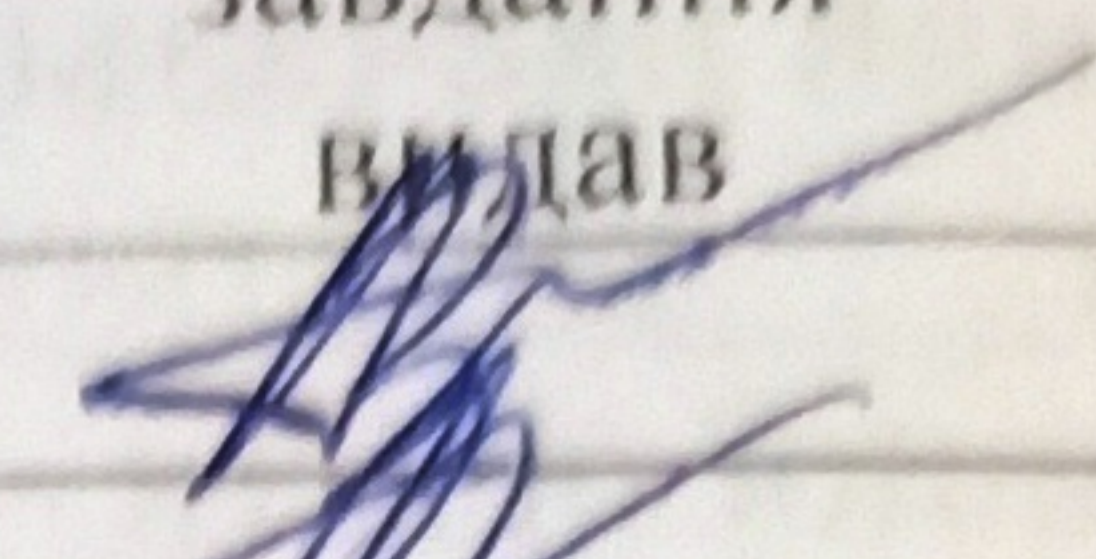
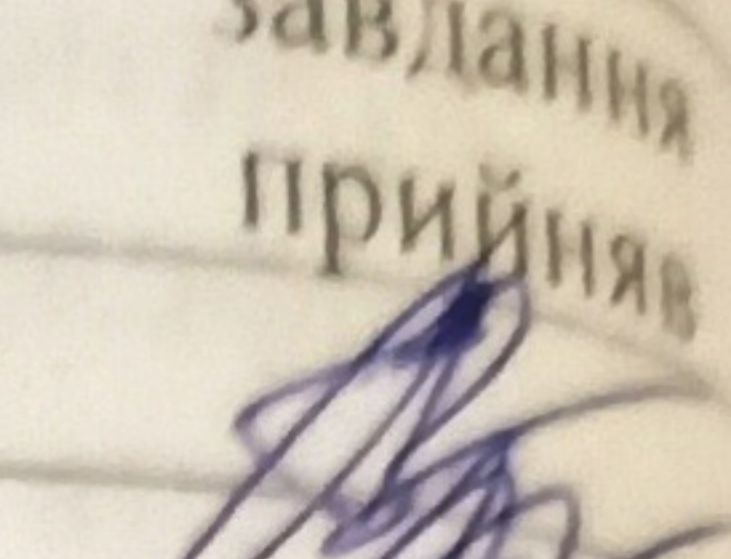
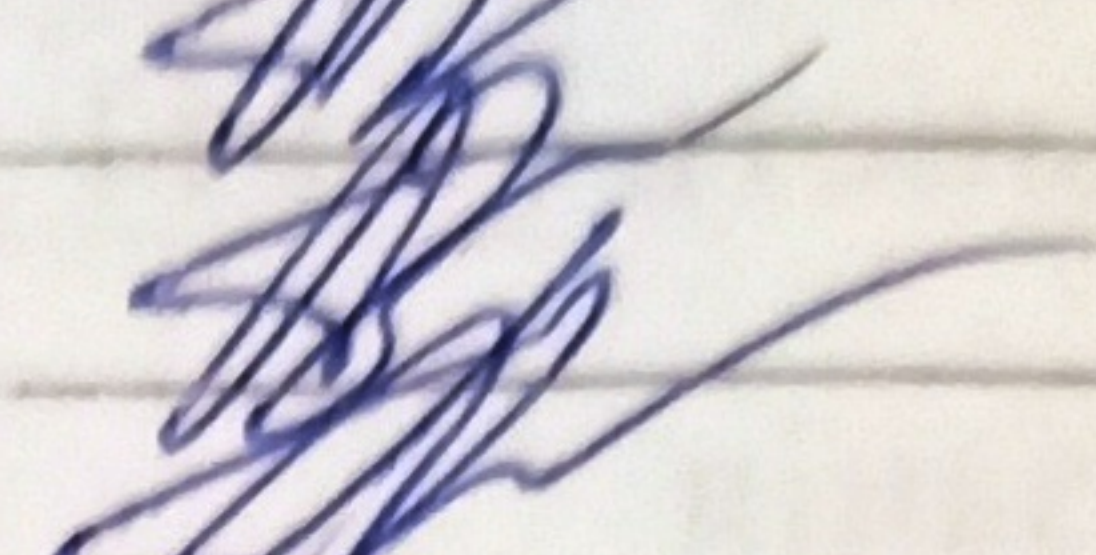
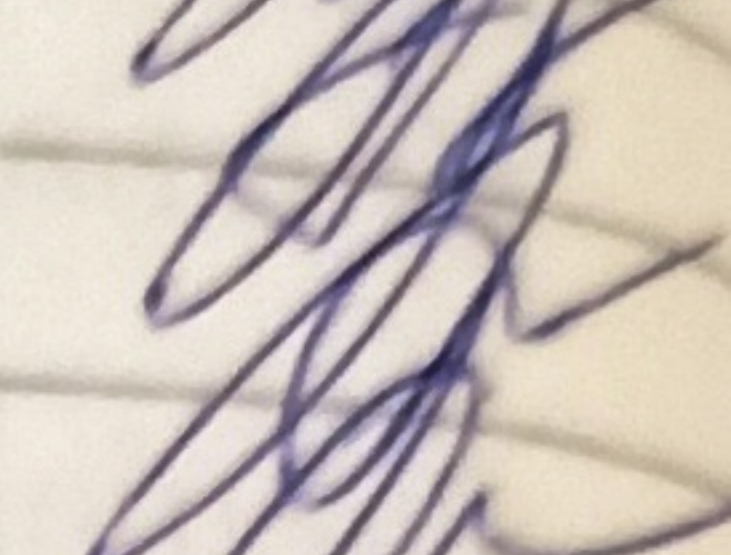
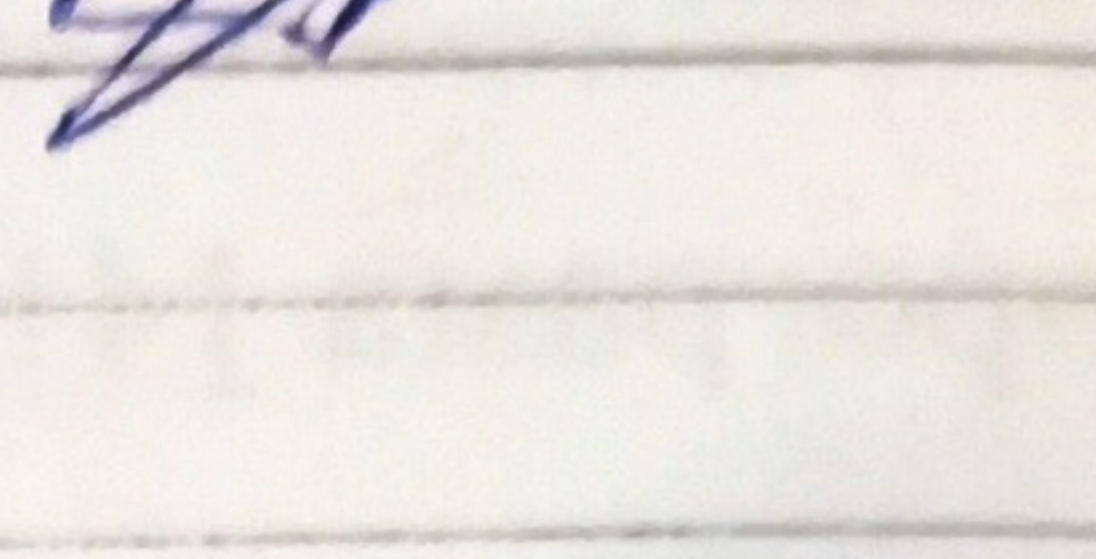
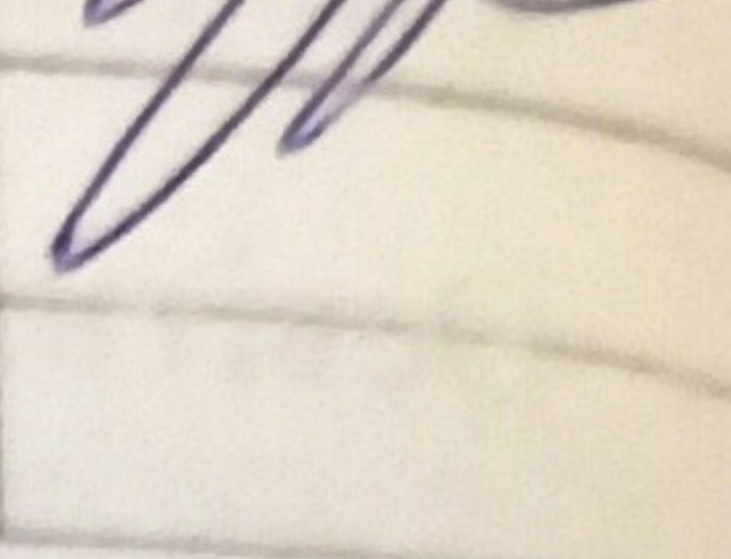
спеціалізації
(код і назва спеціалізації)
освітньої програми 141.00.11 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
(назва освітньої програми)

І.В. Малахов
(ініціали та прізвище)

Керівник проф., доц., д.т.н. Артемчук В.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

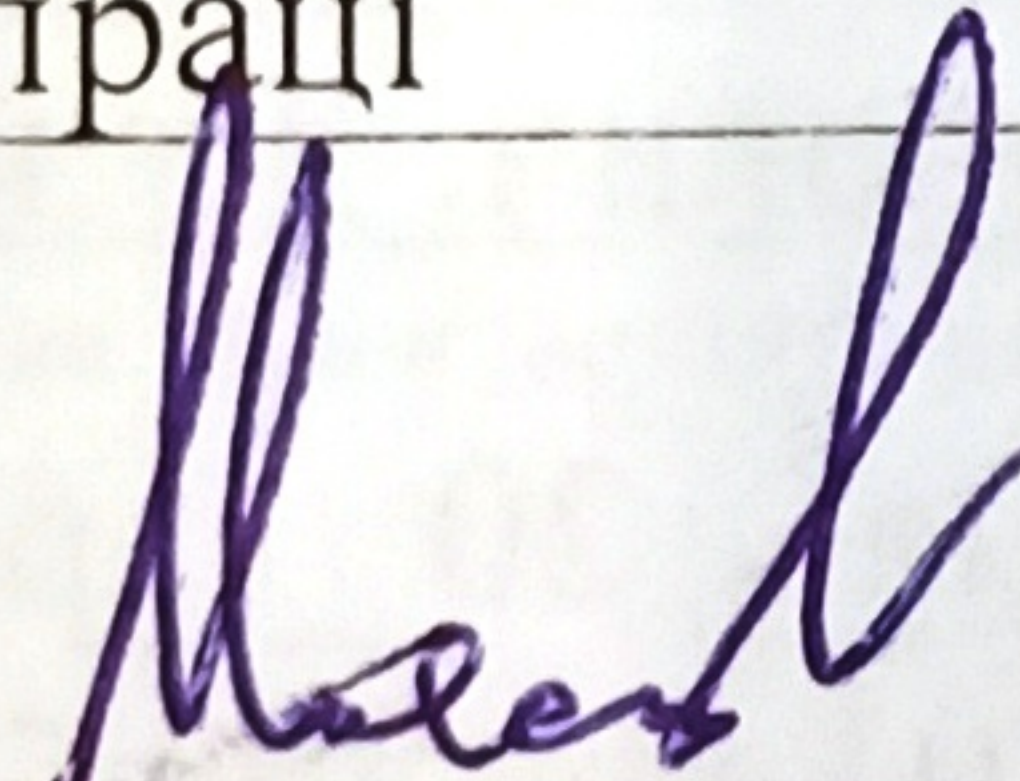
5 Консультанти розділів роботи

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		
Розділ 4	Артемчук В.В., професор		


6 Дата видачі завдання 02.09.2020

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Прим.
1	Аналіз впливу якості електроенергії на енергоефективність електроприводів змінного струму	20.09.2020	
2	Розробка заходів з підвищення енергоефективності приводів	15.10.2020	
3	Економічний ефект від впровадження енергозберігаючих заходів	15.11.2020	
4	Охорона праці	01.12.2020	

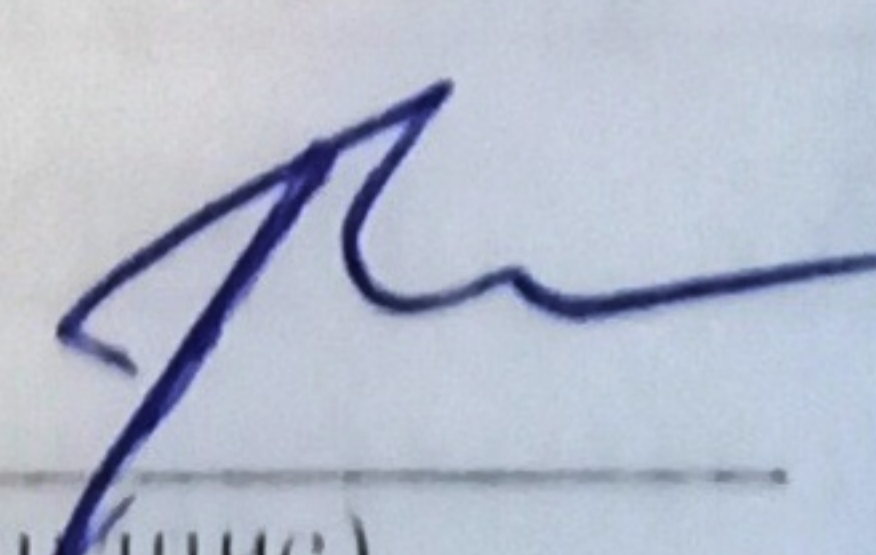
Студент 
(підпис)

І.В. Малахов
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту) 
(підпис)

В.В. Артемчук
(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер 
(підпис)

С.В. Башлій
(ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Малахов І.В. Підвищення енергоефективності електроприводу в умовах промислових підприємств.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, науковий керівник Артемчук В.В. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут. Кафедра електротехніки та енергоефективності, 2020.

Пояснювальна записка містить 85 стор., 22 рисунків, 7 таблиць, 28 джерел.

Анотація. Виконано аналіз ефективності енергозберігаючих заходів при використанні електроприводів різної потужності в умовах промислових підприємств. Запропоновано заходи щодо зниження втрат в системі електроприводу. Проведено оцінку зниження втрат електроенергії в елементах електроприводів підприємства за рахунок покращення якості живлячої енергії.

Ключові слова: електропривід, навантаження, промислове підприємство, якість електричної енергії, компенсація реактивної потужності, електричний двигун.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ЗМІННОГО СТРУМУ	10
1.1 Оцінка показників якості електроенергії в мережах промислових підприємств	13
2 РОЗРОБКА ЗАХОДІВ З ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРИВОДІВ	25
2.1 Визначення деяких напрямків з підвищення ефективності використання електроприводів	25
2.2 Вибір схеми перетворювача	29
2.3 Розрахунок і вибір елементів схеми перетворювача частоти	35
2.4 Розробка системи керування перетворювачем	43
2.5 Керування IGBT модулями за допомогою драйверів	44
2.6 Розробка системи керування драйверами	48
2.7 Розрахунок генератора тактових імпульсів	51
3 ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ ВІД ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ЗАХОДІВ	53
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	62
ВИСНОВКИ	71
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	72
ДОДАТКИ	75

ВСТУП

Актуальність. Енергозбереження є однією з важливих складових щодо захисту збереження природи та вирішення екологічних проблем. Серед споживачів електричної енергії значну частку займають електродвигуни різної потужності та призначення, що споживають більше половини виробленої енергії. Це означає, що саме тут необхідно шукати можливості енергозбереження.

На даний час проблемою є те, що більшість електродвигунів працюють у нерегульованому режимі, а значить з низькою ефективністю. Як показують дослідження з цього питання, при експлуатації електропривода коефіцієнт завантаження багатьох машин не перевищує 50%. Як наслідок, робота таких приводів в недовантаженому режимі призводить до значних втрат, не враховуючи зниженого значення коефіцієнта потужності, оскільки загальна встановлена потужність асинхронних двигунів у країні складає близько 40...50 млн кВт [1].

Зрозуміло, що слід очікувати розвиток енергоємних технологій, що вимагатиме підвищення надійності, безаварійної роботи машин і механізмів. У свою чергу це вимагатиме збільшення частки регульованого електропривода. На думку фахівців, використання регульованого електропривода різних механізмів дозволить заощадити понад 46 % енергоресурсів.

На сьогодні промисловість нашої країни потребує активної розробки та широкого застосування методів і способів керування засобами промислового електропривода з метою підвищення енергоефективності.

Для кращого розуміння предмету досліджень, розглянемо деякі поняття [1].

Енергозбереження – це комплекс заходів, спрямованих на раціональне використання енергетичних ресурсів. У результаті проведення цих заходів знижується потреба в паливно-енергетичних ресурсах на одиницю кінцевого продукту і зменшується шкідливий вплив 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.

Щодо втрат електроенергії, то в цілому втрати електричної енергії можна поділити на дві складові: номінальні втрати, які залежать від умов роботи при встановлених номінальних режимах і оптимальних параметрах системи електропостачання. Інший вид втрат - додаткові, які визначаються відхиленням режимів і параметрів від номінальних. Тоді енергозбереження ґрунтується на мінімізації номінальних та додаткових втрат.

У порівнянні з іншими типами приводів, електропривод має низку переваг, а саме: високий ККД, менший шум, можливість оперативного регулювання швидкості, більш компактні розміри обладнання, можливість застосування у деяких випадках рекуперації.

Зважаючи на те, що понад 90 % вироблюваної енергії споживається електротехнологічними установками, освітлювальними споживачами електроенергії та електроприводами (на частку електропривода в середньому приходиться близько 60% усієї споживаної електроенергії, а деяких випадках сягати 80 %), ефективність застосування заходів з енергозбереження може бути високою. Так, наприклад, зменшення обертання двигуна до швидкості робочого механізму може заощадити енергію і поліпшити сам технологічний процес. Як вже зазначалося, основна частина електроприводів, що на даний час використовується у промисловості є простими, часто нерегульованими. Наприклад, такі приводи використовують для компресорних та насосних станцій, вентиляторів, різноманітних механізмів, конвеєрних ліній, кранів, в будівельній галузі тощо.

Тому задача розробки і широкого впровадження енергозберігаючих заходів і засобів промислового електропривода є актуальною.

Об'єкт досліджень – система електроприводу промислових підприємств.

Предмет досліджень – втрати енергії в системі електроприводів підприємств.

Метою роботи є аналіз та виявлення можливих шляхів щодо підвищення енергоефективності електроприводу в умовах промислових підприємств

Задачі досліджень:

- аналіз можливостей підвищення ефективності експлуатації систем електроприводу промислових підприємств і оцінка енергозберігаючих заходів;
- дослідження теплових процесів електроприводів;
- визначення можливих напрямків економії електричної енергії технологічними установками;
- оцінка економічної ефективності від впровадження енергозберігаючих заходів.

Наукова новизна полягає у тому, що теоретично обґрунтовано ефективність розроблених енергозберігаючих заходів у системі електроприводу промислових підприємств.

Практичною цінністю є розробка енергозберігаючих заходів для системи електроприводу промислових підприємств.

1 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

Електромагнітна сумісність технічних засобів розглядає процеси, що відбуваються в електротехнічних комплексах і системах з точки зору генерування електромагнітних завад, їх впливу на електрообладнання, ступінь захисту і корекції негативного впливу [3]. Поява нових пристроїв перетворювальної техніки, модернізація все більшої кількості промислових електроустановок, зокрема, застосування регульованого електроприводу, призводять до зниження якості електроенергії в живильних мережах підприємств. Це обумовлює необхідність посилення вимог щодо електромагнітної сумісності, що пред'являються до промислових установок. Нормування показників якості електроенергії в таких умовах є одним з головних питань зазначеної проблеми [1 - 3].

Показники якості електроенергії, що регламентуються державними стандартами, є відправною точкою практично у всіх сферах, що стосуються електроустановок. Це відноситься і до проектування нових об'єктів, і до пуско-налагоджувальних робіт, дослідженню стану електрообладнання, прийняття рішення про модернізацію і ін.

Міжнародною нормативною базою для оцінки електромагнітної сумісності електроустановок є відомий Європейський стандарт EN 50160: «Характеристики напруги електрики, що поставляється системами розподілу загального призначення» (1994 г.), а також стандарт Міжнародної електротехнічної комісії МЕК (International Electrotechnical Commission, IEC) 1000-2- 4: «Електромагнітна сумісність. Рівні ЕМС на промислових об'єктах для низькочастотних перешкод провідності».

Показники якості електроенергії (ПКЕ) в системах електропостачання промислових підприємств визначаються режимом роботи електроустановок, що

вносять спотворення, і тому постійно змінюються. Тому в ГОСТ 13109-97 «Електрична енергія. Вимоги до якості електричної енергії в електричних мережах загального призначення, передбачена комплексна методика оцінки якості електроенергії, заснована на оцінці енергетичних характеристик спотворень. Нормовані ПКЕ представляють собою інтегральні показники, що відображають ступінь негативного впливу спотворення електроенергії на техніко-економічні характеристики електрообладнання. Гранично допустимі значення показника якості електроенергії вибираються з техніко-економічних міркувань і впливу спотворень на надійність електрообладнання.

Отже, ГОСТ 13109-97 нормує такі показники якості електроенергії: відхилення напруги dU ; розмах зміни напруги (або амплітуда коливань напруги (КН)); інтенсивність (доза) флікера; коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої лінійного (фазного) напруги; коефіцієнт n -й гармонійної складової напруги; коефіцієнт не симетрії напруги по зворотної та нульової послідовності; тривалість провалу напруги; імпульс напруги; коефіцієнт тимчасової перенапруги; відхилення частоти [4-6]. Відзначимо, що деякі види спотворень електроенергії, як наприклад, відхилення живлячої частоти, на практиці зустрічаються досить рідко. Тому розглянемо методи розрахунку тільки основних показників якості електроенергії, пов'язаних з найбільш поширеними спотвореннями мережі.

Розмах зміни δU_t визначається виразом:

$$U_t = \sqrt{\frac{\int_{f_2}^{f_4} G_U(f)df + \int_{f_1}^{f_3} G_U(f)df}{\int_0^{\infty} G_U(f_0)df}} = \frac{\sqrt{\int_{f_2}^{f_4} G_U(f)df + \int_{f_1}^{f_3} G_U(f)df}}{U_{ном}}, \quad (1.1)$$

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 $\pm 5\%$.

Не симетрія напруг трифазної мережі характеризується коефіцієнтом їх зворотній послідовності K_{2U} %, визначеним відношенням діючого значення напруги зворотної послідовності основної частоти трифазної системи напруг U_2 до номінального значення фазної напруги $U_{\text{ном.мф}}$:

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_{\text{ном.мф}}} \cdot 100 \quad (1.2)$$

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

$$K_{0U} = \frac{U_0}{U_{\text{ном.ф}}} \cdot 100. \quad (1.3)$$

Згідно [11], допустиме значення коефіцієнтів зворотної та нульової послідовностей для будь-якого трифазного споживача становить 2%, гранично допустима величина (ПДВ) - 4%. Несинусоїдальність напруги характеризується значенням коефіцієнта спотворення його кривої K_U %, яке визначається ставленням діючого значення вищих гармонік U_n до номінальної напруги:

$$K_U = \frac{1}{U_{ном}} \sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2} \cdot 100, \quad (1.4)$$

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 нормуються також коефіцієнти кожної гармонійної складової аж до 22-ї окремо. Останні визначаються виразом:

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{ном}} \cdot 100, \quad (1.5)$$

а їх допустимі і гранично допустимі значення також нормуються в залежності від класу напруги. Відзначимо, що [3] пред'являє більш жорсткі вимоги до парних гармонік (допустимі величини в середньому в 2-5 разів нижче, ніж для непарних гармонік).

Таким чином, якість електричної енергії визначається сукупністю її показників, при яких електроприймачі можуть нормально працювати і виконувати закладені в них функції. При відхиленнях їх значень від допустимих, нормальна робота електромеханічних перетворювачів ускладнена або можлива тільки при значному зменшенні навантаження. Необхідно також відзначити, що зниження ефективності роботи даного обладнання часто має місце і при значеннях ПKE в допустимих стандартами діапазонах.

1.1 Оцінка показників якості електроенергії в мережах промислових підприємств

Причини відхилення показників якості електроенергії від нормованих.

При виборі заходів щодо поліпшення роботи електроустаткування в умовах неякісної електроенергії, необхідно з'ясувати причини погіршення її якості, визначити фактичні значення нормованих показників і порівняти останні з допустимими. Слід зазначити, що незважаючи на всю актуальність питання, в даний час відсутні відомості про комплексну оцінку стану якості електроенергії в мережах промислових підприємств нашої країни.

На багатьох металургійних заводах основними споживачами є електроприводи прокатних станів чорнових і заготівельних клітей. Потужність таких приводів становить, як правило, кілька мегават (навіть до 13 МВт, наприклад, електропривод блюмінга ВАТ «Арселор-Міттал», м.Кривий Ріг). Модернізація, пов'язана із заміною системи «генератор-двигун» (Г-Д) системою тиристорний перетворювач - двигун (ТП-Д), привела до поліпшення їх регульовальних властивостей. У той же час, системи ТП-Д зумовили істотне погіршення якості електроенергії в цехах таких підприємств.

Спеціалістами було встановлено, що використання систем ТП-Д на головних приводах прокатних станів призводить до суттєвого спотворення цехової напруги [10]. У мережі присутні вищі гармоніки навіть 23-38 порядку, причому як парні, так і непарні [10, 11]. Коефіцієнти окремих гармонійних складових перевищують допустимі значення в 5-7 разів.

Характер несинусоїдальності, тобто гармонійний склад напруги, визначається особливостями технічних об'єктів (установок), що викликали спотворення, режимом їх роботи, параметрами системи електропостачання та іншими факторами. Однією з найбільш поширеною причиною несинусоїдальності, особливо в мережах малої потужності, є насичення сердечників силових трансформаторів цехових підстанцій. Цей випадок характерний для невеликих підприємств, а також технологічних об'єктів сільського господарства. Насичення магнітопроводу зазначених трансформаторів може бути обумовлено роботою нагрівальних елементів, зварювального

обладнання та інших потужних споживачів. Типова крива напруги живлення при цьому має «усічений» вид, а в його спектральному складі чітко можна побачити третю гармоніку (рисунок 1.1).

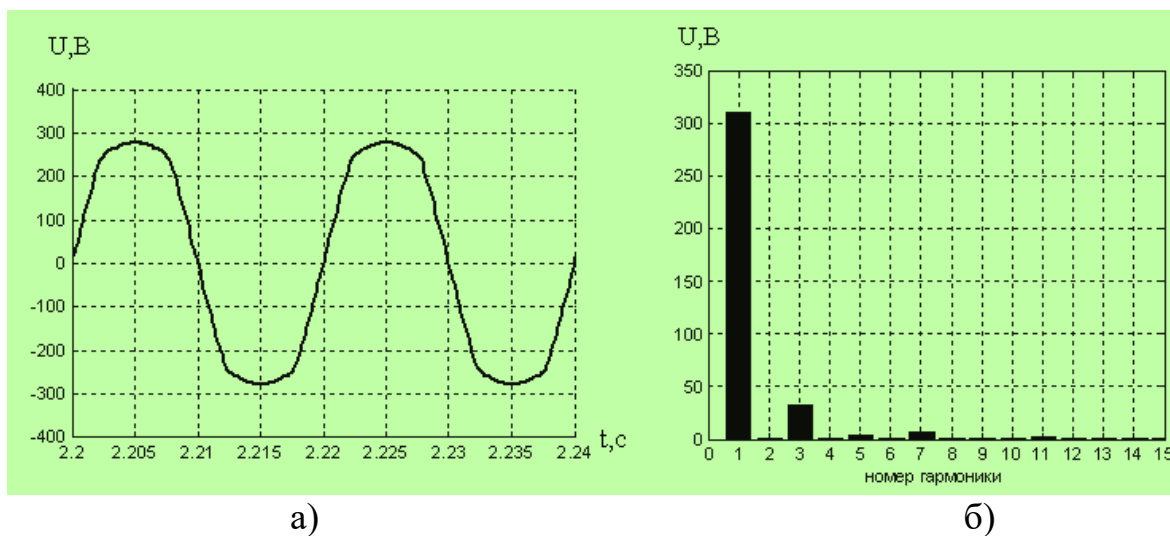


Рисунок 1.1 – Крива напруги при насиченні сердечників силових трансформаторів (а) та її спектральний склад (б)

Як відомо, треті гармоніки шкідливі як для АД, так і для трансформаторів, первинні обмотки яких з'єднані в трикутник. Це пов'язано з тим, що вони утворюють нульову послідовність, опір електричних обмоток на якій невелике (визначається індуктивностями розсіювання), а вказане з'єднання забезпечує контур для протікання струмів третьої гармоніки. В результаті збільшуються втрати, підвищується температура обмоток і падає здатність навантаження розглянутого електрообладнання.

Іншою поширеною причиною спотворення синусоїдальності є наявність в мережі потужних напівпровідникових перетворювачів [12-16]. У моменти комутації таких пристроїв струми, які споживаються ними мають пікові значення, в результаті на входах інших споживачів спостерігаються «провали» напруги (рисунок 1.2).

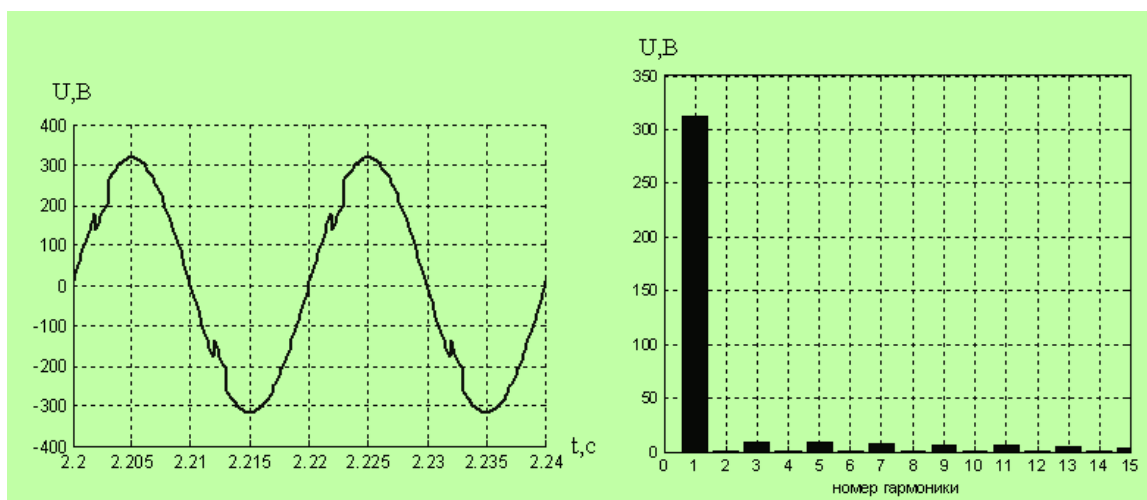


Рисунок 1.2 – Крива напруги при наявності комутаційних перешкод (а) та її спектральний склад (б)

Наведена форма кривої характерна для цехових мереж великих промислових підприємств, таких як металургійні, нафтопереробні та гірничозбагачувальні комбінати, де встановлені потужні регульовані електроприводи з випрямлячами або перетворювачами частоти. Досвід свідчить, що, незважаючи на вжиті заходи щодо підвищення електромагнітної сумісності, показники якості напруги живлення в таких випадках все ж перевищують граничні рівні допустимих значень.

У спектральний склад напруги, спотвореного напівпровідниковими перетворювачами, є практично всі гармоніки вищого порядку (рис. 1.2, б). Хоча вони і слабо впливають на пульсації моменту АД [12 – 16], однак викликають додаткові втрати в сталі зазначених двигунів та трансформаторів, обумовлюють їх підвищене нагрівання, що і призводить до зниження енергоефективності та надійності електрообладнання.

При наявності в цеховій мережі потужних споживачів, що живляться від напівпровідникових перетворювачів з фазоімпульсним регулюванням

(гальванічні ванни, дугові печі), порушується симетрія синусоїди напруги, а в спектрі з'являється яскраво виражена друга гармоніка (рисунок 1.3). Остання, як відомо, обумовлює протікання струмів зворотної послідовності, утворюючи, таким чином, гальмівний електромагнітний момент на валу двигуна. Підвищуються також вібрації в механічній частині, прискорюється знос і знижується надійність обладнання.

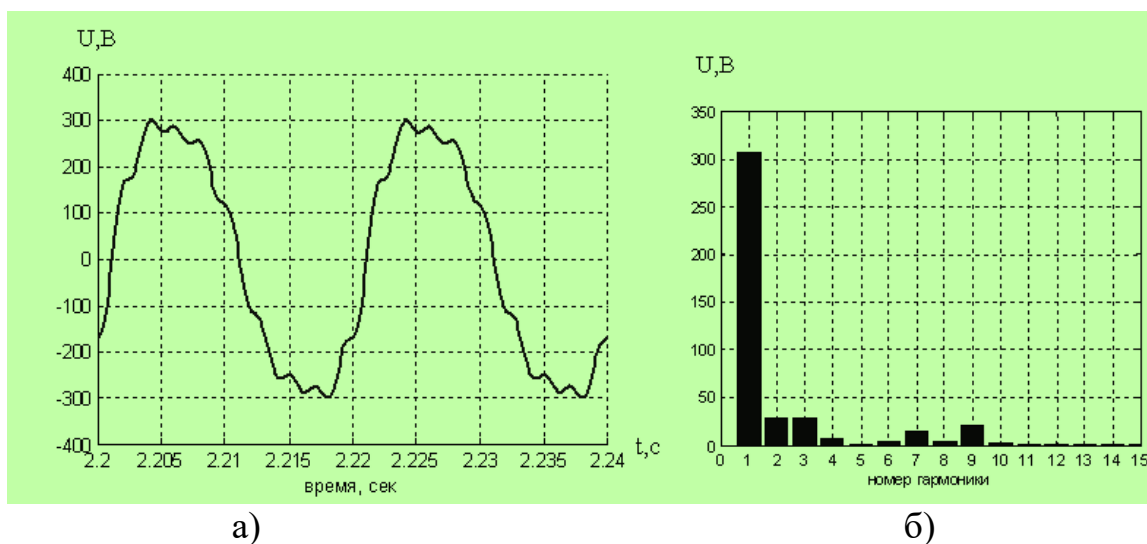


Рисунок 1.3 – Крива напруги з переважаючою другою гармонікою (а) та її спектральний склад (б)

Аналіз типових спотворень і кількісна оцінка показників якості електроенергії в цехових мережах різних промислових підприємств дозволяє зробити висновки, що якість електричної енергії в цехових мережах багатьох промислових підприємств України не відповідає вимогам ГОСТу. У них присутні спотворення, обумовлені роботою напівпровідникових перетворювачів, насиченням магнітопроводів трансформаторів і т.д. При відповідності вимогам ГОСТу коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги, по окремих гармонікам спостерігається істотне перевищення значень коефіцієнтів гармонійних складових напруги. А це свідчить про перевагу використання

останніх при аналізі енергоефективності АД, які працюють в умовах неякісного живлення. Цікавим також є те, що якість електроенергії на вході підприємства і по його цехах істотно відрізняється.

Способи підвищення якості електроенергії в умовах промислових підприємств. Виходячи з вищевикладеного очевидно, що у енергетиків підприємств виникає необхідність використання засобів по зменшенню негативного впливу неякісної електроенергії на енергоефективність виробництва. Можливими шляхами вирішення цієї проблеми є: застосування «індивідуальних» LC-фільтрів [17 - 20] для захисту особливо відповідальних електроприводів; застосування «групових» пристроїв для компенсації впливу неякісної електроенергії на рівні цеху, таких як силові активні випрямлячі, з можливою їх інтеграцією в існуючі перетворювачі для регульованого електроприводу; придушення спотворень напруги живлення в місцях їх виникнення, тобто захист мережі від першопричини. Останнє визначається специфікою розглянутого обладнання і може включати в себе, модернізацію силової частини електроприводу і систем автоматичного регулювання, коректний вибір параметрів електроприводу і т.д.

Допускається і відмова від прийняття будь-яких заходів, в разі їх економічну недоцільність. Дійсно, кожен із зазначених варіантів характеризується конкретними заходами: вартістю впровадження і очікуваним економічним ефектом. Проте, не дивлячись на актуальність даної проблеми, в Україні досі немає єдиної методики прийняття економічно обґрунтованих рішень щодо зменшення негативного впливу неякісної електроенергії на енергоефективність виробництва.

Основні використовувані способи підвищення якості електроенергії в мережах підприємств або їх цехів можна класифікувати за показниками якості, поліпшення яких передбачається - несиметрія, спотворення синусоїдальності і

т.д. [20 – 25]. На даний час найбільш перспективні розробки в цій області ведуться за такими двома напрямками:

- 1) активна фільтрація напруги живлення;
- 2) застосування пасивних резонансних фільтрів.

Для трифазних споживачів активні фільтри фактично являють собою автономні інвертори, в ланці постійного струму яких встановлено конденсатор [16 - 18]. Принцип дії такого пристрою полягає в перерозподілі напруг між фазами за рахунок енергії, що накопичується в ємнісному елементі. Для цього в систему управління ключами інвертора вводиться сигнал завдання на синусоїдальний струм в кожній фазі, а також сигнал зворотного зв'язку по струмах в фазах мережі живлення.

Спрощена принципова схема такого пристрою показана на рисунку 1.4.

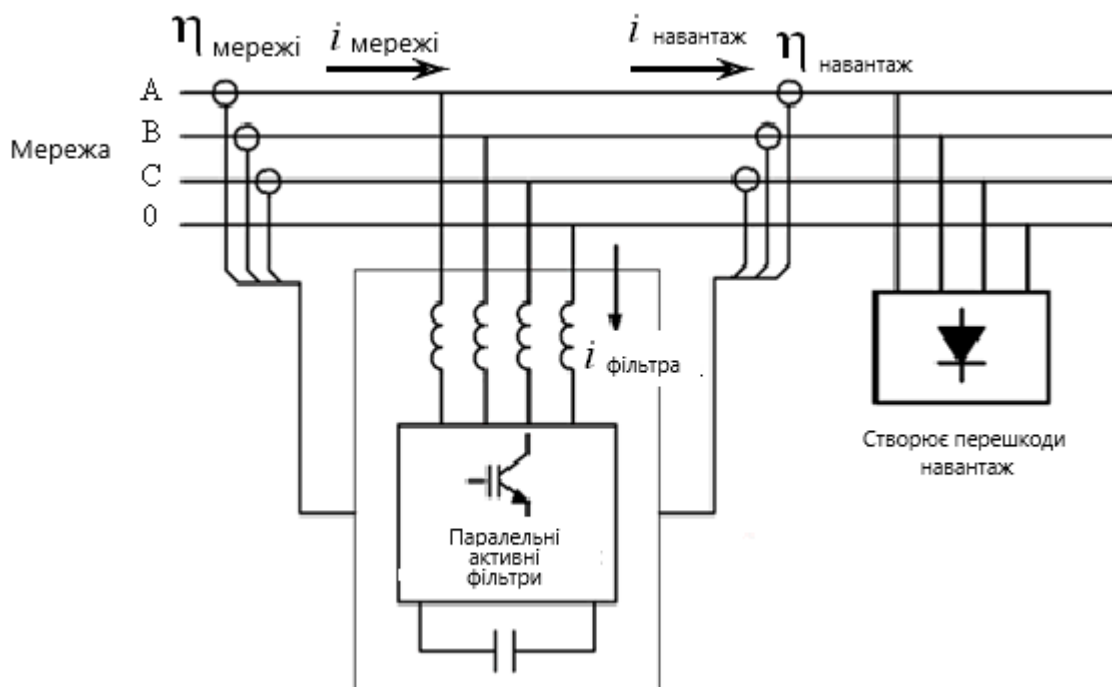


Рисунок 1.4 – Спрощена принципова схема силового активного фільтра

Безперечними перевагами активних фільтрів є:

- можливість адаптації до поточних форм кривих фазних напруг;
- незалежність працездатності активного фільтра від рівня навантаження споживачів;
- компенсація як несинусоїдальності, так і несиметрії фазних напруг;
- можливість використання активного фільтра для компенсації спотворень напруги живлення декількома споживачами;
- корекція коефіцієнта потужності споживачів.

Мабуть, єдиним недоліком активних фільтрів є їх висока вартість. При необхідності компенсації значних реактивностей, наприклад, під час пуску, силові ключі слід вибирати з розрахунку на потужність того ж порядку, що і потужність споживачів. Це робить такий пристрій за вартістю можна порівняти з вартістю частотного перетворювача.

Тим часом, сучасний частотний перетворювач повністю вирішує проблеми неякісного напруги живлення по відношенню до АД, і, крім того, надає масу додаткових переваг, які не забезпечуються активним фільтром. До них слід віднести можливість здійснення плавного пуску з контрольованими струмами і моментом, регулювання швидкості виробничого механізму, реалізація зворотного зв'язку і захистів за технологічними параметрами і т.д.

Таким чином, активні фільтри, найчастіше, виявляються необґрунтованим технічним рішенням. Перспективним напрямком є інтеграція функцій активних фільтрів в потужні частотні перетворювачі. Таким способом можна одночасно регулювати швидкість одного з механізмів і здійснювати «групову» корекцію напруги живлення.

Пасивними фільтрами називають послідовні і паралельні LC-ланцюги, налаштовані, як правило, на резонансні режими [18 - 22]. На рисунку 1.5 показана схема підключення індивідуальних пасивних LC-фільтрів для захисту асинхронного двигуна. Головною їхньою перевагою є низька вартість. Крім того,

пасивні фільтри довговічні, практично не вимагають налагодження, обслуговування і ремонту.

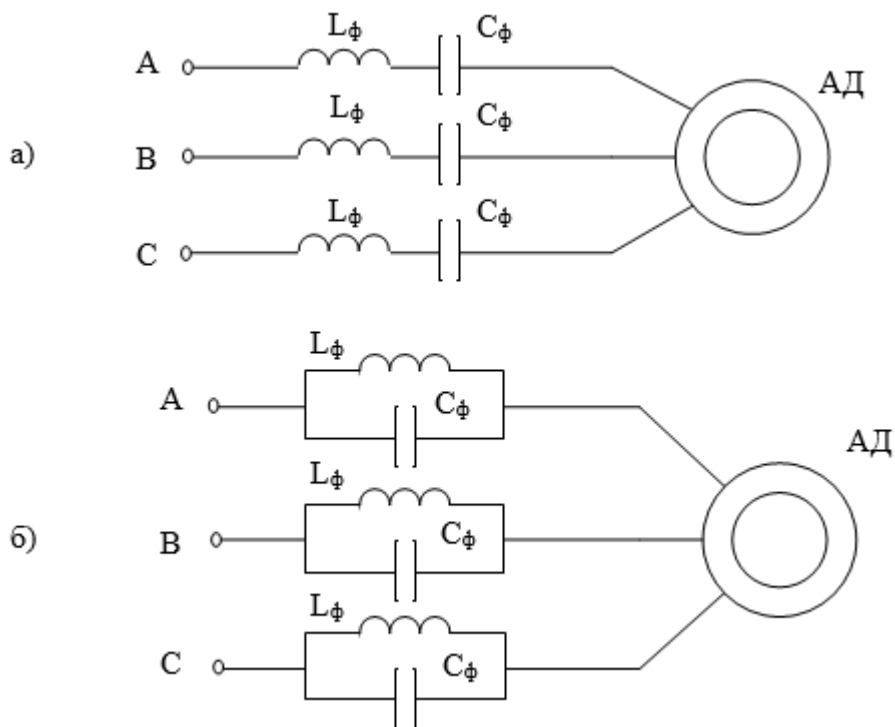


Рисунок 1.5 - Схеми підключення послідовних (а) і паралельних пасивних LC-фільтрів

До недоліком пасивних фільтрів слід віднести:

- 1) неможливість корекції несиметрії напруги живлення;
- 2) нестійкість резонансних режимів для деяких типів фільтрів через нестабільність параметрів споживачів.

В цілому ж для ефективного застосування індивідуальних пасивних фільтрів необхідно вирішувати такі завдання:

- а) вибрати тип фільтра, який найкращим чином коригує напругу на вході АД;
- б) визначити параметри фільтру (індуктивність і ємність), при яких забезпечується найкраща робота АД;

в) знайти компроміс між технічними вимогами (індуктивність, ємність, потужність елементів) і вартістю технічного рішення, тобто провести техніко-економічне обґрунтування.

Для визначення основних способів підвищення якості електроенергії в умовах промислового підприємства або окремого цеху можна класифікувати способи за показниками якості, підвищення яких вони забезпечують, наприклад, за несиметрією, спотворенням синусоїдальности тощо [24].

Несиметрію напруг, обумовлену нерівномірним розподілом між фазами електроприймачів, можна обмежити до гранично допустимих значень за допомогою схемних рішень або шляхом застосування спеціальних симетрувальних пристроїв [25 - 29]. За допомогою останніх компенсується еквівалентні струми зворотної послідовності несиметричного навантаження і обумовлені ними напруги. Розрізняють індивідуальний, груповий, централізований і комбінований способи симетрування.

Індивідуальні симетрувальні пристрої встановлюються безпосередньо біля електроприймачів. При груповому симетруванні в різних точках мережі встановлюється декілька розглянутих пристроїв, кожне з яких забезпечує певну ділянку мережі з підключеною до нього групою несиметричних електроприймачів. При централізованому симетруванні в розподільній мережі встановлюється один такий пристрій. Комбінований спосіб полягає в поєднанні двох або трьох симетрувальних пристроїв.

Індивідуальний спосіб дозволяє усунути несиметрію безпосередньо у споживача, але при цьому встановлена потужність силових елементів таких захисних пристроїв використовується нераціонально. При централізованому способі потрібна менша встановлена потужність елементів симетрувальних пристроїв, але в мережі з нерівномірно розподіленими навантаженнями зберігається несиметрія струмів. Груповий же спосіб поєднує переваги і недоліки

індивідуального і централізованого. Вибір способу симетрування визначається в основному параметрами мережі і характером навантажень.

Симетруючі пристрої виконуються некерованими або керованими в залежності від особливостей графіка навантаження. Відома велика кількість схем таких пристроїв, які мають як електричні, так і електромагнітні зв'язки між елементами. На рисунку 1.6 показані спрощені принципові схеми симетрувальних пристроїв [26].

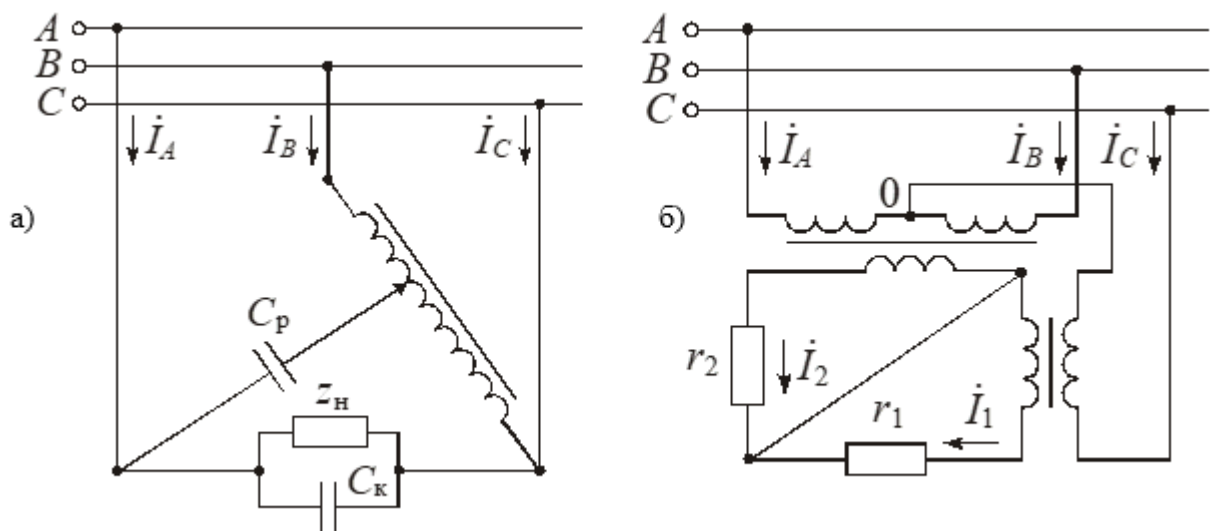


Рисунок 1.6 - Спрощені схеми пристрою
автотрансформаторного (а) і трансформаторного (б) типів

Знаходять застосування також компенсуючі пристрої [28 - 30], що представляють собою фільтри вищих гармонік, зібрані на базі БК симетруючого пристрою, несиметричні фільтри. Спрощена принципова схема фільтрокомпенсуючого пристрою показана на рисунку 1.7. Принцип його дії полягає в забезпеченні резонансу напруг на частотах вищих гармонік. Послідовні LC-ланцюги являють собою для останніх ланцюги короткого замикання.

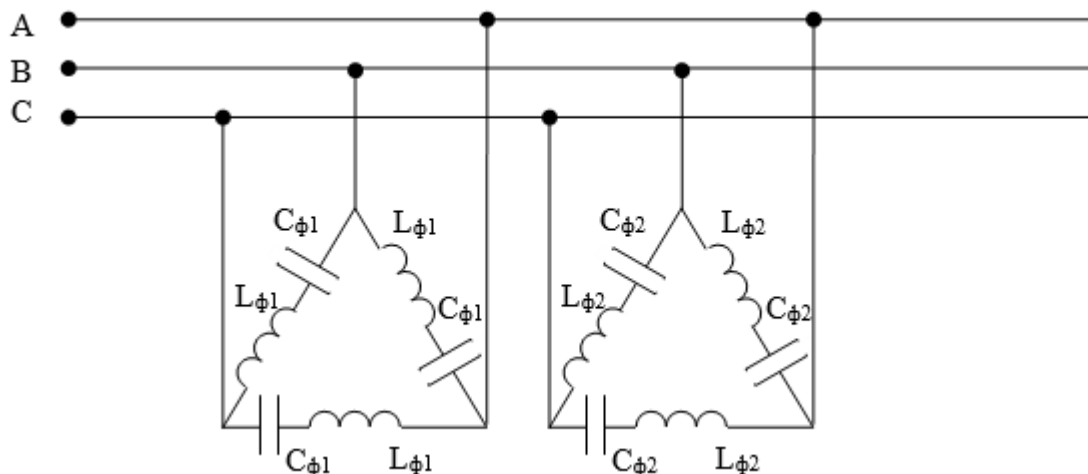


Рисунок 1.7 – Спрощена принципова схема фільтрокомпенсуючого пристрою

Зниження рівнів вищих гармонік в електричних мережах є частиною загального завдання зменшення впливу нелінійних навантажень на мережу живлення і поліпшення якості електроенергії в системах електропостачання підприємств. Комплексне вирішення цього завдання, засноване на застосуванні багатофункціональних пристроїв, виявляється в економічному відношенні більш доцільним, ніж, наприклад, використання заходів щодо поліпшення форми струму мережі перетворювача. Прикладом таких багатофункціональних пристроїв є резонансні фільтри, які називаються фільтрокомпенсуючі пристрої. Вони разом із зниженням рівнів вищих гармонік генерують в мережу живлення реактивну потужність.

При паралельному з'єднанні LC-ланцюгів, налаштованих на частоти окремих гармонік, реалізується цепочечну Фільтрокомпенсуючий пристрій. Дефіцит реактивної потужності на шинах підстанції в цьому випадку може бути повністю покритий за допомогою батарей конденсаторів, причому встановлена потужність конденсаторів використовується на 80-90%. Таким чином, фільтрокомпенсуючі пристрої є найбільш простими й економічними фільтрами, що забезпечило їх широке застосування.

2 РОЗРОБКА ЗАХОДІВ З ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРИВОДІВ

2.1 Визначення деяких напрямків з підвищення ефективності використання електроприводів

Одним із напрямків покращення показників використання приводів є підбір раціональних режимів роботи й експлуатації електропривода. Даний напрямок включає в себе таке:

- а) виключення або мінімізація режимів холостого ходу;
- б) оптимізація динамічних режимів;
- в) вибір раціонального способу регулювання швидкості залежно 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 необхідністю);
- з) використання компенсаторів реактивної потужності.

Стосовно до приводів змінного струму як варіант 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 підвищує час наробітку на відмову синхронних двигунів у кілька разів, робочих коліс відцентрового насоса на 15 – 75 % тощо. Іноді пуски двигунів утруднюються через високу концентрацію робочого тіла в робочій частині турбомеханізму (руда в млині), заклинювання коліс насосів тощо. За таких умов навіть при повній напрузі живлення пусковий момент двигуна може бути меншим моменту зрушення механізму, і звичайна схема ТРН для пуску таких

технологічних машин не дає необхідного позитивного результату. У цьому випадку є виправданим переведення ТРН у режим перетворювача частоти, тобто застосування, так званого, квазічастотного керування. Цей захід дає позитивний результат, оскільки дозволяє здійснити передпускове прокручування агрегату при частотах $0 - 0,7$ Гц. Застосування пускових пристроїв дозволяє вирішити дві пов'язані одна з одною задачі: забезпечити реальне енергозбереження засобами електропривода і зберегти працездатність механічного й електромеханічного устаткування.

Зниження продуктивності машин і установок призводить до зниження ресурсу працездатності за цілим числом факторів, так чи інакше пов'язаних зі зростанням числа пусків електричних двигунів (у тому числі і в регульованих електроприводах). При цьому необхідно враховувати таке:

1) в умовах значного зниження продуктивності пристроїв, відсутності можливості використання регульованого електропривода через його дорожнечу, істотним резервом економії електроенергії є періодичні відімкнення енергоємних споживачів (за умови непорушення технологічного процесу). При цьому необхідно використовувати спеціалізоване енергозберігаюче устаткування – пускові системи, що забезпечують як безпосередню економію енергоресурсів, так і працездатність електричних машин;

2) відхилення напруги живлення, через відсутність засобів її ефективного регулювання, призводить до зростання споживаної реактивної потужності асинхронними двигунами, зниження її генерування синхронними машинами, збільшення втрат у сталі, підвищення аварійності двигуна;

3) як вже зазначалось у першому розділі, будь-які форми неякісної напруги живлення, порушень використання енергії споживачем через зміну його внутрішніх характеристик призводять не лише до збільшення втрат, але і появи змінних складових електромагнітного моменту двигуна. Знакозмінні складові моменту є причиною високочастотних вібрацій всіх елементів конструкції,

передчасного старіння ізоляції і підвищення аварійності електроустаткування;

4) важливим питанням є загальний стан електричних машин підприємства, оскільки незадовільний технічний стан електричних машин напряму впливає на витрати на їх ремонт, а й на збитки, що може нести підприємство через зупинку або порушення технологічного процесу. Цікавим моментом, який треба враховувати є те, що стан електричних машин визначається залежить не тільки від якості ремонту, а й через зміну характеристик електротехнічної сталі, що призводять до перерозподілу втрат у двигуні і зміни теплового балансу та зниження реальної навантажувальної здатності [16].

Як правило, необхідність регулювання швидкості чи моменту електроприводів виробничих механізмів диктується вимогами технологічного процесу. Наприклад, зниження швидкості ліфта необхідне для точного позиціонування кабіни перед зупинкою. Однак існує ряд механізмів безперервного транспорту для переміщення твердих, рідких і газоподібних продуктів (конвеєри, вентилятори, насоси) з нерегульованим асинхронним електроприводом, що надає руху робочим органам з постійною швидкістю незалежно від завантаження механізмів. При неповному навантаженні робота з постійною швидкістю характеризується підвищеною питомою витратою електроенергії в порівнянні з номінальним режимом. Зниження швидкості механізмів безперервного транспорту при недовантаженні дозволяє виконати необхідну роботу з меншою питомою витратою електроенергії. У цьому випадку економічний ефект з'являється також за рахунок поліпшення експлуатаційних характеристик технологічного устаткування. Так, при зниженні швидкості зменшується знос тягового органу транспортера, збільшується термін служби трубопроводів за рахунок зниження тиску тощо. Ефект у сфері технології часто виявляється істотно вищим, ніж за рахунок економії електроенергії [21].

З іншого боку, висувається необґрунтоване бажання використовувати плавно регульовані системи привода з великим діапазоном регулювання для цих

установок. У той же час досить великий діапазон регулювання продуктивності для механізмів з вентиляторним характером навантаження можна одержати при діапазоні зміни швидкості, що не перевищує 20 % [8].

Наступний напрям енергозбереження належить до основних споживачів електричної енергії – електроприводів з нерегульованими АД і полягає в створенні спеціальних схемних рішень, що забезпечують мінімізацію шкідливого впливу на енергетичні показники при відхиленні навантаження від номінального. Спеціальні регулятори електричної енергії (регулятори напруги), що включаються між джерелом живлення і статором двигуна, крім енергозбереження виконують також інші функції (керують режимами пуску і гальмування, регулюють швидкість і момент, здійснюють захист, діагностику тощо), тобто підвищують технічний рівень привода, збільшують його надійність. При роботі АД має місце недовикористання встановленої потужності, необґрунтоване завищення їх потужності, а також недовантаження. При цьому знижуються ККД і коефіцієнт потужності АД. Регулювання напруги на статорі АД при постійній частоті забезпечує найекономічніший режим його роботи при зміні навантаження. Отже, мінімізується споживаний асинхронним двигуном струм і тим самим втрачається електроенергія в ньому [4-8].

Регулювання напруги АД у функції струму знижує втрати електроенергії до 5%, що при широкому застосуванні асинхронного електропривода дозволяє одержати великий економічний ефект. Проблема акумуляторів енергії для систем електропривода є досить важливою. Акумулятори енергії з різними фізичними принципами її акумуляції перспективні насамперед для транспортних систем. Визначено перспективу в застосуванні акумуляторів – компенсаторів в електроприводах з різкозмінним навантаженням, як регульованих, так і нерегульованих. Нова елементна база і насамперед, малогабаритні ємнісні акумулятори, робить реальними передумови до створення принципово нових комплектних пристроїв для сучасного електропривода – накопичувально-

компенсуючих пристроїв, з відповідними системами керування [3-6].

2.2 Вибір схеми перетворювача

Регулювання швидкості АД зміною частоти живлячої напруги широко використовується для якісного регулювання в першу чергу швидкості АД і широко застосовується в даний час. Принцип його полягає тому, що змінюючи частоту f_1 , живлячої АД напруги, можна відповідно до виразу $w_0=2\pi f_1/p$ змінювати його швидкість w_0 , одержуючи різні штучні характеристики. Цей спосіб забезпечує плавне регулювання швидкості в широкому діапазоні, а одержувані при цьому характеристики володіють високою жорсткістю. Частотний спосіб до того ж відрізняється і ще однією вельми важливою властивістю: регулювання швидкості АД в цьому випадку не супроводжується збільшенням його ковзання, тому втрати потужності, виявляються невеликими.

Для кращого використання і отримання високих енергетичних показників роботи АД (коефіцієнтів потужності, корисної дії і перевантажувальної здатності) одночасно з частотою необхідно змінювати і напругу, що підводиться до нього. Рациональний закон зміни напруги при цьому залежить від характеру моменту навантаження M_c . Так, при постійному моменті навантаження $M_c=\text{const}$ напруга на статорі повинна регулюватися пропорційно його частоті

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

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 спосіб забезпечує якнайкращі показники в порівнянні зі всіма іншими способами і дозволяє використовувати навіть найбільш простий тип асинхронного двигуна – з короткозамкнутим ротором.

Таким чином, при реалізації частотного способу регулювання швидкості АД використовується перетворювач частоти (рисунок 2.1), який дозволяє також регулювати і напруга на його статорі.

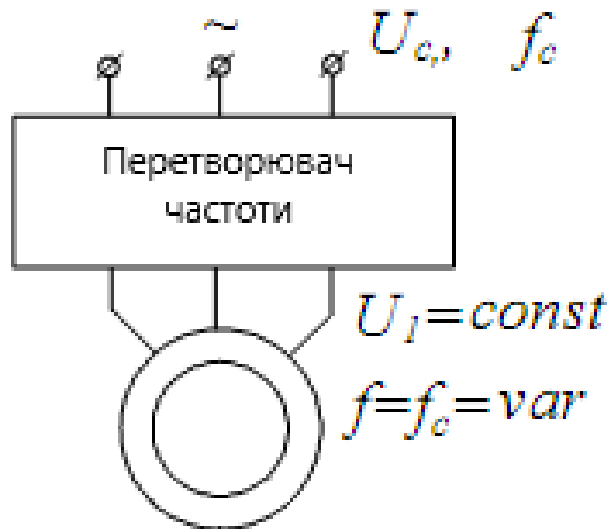


Рисунок 2.1 – Схема частотного регулювання швидкості АД за допомогою ПЧ

Перетворювачами частоти називають пристрої для перетворення змінної напруги однієї частоти (постійної або регульованої) в змінну напругу іншої частоти (постійної або регульованої). Такі пристрої однокаскадного перетворення частоти одержали назву перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком або циклоконверторів (за кордоном). (Останніми роками такі перетворювачі на повністю керованих вентилях стали називати ще матричними перетворювачами.) Термін „безпосередній зв'язок” доданий для того, щоб відрізнити цей вигляд перетворювачів частоти від двохкаскадних (багатокаскадних) перетворювачів по структурі випрямляч – автономний інвертор, що називають ще перетворювачами частоти з проміжною ланкою постійного струму (напруги) залежно від типу автономного інвертора (струму або напруги).

Для отримання двигуном електроенергії з необхідними параметрами амплітуди і частоти напруги в кожній фазі, а також для управління і регулювання

параметрів потоку енергії включається статичний перетворювач частоти (ПЧ). Для отримання максимального ККД, коефіцієнта спотворення необхідно живити двигун квазібезперервним струмом ПЧ, який забезпечується високою частотою ШІМ – управління. На цьому етапі розв'язується завдання поліпшення енергетичних і динамічних характеристик приводу.

На даний час наймасовішим і перспективнішим типом електроприводу (ЕП) є ЕП перетворювач частоти з ланкою постійного струму – асинхронний двигун (ПЧ-АД), в якому найчастіше використовується автономний інвертор напруги (АІН) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ).

У даній роботі розглянемо схему перетворювача для живлення АД витяжного вентилятора (димососа) сушарки сировини для виготовлення вогнетривів від мережі 380 В, 50 Гц. Для даного приводу обираємо трифазну схему перетворювача, яка найбільше відповідає цим умовам. Розглянемо докладніше схему перетворювача: силова частина складається із вхідних дроселів, напівкерованого випрямляча, дроселів в колі постійного струму, блока конденсаторів та вихідного інвертора на IGBT-модулях (рис. 2.2)

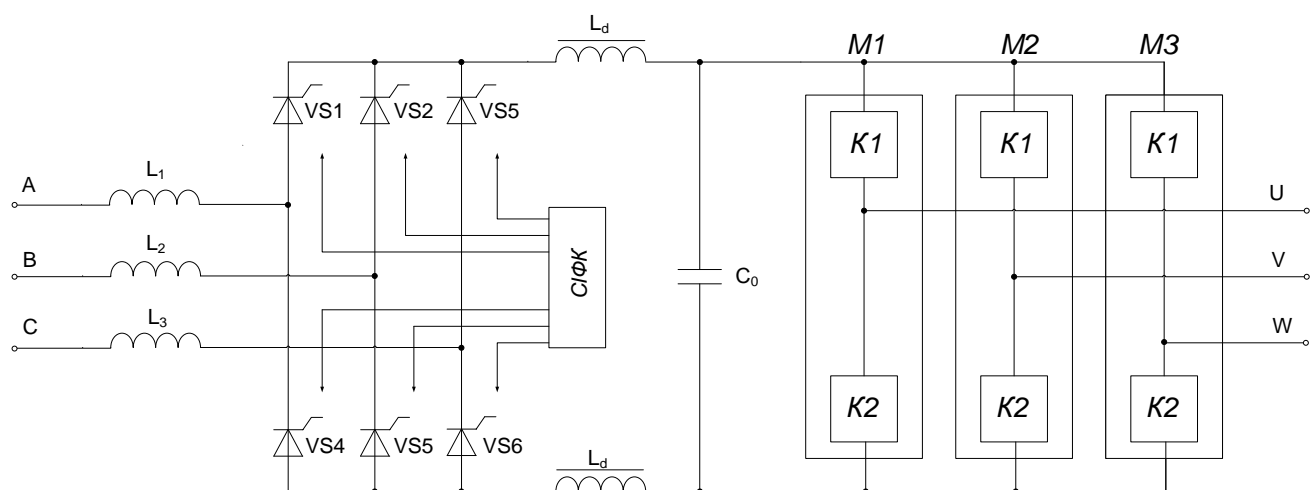


Рисунок 2.2 – Схема перетворювача частоти

Випрямляч включає в себе тиристорно-діодні модулі, зібрані за схемою

Ларіонова, і призначені для випрямлення вхідною змінною напруги та підключення силової частини електропривода до мережі. Мостова схема, хоча і містить вдвічі більшу кількість напівпровідників, має багато переваг перед нульовою, які обумовили її ширшу розповсюдженість в електроприводі. Всі напівкеровані випрямлячі мають дещо менший зсув споживаного струму відносно живильної напруги, однак форма споживаного струму несиметрична, діапазон регулювання випрямленої напруги обмежений, інверторний режим неможливий. Внаслідок цього напівкеровані випрямлячі використовують звичайно у випадках не досить жорстких вимог до діапазону регулювання та в нереверсивних електроприводах.

Блок конденсаторів, дроселі в колі постійного струму утворюють фільтр низької частоти в колі випрямленої напруги.

Вихідний інвертор містить IGBT модулі та кола їх захисту (рис 2.3)

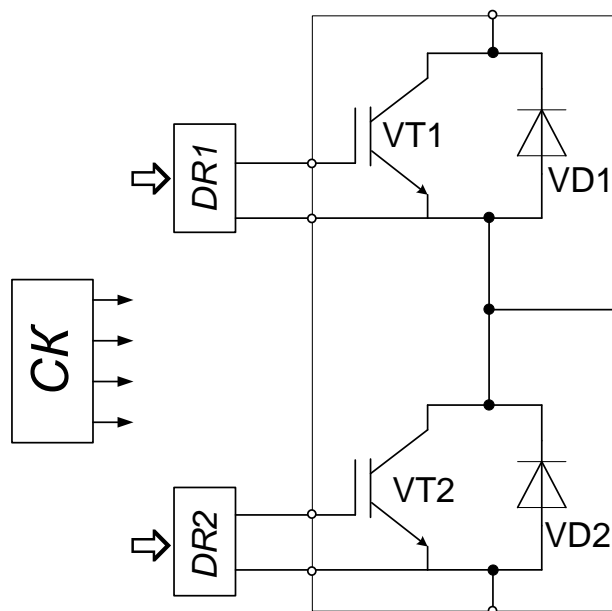


Рисунок 2.3 – IGBT модуль

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.

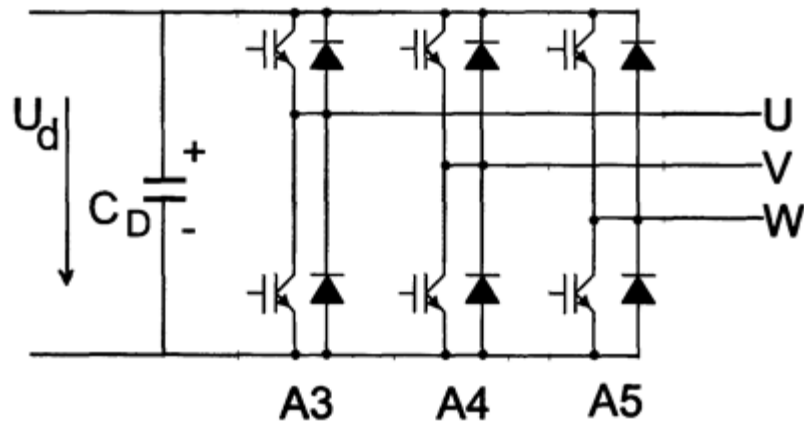


Рисунок 2.4 – Схема автономного інвертора напруги

IGBT-модулі в інверторі проводять комутацію виводів електродвигуна з ланкою постійної напруги з високою тактовою частотою таким чином, що встановлюється синусоїдальна характеристика струму (рис. 2.5). Напруга розглядається між двома вихідними клемми. Максимально можлива амплітуда зв'язаного вихідного напруги залежить від величини напруги проміжного контура U_d .

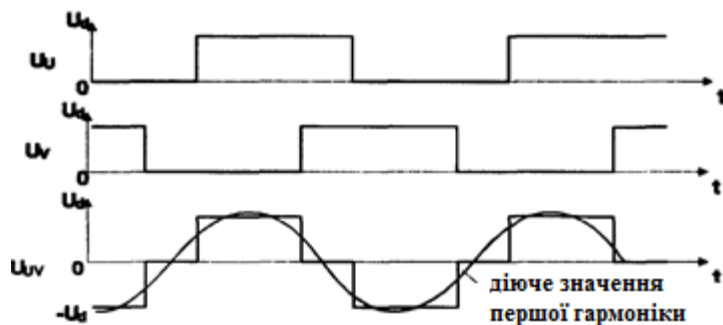


Рисунок 2.5 – Тимчасові діаграми роботи інвертора в повноблоковому режимі

Діюче значення вихідної напруги можна регулювати за допомогою широко-імпульсної модуляції (ШІМ) (рис. 2.6), заснованої на зміні тривалості відкриття транзисторів і короткочасних виключень в межах коливань першої гармоніки.

Частота, з якою повторюється форма кривої вихідної напруги, рівна частоті на виході інвертора.

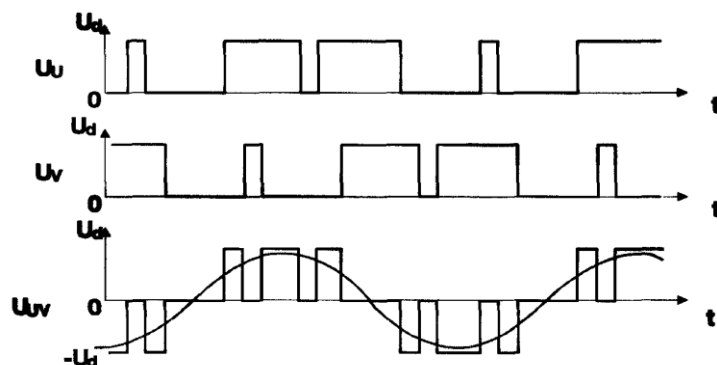


Рисунок 2.6 – Тимчасові діаграми роботи інвертора в режимі ШІМ

Оскільки зрушення по фазі і частота напруги інвертора довільно регульовані, то можливо використовувати здатність асинхронного тягового двигуна працювати в режимі генератора, тобто застосовувати електродинамічне гальмування. При цьому інвертор віддаватиме енергію назад в проміжний контур.

При режимі гальмування напрям моментів двигунів протилежно порядку проходження фаз. Напруга і струм мають великий зсув фази (рис. 2.7). Завданням коливачів першої гармоніки інвертор встановлює положення по фазі між напругою і струмом.

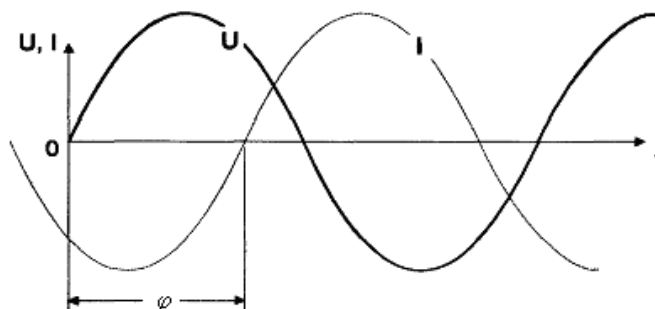


Рисунок 2.7 – Тимчасова діаграма інвертора в режимі гальмування

Напруга на виході імпульсного інвертора не є строго синусоїдальною, а містить вищі гармоніки. Хоча струм і згладжується індуктивністю розсіювання двигуна, в ньому все ж таки присутні вищі гармоніки, які викликають коливальні моменти і втрати в двигуні. За рахунок високої тактової частоти перемикачів PWR пульсація струму мінімізується.

2.3 Розрахунок і вибір елементів схеми перетворювача частоти

Обґрунтування й вибір типу напівпровідникових приладів.

У силовій електроніці найпоширеніші: 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).

Поряд з виробництвом дискретних силових напівпровідникових приладів провідними фірмами освоєний випуск силових напівпровідникових модулів. У розробках силових напівпровідникових модулів використовуються всі типи приладів.

Силові напівпровідникові прилади й модулі виробляються приблизно в 150 фірмах світу. Номенклатура виробів фірм досягає кількох тисяч, а діапазон основних параметрів охоплює від 10 до 4500 А за струмом, від 100 до 8000 В за напругою й від десятків герц до 1 МГц за частотою.

Елементна база для побудови силової схеми перетворювача вибирається з урахуванням витрат на систему керування перетворювачами. Логічна частина системи керування залежить від типу й потужності силових напівпровідникових перетворювачів (СНП), застосовуваних у силовій схемі. Виконавчі пристрої системи керування – вузли формування траєкторії робочої точки (ФТРТ) силових приладів, безпосередньо пов'язані з характеристиками й параметрами СНП.

Необхідність збільшення струмів пристроїв ФТРТ спричиняє завищення

їхньої потужності. З урахуванням необхідності потенційної розв'язки між вузлами ФТРТ додаються певні складності при створенні джерел їхнього живлення.

Значно менші потужності потрібні для ланцюгів ФТРТ МОП – і IGBT-транзисторів, тому що їхнє керування є потенційним, а не струмовим.

Розрахунок силової схеми перетворювача.

Розрахунок елементів перетворювача проводимо по методиці, приведеній в [3].

Визначаємо напругу ланки постійної напруги:

$$U_d = \frac{U_{d0}}{k_u}, \quad (2.1)$$

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:

$$U_{обр.} = U_d \cdot k_1, \quad (2.2)$$

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:

$$U_{1\phi(ном)} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_d = 0,45 \cdot U_d, \quad (2.3)$$

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

Лінійна напруга обмотки дорівнює:

$$U_{1л(ном)} = \sqrt{3} \cdot U_{1\phi(ном)}, \quad (2.4)$$

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

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

$$I_{1\phi(ном)} = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{3 \cdot U_{1\phi(ном)} \cdot \eta_{дв} \cdot \cos \varphi}, \quad (2.5)$$

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:

$$I_{1\phi(\text{пуск})} = 1,4 \cdot I_{1\phi(\text{ном})}, \quad (2.6)$$

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

Амплітудне значення пускового струму АІН рівне:

$$I_{1\phi(\text{ампл.})} = \sqrt{2} \cdot I_{1\phi(\text{пуск})}, \quad (2.7)$$

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

Максимальне значення струму на транзисторі АІН рівне:

$$I_{\tau(\text{max})} = 1,15 \cdot I_{1\phi(\text{ампл.})}, \quad (2.8)$$

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:

$$I_{\tau(\text{ср})} = \frac{I_{\tau(\text{max})}}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot (1 + \cos \varphi), \quad (2.9)$$

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

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

$$I_{д(ср)} = I_{T(ср)} = 76 \text{ A}$$

Середнє значення струму в початковій стадії пуску визначається по формулі:

$$I_{T(пуск)} = \frac{I_{T(мак)}}{\pi} \quad (2.10)$$

$$I_{T(пуск)} = \frac{177}{\pi} = 56 \text{ A}$$

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

$$I_{T(пред.)} = I_{T(пуск)} = 56 \text{ A}$$

Струм, споживаний АІН, рівний:

$$I_d = 1,35 \cdot I_{1ф(ном)} \cdot \cos \varphi \quad (2.11)$$

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

Потужність, підведена до АІН, визначається таким чином:

$$P_d = U_d \cdot I_d, \quad (2.12)$$

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

Місткість фільтрового конденсатора ланки постійної напруги визначаємо по наступній формулі:

$$C = \frac{k_n \cdot I_d}{628 \cdot \Delta U_{c(\max)}}, \quad (2.13)$$

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

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

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

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

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

$$C' = \frac{I_{1(\text{ампл.})}}{2\pi \cdot f \cdot \Delta U_{c(\max)}}, \quad (2.14)$$

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:

$$C'' = \frac{I_d}{8 \cdot f_{1(\text{ном})} \cdot \Delta U_{c(\text{max})}}, \quad (2.15)$$

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:

$$I_{d \text{ max}} = I_d \cdot K, \quad (2.16)$$

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

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

Струм фази перетворювача:

$$I_v = \frac{I_d}{3}, \quad (2.17)$$

$$I_v = \frac{96}{3} = 32 \text{ А}$$

Струм фази у момент пуску:

$$I_{v.\max} = \frac{I_{d.\max}}{3} \quad (2.18)$$

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

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

$$X_d = 2 \cdot X_\theta = 2 \cdot 0.48 = 0.96.$$

Граничне значення струму при α_{\max} :

$$I_{d.ep} = (0.05 \div 0.1) \cdot I_{d.n} = 0.05 \cdot 96 = 4,8 \text{ A}$$

Індуктивність дроселя:

$$L_\theta = \left(\frac{U_{d0}}{I_{d.ep}} \cdot K_{ep} - 2X_d \right) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cdot \left(\frac{846}{4,8} \cdot 0,05 - 2 \cdot 0,96 \right) =$$

$$= 0.022 = 22 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

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:

$$I_l = (0.07 \dots 0.1) \cdot$$

$$I_d = 0.1 \cdot 96 = 9,6 \text{ A.}$$

2.4 Розробка системи керування перетворювачем

Будь-яка система керування реалізує цілий ряд функціональних завдань у незалежності від того, який тип пристроїв є виконавчим. Проектована система заснована на напівпровідникових елементах, здатних працювати на більш високих частотах, що дозволяє одержати більш високу якість напруги на виході. Виконавчим силовим елементом у цьому випадку виступають IGBT модулі.

Нова система керування повинна забезпечувати контроль усіх параметрів роботи привода і містить наступні елементи та вузли:

- Контролер – здійснює загальне управління електроприводом. До складу контролера входять мікропроцесори, енергонезалежний запам'ятовуючий пристрій, ланцюги введення аналогових і цифрових сигналів, реле, ланцюги управління інвертором і зв'язку з пультом управління та із зовнішнім технологічним устаткуванням.

У програмі мікропроцесора реалізовані алгоритми оптимізації процесів горіння.

- Пульт управління – містить алфавітно-цифровий індикатор, світлодіоди, кнопки для виведення інформації і введення команд оператора електроприводу і ланцюга введення аналогових сигналів.

- Драйвери – призначені для безпосереднього управління транзисторами вихідного інвертора. Вони забезпечують гальванічну розв'язку ланцюгів управління щодо напруги силової частини і захист транзисторів вихідного інвертора від струмів короткого замикання.

- Блок аналогових входів – призначений для введення в систему управління сигналу від датчиків технологічних параметрів або аналогового датчика.

- Датчик напруги – призначений для введення в систему управління величини випрямленої напруги на виході випрямляча.
 - Датчики струму – призначені для вимірювання струму електроприводу, захисту електроприводу.
 - Блок живлення власних потреб – призначений для перетворення напруги ланки постійного струму вхідної або трифазної змінної напруги, необхідні для функціонування системи управління електроприводом.
 - Блок живлення контролера – призначений для формування напруги живлення датчиків струму і живлення контролера.
 - Блок живлення зовнішніх навантажень – призначений для формування напруги живлення датчиків технологічних параметрів і аналогового датчика.
- СІФК – призначена для управління вхідним силовим випрямлячем.

2.5 Керування IGBT модулями за допомогою драйверів

Біполярний транзистор з ізольованим затвором (IGBT - *Insulated Gate Bipolar Transistors*) – повністю керований напівпровідниковий прилад, в основі якого тришарова структура. Його ввімкнення й вимикання здійснюються подачею й зняттям позитивної напруги між затвором і джерелом.

IGBT є продуктом розвитку технології силових транзисторів зі структурою метал-оксид-напівпровідник, керованих електричним полем (MOSFET-*Metal-Oxid-Semiconductor-Field-Effect-Transistor*) і поєднують у собі два транзистори в одній напівпровідниковій структурі: біполярний (утворюючий силовий канал) і польовий (утворюючий канал керування). Прилад уведений у силовий ланцюг виводами біполярного транзистора Е (емітер) і С (колектор), а в ланцюг керування - виводом G (затвор).

Таким чином, IGBT має три зовнішніх виводи: емітер, колектор, затвор. З'єднання емітера й стоку (D), бази й джерела (S) є внутрішніми. Сполучення двох приладів в одній структурі дозволило об'єднати переваги польових і біполярних

транзисторів: високий вхідний опір з високим струмовим навантаженням і малим опором у ввімкненому стані.

Процес включення IGBT можна розділити на два етапи: після подачі позитивної напруги між затвором і джерелом відбувається відкриття польового транзистора (формується n - канал між джерелом і стоком). Рух зарядів з області n в область p призводить до відкриття біполярного транзистора й виникненню струму від емітера до колектора. Таким чином, польовий транзистор керує роботою біполярного.

Область безпечної роботи IGBT дозволяє успішно забезпечити його надійну роботу без застосування додаткових ланцюгів формування траєкторії перемикачів при частотах від 10 до 20 кГц для модулів з номінальними струмами в кілька сотень амперів. Такими якостями не володіють біполярні транзистори, з'єднані за схемою Дарлінгтона.

Так само, як і дискретні, MOSFET витиснули біполярні в ключових джерелах живлення з напругою до 500 В, так і дискретні IGBT роблять те ж саме в джерелах з більш високими напругами (до 3500 В).

Зараз транзистори IGBT випускаються, як правило, у вигляді модулів у прямокутних корпусах з однобічним притиском й охолодженням ("Mitsubishi", "Siemens", "Semikron" й ін.) і таблетковому виконанні із двостороннім охолодженням ("Toshiba Semiconductor Group"). Модулі з однобічним охолодженням виконуються в міцному пластмасовому корпусі з паяними контактами й ізольованою підставою. Всі електричні контакти перебувають у верхній частині корпусу. Відвід тепла здійснюється через основу.

Сучасні IGBT-модулі знаходять сьогодні широке застосування при створенні некерованих і керованих випрямлячів, автономних інверторів для живлення двигунів постійного і змінного струму середньої потужності, перетворювачів індукційного нагрівання, зварювальних апаратів, джерел безперебійного живлення, побутової й студійної техніки.

Струм керування IGBT малий, тому ланцюг керування – драйвер конструктивнокомпактний. Найбільш доцільно розташовувати ланцюги драйвера в безпосередній близькості від силового ключа. У модулях IGBT драйвери безпосередньо включені в їхню структуру. "Інтелектуальні" транзисторні модулі (ІТМ), виконані на IGBT, також містять " інтелектуальні" пристрої захисту від струмів короткого замикання, системи діагностування, що забезпечують захист від зникнення керуючого сигналу, одночасної провідності в протилежних плечах силової схеми, зникнення напруги джерела живлення й інших аварійних явищ. У структурі ІТМ на IGBT передбачається в ряді випадків система керування із широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) і однокристална ЕОМ. У багатьох модулях є схема активного фільтра для корекції коефіцієнта потужності й зменшення вмісту вищих гармонійних у живильній мережі.

При проектуванні силової схеми перетворювача були обрані IGBT транзистори японської фірми HITACHI MBN400D33. Для даного типу модулів, відповідно до рекомендацій [12, 13] вибираємо керуючий драйвер типу IGD608 Швейцарської фірми ST-Concept Technology Ltd.

Одним з основних ланок драйвера є імпульсний стабілізатор напруги. Його завданням є гальванічна розв'язка напруги джерела живлення всієї системи керування й робочою напругою IGBT транзистора керованого конкретним драйвером. Гальванічна розв'язка досягається за допомогою імпульсного трансформатора з напругою ізоляції 8 кВ. До вторинної обмотки трансформатора підключений випрямний блок для подачі напруги на структурні вузли драйвера. Вхідна позитивна напруга в діапазоні 12 – 16 В подається на вивід VCC. Струм споживання драйвером становить 450 мА. На вході також установлюється накопичувальний конденсатор ємністю не менше 250 мкФ. Типова напруга живлення по входу становить 15 В. До імпульсів пред'являються вимоги обмеження максимального робочого струму - не більше 30 мА, типове значення

10 мА. Через блок вхідного ланцюга, трансформаторний зв'язок і приймач імпульсів, імпульс керування надходить 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 із блоку перевірки напруги, блоку перевірки нагрівання силового IGBT транзистора.

Керуюча логіка подає імпульс необхідної форми на підсилювач, з виходу якого він подається на затвор IGBT транзистора через проміжний опір величиною 5,6 Ом. Емітер IGBT транзистора підключається до виводу драйвера Е.

Крім того, управляюча логіка подає імпульси на контролер спрацьовування, що представляє собою ланку зворотного зв'язку між драйвером і системою керування. Контролер спрацьовування зв'язується із системою керування через оптронний зв'язок і виходи стану SO+ й SO-. Залежно від типу системи керування можуть підключатися, у випадку мікропроцесорної системи керування, а можуть бути не підключені. Через вивід драйвера Св підключається ланцюг корекції, що складається з конденсатора ємністю 330 нФ.

Затвор IGBT транзистора захищений зустрічно включеними стабілітронами на напругу стабілізації не більше 15 В. Типова напруга керування на затворі IGBT транзистора становить 12 В і формується підсилювачем.

Блок перевірки перегріву силового IGBT транзистора підключається через висновки ME й Ref. Якщо перевірка перегріву не виконується, то вивід Ref повинен бути з'єднаний з виводом Е через стабілітрон на напругу стабілізації 7,5 В, а вивід ME через опір 68 Ом з виводом Е и конденсатор 5,6 нФ із виводом COM.

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

З аналізу роботи й перерахованих характеристик бачимо, що необхідно створення блоку живлення на напругу 15 В, що забезпечує струм живлення драйвера не менше $I_D=450$ мА. Через те, що застосовується $n=6$ драйверів IGD608, то струм джерела живлення складе:

$$I_{БП} = n \cdot I_D, \quad (2.19)$$

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

Тому що драйвер сам по собі виконує гальванічну розв'язку, то це дозволить знизити кількість додаткових елементів схеми й збільшити надійність.

2.6 Розробка системи керування драйверами

Керуючі драйвери одержують входні впливи від системи керування. При цьому струм керування повинен становити не менше 10 мА й не більше 30 мА згідно з паспортними даними драйвера [12, 13].

У спроектованій силовій схемі шість IGBT транзисторів виконують роль автономного трифазного інвертора за мостовою схемою. Таким чином, перші шість транзисторів мають свій чітко визначений алгоритм роботи, який можна виконати в програмному режимі або створити складний генератор імпульсів, що має шість вихідних каналів зсунутих один відносно іншого.

Для мікропроцесорної системи реалізація комутатора фаз достатньо проста й нераціональна, через мале використання обчислювальних потужностей навіть відносно простих мікропроцесорів. Функцію комутатора каналів досить просто реалізувати на типовому мікроконтролері.

Мікроконтролер – пристрій, що виконує функції логічного аналізу й керування; реалізується на одному або декількох кристалах. За рахунок

скорочення функцій по виконанню арифметичних операцій зменшується їхня апаратна складність і розвивається функція логічного керування.

Вибираємо однокристальний мікроконтролер загальнопромислового застосування типу K1816BE48 [14, 15, 16].

Дана однокристальна мікроЕОМ у єдиному корпусі містить повний набір елементів для реалізації всіх функцій, необхідних для побудови цифрової системи обробки даних і використовується в різноманітних системах автоматичного керування. Умовне графічне позначення мікросхеми представлено на рисунку 2.8.

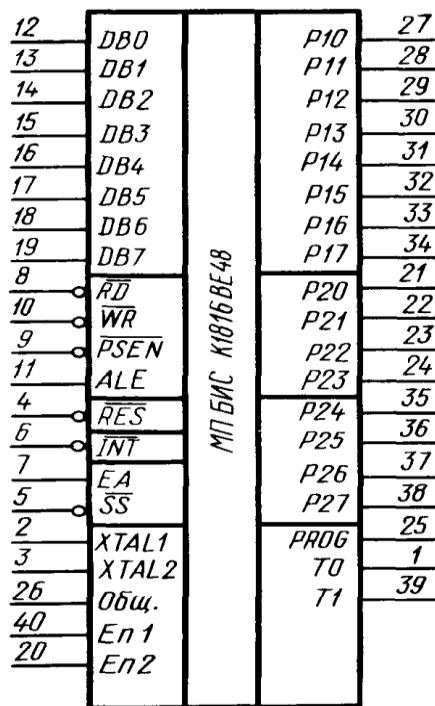


Рисунок 2.8 – Умовне графічне позначення мікросхеми K1816BE48

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.

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-висновку 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_{OCH} , V_{CC} – основне живлення $+5\text{ В}$ подається під час роботи та при програмуванні СППЗУ.

Програма комутатора каналів буде займати досить мало місця, тому не передбачаємо підключення додаткових програмних пристроїв.

Для керування шістьма драйверами використаємо порти P1.0-5 (27-32). Сигнали на драйвери надходять через проміжні підсилювачі, тому що вихід мікроконтролера дозволяє одержати струм $0,4\text{ мА}$ при рівні логічної одиниці ТТЛ.

2.7 Розрахунок генератора тактових імпульсів

З [17] приймаємо схему генератора прямокутних імпульсів виконану на логічних елементах типу 2И-НИ DD1.1-1.4. На елементах DD1.1-1.2 виконаний мультівібратор. Елементи DD1.3-1.4 застосовуються, щоб уникнути можливого жорсткого порушення коливань у момент підключення напруги живлення, так званого замерзання мультівібратора. Мультівібратор виконуємо на інтегральній мікросхемі K155ЛА3.

Резистори R1 й R2 підбираються за умови обмеження вихідного струму інтегральної мікросхеми в стані логічної одиниці.

$$R_1 = R_2 \geq \frac{U_{ВЫХ}^1}{I_{ВЫХ}^1}, \quad (2.20)$$

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

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

$$R_1 = R_2 \geq \frac{4,5}{0,4} = 11250\text{ Ом} \quad (2.21)$$

Приймаємо відповідно до ДСТУ 2825 – 67 зі стандартного ряду опорів E24 [19] величину опору 12 кОм.

Тривалість імпульсу визначимо по формулі:

$$t_{II} = \frac{1}{Q \cdot f}, \quad (2.22)$$

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

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

Параметри формуючих конденсаторів визначимо по формулі:

$$t_{II} = C \cdot (R_{ВВХ}^1 + R_1) \cdot \ln \frac{U_{ВВХ}^1}{U_{ГР}}, \quad (2.23)$$

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

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

Ємність конденсатора визначаємо по перетвореній формулі:

$$C = \frac{t_{imn}}{(R_{ВВХ}^1 + R_1) \cdot \ln \frac{U_{ВВХ}^1}{U_{ПОР}}},$$

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

Приймаємо зі стандартного ряду E24 ємності конденсаторів $C1 = 43 \text{ нФ}$, а $C2 = 39 \text{ нФ}$.

З ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ ВІД ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ЗАХОДІВ

З аналізу електроспоживання цеху за місяць видно, що найбільше споживання електричної енергії припадає на сушильні барабани. А саме на електропривід димососа. На рисунку 3.1, зображено загальний вид асинхронного двигуна димососа сушильного барабану до якого встановлюється перетворювач частоти, за паспортними даними якого буде обрано ПЧ.



Рисунок 3.1 – Загальний вид асинхронного двигуна 5AM280S6e3Y3

Вибір перетворювача частоти проводиться за паспортними даними асинхронного двигуна, які наведені у таблиці 3.1. та за формулами які подані у підрозділі 2.2. Асинхронні двигуни компресора є основними споживачами електричної енергії в компресорній станції, мають великий ККД для споживачів більше 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 КЕВ

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 IP	20
Вбудований регулятор	ПІД
Скалярний режим управління	+
Ціна	173003 грн

На рисунку 3.4 подано загальний вид популярного серед споживачів перетворювач частоти Schneider. З таблиці 3.4 видно один з найголовніших параметрів перетворювача частоти, наявність аналогового входу типу 4-20 мА.



Рисунок 3.4 – Загальний вид перетворювача частоти Schneider

Наявність цієї характеристики надає можливість подальшого вирішення автоматичної установки заданого режиму роботи з пульта контрольно-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:

$$S_{\text{пуск.АД}} = \frac{75 \cdot 2}{0,938 \cdot 0,84}, \quad (3.1)$$

Розрахунок потрібного пускового струму АД:

$$I_{\text{пуск. АД}} = 141 \cdot 2, \quad (3.2)$$

$$I_{\text{пуск}}^* = 2, \quad (3.3)$$

Наступні умови для частотного перетворювача:

$$150 \text{ кВт} \geq 126 \text{ кВт}, \quad (3.4)$$

$$200 \text{ А} \geq 188 \text{ А}, \quad (3.5)$$

Частотний перетворювач Schneider задовільнять умовам вибору ПЧ.

Враховуючи характер навантаження сушильного барабана сировиною за технологією, на рисунку 3.5 показано зміну електричного навантаження на асинхронний двигун.

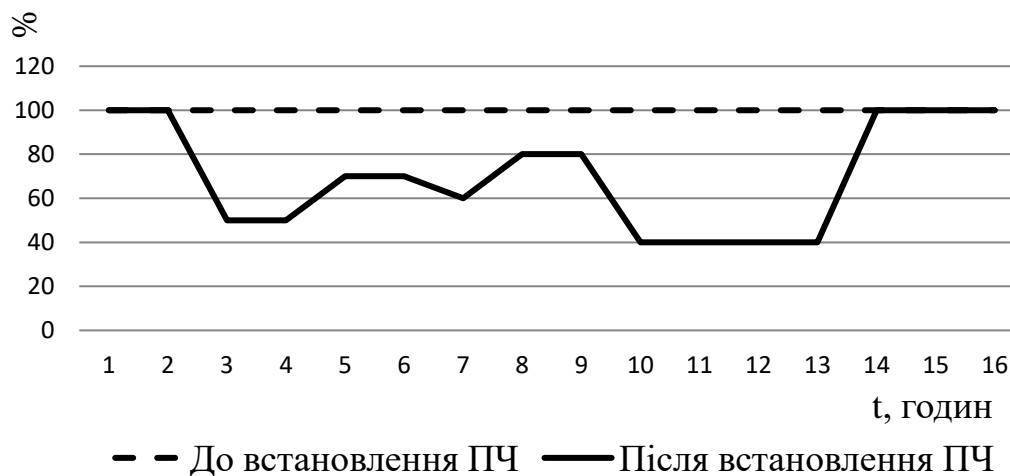


Рисунок 3.5 – Графік зміни навантаження електричного двигуна

Зниження навантаження електричного двигуна, тягне зниження споживання електричної енергії. Метод розрахунку економічної доцільності проекту:

З технологічного процесу сушильний барабан працює 16 годин, з частотним перетворювачем кожна година має різний процент використання повної потужності електричного двигуна димососа.

Формули для розрахунку:

Формула для розрахунку потужності яка зекономиться за n-у годину:

$$W_e^n = W \cdot (1 - K^n), \quad (3.6)$$

де W – потужність електродвигуна димососа,

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

$$W_e^1 = 75 \cdot (1 - 1) = 75 \text{ кВт}. \quad (3.7)$$

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

На рисунку 3.6 зображено діаграму зміни річного споживання електричної енергії пов'язані з встановленням перетворювача частоти на електричний двигун димососа сушильного барабану. В таблиці 3.6

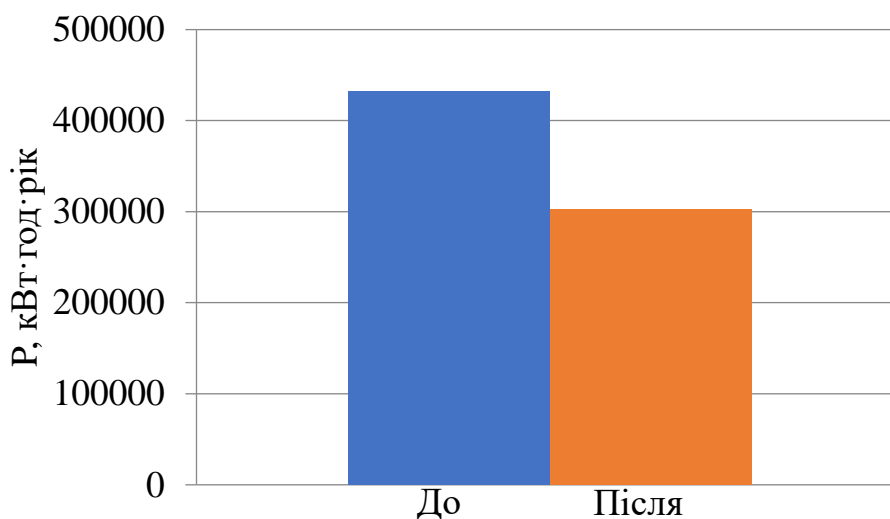


Рисунок 3.6 – Діаграма економічного ефекту після встановлення ПЧ

Формули для розрахунку РП:

$$РП = \sum W_e^n \cdot T \cdot 365, \quad (3.8)$$

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

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

$$РП = 360 \cdot 2,49 \cdot 360 = 322704 \text{ грн.} \quad (3.9)$$

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.

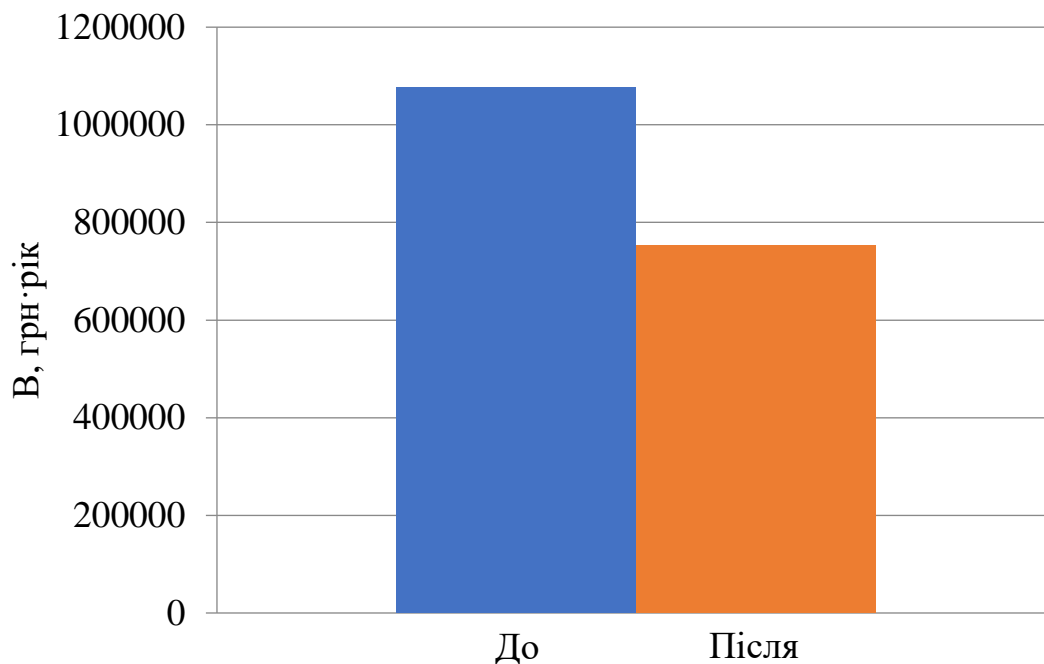


Рисунок 3.7 – Економічний ефект встановлення ПЧ

Формула для розрахунку терміну окупності:

$$PP = \frac{KB}{PP}, \quad (3.10)$$

де KB – розмір капіталовкладень;

PP – річний прибуток;

$$PP = \frac{238848}{322704} = 0,74 \text{ року.} \quad (3.11)$$

Термін окупності становить 9 місяців. Проект є рентабельним, адже термін окупності менше 5 років. Заходи щодо встановлення перетворювачів частоти вже не були актуальним через високу вартість обладнання. Але з кожним роком вони становляться все більш доступними через збільшення конкуренції ринку.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

До обов'язків формувальника входить: формування вручну або хвостовим молотком динасових, магнезійальних та шамотних виробів нескладної конфігурації, а також тих, що мають на поверхні виступи, поглиблення, виїмки, гострі кути; карбідокремнієвих стержнів на механічному вібраційному верстаті і виливання гіпсових форм. Формування плавлених вогнетривів і смолопекової заготовки. Заповнення форм формовою масою і трамбування її і заготовок у спеціальній формі за допомогою пневматичного молотка. Опрання сформованих виробів, маркування їх, посипання дрібним піском або шамотом, укладання виробів на рівні щитки і віднесення їх на вагонетки або в сушила. Складання, розбирання і змащення форм. Транспортування сформованих виробів у сушила. Формування карбідокремнієвих стержнів на вібростолі вручну. Виявлення і усунення несправностей в роботі устаткування, що обслуговується. Налагодження механічного вібраційного верстата.

Кожний формувальник повинен знати: будову і правила технічної експлуатації хвостового молотка, механічного вібраційного верстата, вимірального інструменту; будову і правила технічної експлуатації 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 опрання виробів; види браку під час формування і способи його попередження; правила читання креслень; слюсарну справу.

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

- машини і механізми, що рухаються (вантажопідйомні крани, пересувний бункер) тощо;
- вантажі, що переносяться кранами;
- падаючі предмети (деталі форм, інструмент тощо);
- небезпечний рівень напруги в електричному колі, замикання в якому може відбутися через тіло людини.

Основні шкідливі виробничі фактори :

- підвищена запиленість повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень вібрації;
- знижена температура повітря робочої зони.

Шкідливі фактори можуть призвести до професійних захворювань.

Технічні рішення по гігієні праці й виробничої санітарії

Мікроклімат робочої зони визначається такими параметрами як температура, відносна вологість повітря, теплове випромінювання, які, виходячи з категорії виконуваних робіт по важкості, характеристики приміщень, по надлишках явного тепла з урахуванням періоду року (теплий, перехідний, холодний) устанавлюємо відповідно до вимог .

Оптимальний мікроклімат у приміщенні забезпечує підтримка теплової рівноваги між організмом і навколишнім середовищем.

У таблиці 4.1 наведені значення прийнятих припустимих (оптимальних) параметрів повітряного середовища в робочій зоні робочої ділянки.

За нормативними величинами та даними наведеними у таблиці 4.1 можна зробити висновок, що мікроклімат у цеху відповідає вимогам.

Таблиця 4.1 – 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 27 ⁰ С	0,3	0,2-0,4

Освітлення виробничих приміщень

У зв'язку з тим, що природне освітлення приміщення здійснюється через віконні отвори і є дуже слабким, на робочому місці має застосовуватися також штучне освітлення. Штучне освітлення створюють електричним джерелом світла, яке включають в міру необхідності, регулюють інтенсивність світлового потоку і його спрямованість.

Виконаємо розрахунок штучного освітлення по методу світлового потоку.

Довжина приміщення – 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.

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 $F \cdot N$.

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

Знайдемо необхідне число ламп. Для освітлення виробничих приміщень вибір джерел світла проводять з врахуванням освітленості. При освітленості від 150 до 300 лк доцільно застосовувати джерела світла типи ЛБ, ДРЛ, ЛБХ. Вибираємо люмінесцентні лампи типи ЛХБ80 (2×80 Вт); довжина лампи – 1,5 м, ширина – 0,4 м, світловий потік даної лампи – 3840 лм.

Отже, потрібне число ламп:

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

Оскільки світильники дволампові, то для забезпечення нормальної потужності освітлення приміщення необхідно 6 світильників. Приймаємо, що кількість світильників по довжині складатиме 2 шт., а по ширині – 3 шт.

Світильники з люмінесцентними лампами в основному розташовують рядами. Ряди слід орієнтувати паралельно стіні з вікнами. Потрібно встановити два світильники в ряд. Застосовуємо світильники ШОД (оскільки ШОД дає більш

рівномірне освітлення) з люмінесцентними лампами ЛХБ потужністю 2×80 Вт і з потоком 3840 лм. Схема розташування світильників представлена на рисунку 6.1.

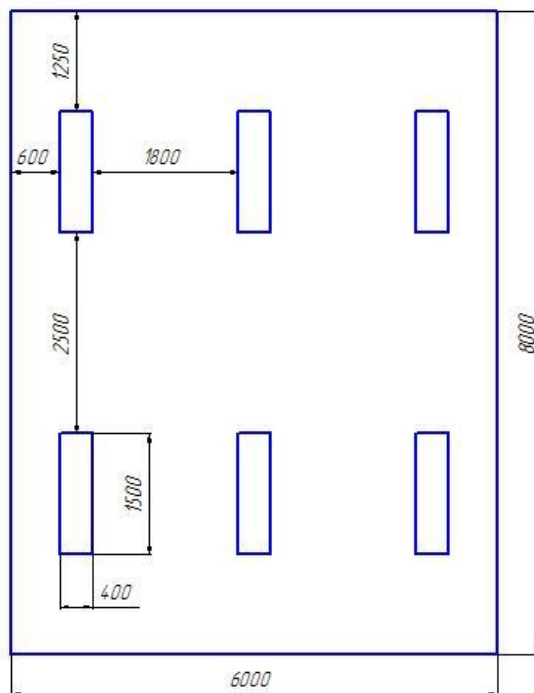


Рисунок 4.1 – Схема розташування світильників

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.

Електробезпека

При виявленні несправності в електричному обладнанні формувальник повинен припинити роботу, доповісти майстру і викликати чергового електрика.

Усувати неполадки в електрообладнанні самому не допускається. Після усунення несправності пуск обладнання повинен проводити черговий електрик за заявкою майстра.

Користуватися переносними електросвітільниками дозволяється при напрузі не вище 36 В, а в сирих підвальних приміщеннях - не вище 12 В.

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

Забезпечення електробезпеки регламентується ПУЕ:

- пристрій захисного заземлення згідно СНиП 3.05.06-85 і ПУЕ для захисту людей від ураження електричним струмом при можливому пошкодженні ізоляції;
- недоступність ТВЧ для випадкового дотику ;
- застосування ізоляції , поточний контроль;
- посилення вимог до електропроводок ;
- застосування попереджувальних сигналізації , написів і плакатів ;
- використання індивідуальних засобів захисту та пристроїв;
- посилення вимог до кваліфікації персоналу електромонтажних організацій (за ГОСТ Р 50571 1-93 , п. 4.1.1).

Заходи пожежної безпеки

Формувальник повинен вміти використати за призначенням засоби пожежогасіння (пісок, землю, вогнегасники тощо) і знати місця зберігання протипожежного інвентарю, вміти ним користуватися.

Під час виникнення пожежі необхідно доповісти керівництву цеху і диспетчерові підприємства, викликати пожежну охорону, а до її прибуття вжити

всіх заходів щодо ліквідації загоряння своїми силами, діючи відповідно до інструкції з пожежної безпеки.

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

Під час загоряння пально-мастильних матеріалів не можна гасити полум'я водою. Для цього необхідно використовувати землю, пісок, вогнегасники.

Не можна захарашувати проходи і доступ до протипожежного інвентарю, вогнегасників, гідрантів.

Палити дозволяється тільки у спеціально відведених місцях.

Кожний формувальник повинен бути ознайомлений з планом ліквідації аварій на підприємстві в частині, яка має відношення до його робочого місця і дільниці виконання робіт

Засоби індивідуального захисту

Формувальники вогнетривких підприємств повинні працювати у встановленому за нормами спецодязі:

- костюмі бавовняному за ГОСТом 27575-87 "Костюмы мужские для защиты от общих производственных загрязнений и механических воздействий. Технические требования" - на 12 місяців;

- фартусі брезентовому з нагрудником за ГОСТом 12.4.029-76 "Фартуки специальные. Технические условия" - на 12 місяців;

- спецвзутті - черевиках шкіряних за ГОСТом 28507-90 "Обувь специальная кожаная для защиты от механических воздействий. Общие технические условия" - на 12 міс;

- рукавицях комбінованих за ГОСТом 12.4.010-75 "ССБТ. Средства индивидуальной защиты. Рукавицы специальные. Технические условия» - на 2 міс; враховуючи необхідність роботи з віброінструментом, формувальник повинен

одержувати також рукавиці антивібраційні за ТУ 78-349-75, виготовлені з бавовняних тканин та які мають на долоневій частині амортизаційну прокладку з поролону.

Крім наведених засобів індивідуального захисту, формувальник повинен працювати у захисній касці, захисних окулярах, користуватися протипиловим респіратором і засобами захисту органів слуху, а також під час роботи в умовах знижених температур - зимовим спецодягом - куртці на утеплюваній прокладці за ГОСТом 29335-92 "Костюмы мужские для защиты от пониженных температур. Технические условия" - на 36 місяців.

У відповідності до внутрішнього трудового розпорядку формувальник зобов'язаний:

- перед початком зміни прийти на змінно-зустрічні збори і одержати завдання на виконання робіт;
- виконувати тільки доручену роботу з дотриманням усіх вимог інструкції з охорони праці; виконувати вказівки старшого формувальника і майстра;
- не розпочинати роботу, якщо умови її виконання суперечать інструкції з охорони праці, або іншому документу, що регламентує безпечне виконання робіт, а також без інструктажу з охорони праці під час тимчасового переведення на іншу роботу і ставати до роботи тільки тоді, коли умови забезпечують безпеку робітника і оточуючих;
- утримувати своє робоче місце і устаткування в справному стані і чистоті;
- зберігати необхідні в роботі інструмент і пристосування в справному стані;
- не допускати сторонніх осіб на дільницю виконання робіт;
- не розпивати спиртні напої на робочому місці і на території підприємства і не з'являтися на роботу у нетверезому і наркотичному стані.

Формувальник, як і всі працівники цеху, повинен знати і вміти надати першу (долікарську) допомогу потерпілому.

ВИСНОВКИ

Аналіз якості електроенергії на промислових підприємствах нашої країни показує, що в їх цехових мережах спостерігаються перевищення допустимих рівнів як мінімум одного з нормованих показників якості електроенергії, в той час як інтегральні показники симетрії і сінусоїдальності знаходяться в нормі, а коефіцієнти окремих гармонійних складових значно перевищують гранично допустимі величини. Також можна зазначити, що при однакових рівнях показників якості електроенергії, спектральний склад напруги може істотно змінюватися, оскільки останній визначається типом електроприймачів, які деформують напруга і режимом їх роботи.

Важливим напрямком зниження енергоспоживання є впровадження енергозберігаючого обладнання, до якого в першу чергу відноситься частотно-регульований електропривод (ЧРП) - асинхронний електродвигун, керований від перетворювача частоти (ПЧ). Впровадження частотних перетворювачів для вирішення різних технологічних завдань успішно використовується, що пояснюється в першу чергу великим поширенням асинхронних електродвигунів (близько 90% ринку) відрізняються простотою конструкції, високою надійністю, дешевизною, легкістю підключення і т. д.

Розроблена і реалізована, за допомогою пакету програм MatLAB, система керування електроприводом компресорної станції з асинхронним двигуном. Частотне керування двигунами змінного струму є економічно вигідним, оскільки воно дозволяє зберегти високий ККД двигуна, забезпечити, як рухові, так і гальмівні режими роботи, достатню жорсткість характеристик і, що найголовніше, дозволяє використовувати в якості приводного АЕД.

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.: Енергоруагом 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. Эксплуатация систем электропоставления: 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 вузов/ П.В.Нестеров, В.Ф.Шаньгин, В.Л.Горбунов и др.; Под ред. Л.Н.Преснухина, - Мн.: Высш. 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 // Гірнич 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/enreport2009

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.

ДОДАТОК А

Демонстраційні матеріали до захисту магістерської роботи

Підвищення енергоефективності електроприводу

в умовах промислових підприємств