

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики і електротехніки

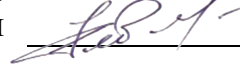
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій

(повна назва кафедри)

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри



В. М. Рябенський

д.т.н., професор

« 16 » червня 2025 р.

Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

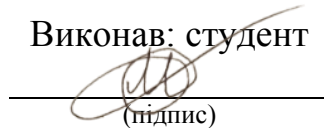
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: Розробка навантажувального стенду для асинхронного електропривода з частотним керуванням.

Виконав: студент

4321 групи

М.С. Савицький

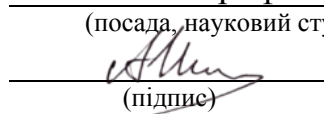

(підпис)

Керівник роботи:

професор каф. ПЕЕТ, к.т.н., доцент,

професор НУК

(посада, науковий ступінь, вчене звання)


(підпис)

О. К. Жук

м. Миколаїв – 2025 року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра	програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій
Спеціальність	171 «Електроніка»
Освітня програма	Електронні системи

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

 О. С. Дьяконов
(підпис)

« 14 » квітня 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр» (освітньо-кваліфікаційний рівень)

Студенту Савицькому Миколі Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка навантажувального стенду для асинхронного електропривода з частотним керуванням

керівник роботи Жук Олександр Кирилович, професор каф. ПЕЕТ, к.т.н., доцент, професор НУК
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ректора № УЧ-343 від «23» квітня 2025 року.

2. Термін подання роботи: 10 червня 2025 р.

3. Вихідні дані по роботі: Розробити навантажувальний стенд і виконати дослідження показників ЯЕ на фізичній моделі автономної ЕЕС з ЧРП у складі: трансформатора, що заміщує генератор: 15 кВА, 220/20÷400 В; $\cos\varphi=0.8$; перетворювача частоти Schneider ATV312 0,75 кВт; 380...500 В; асинхронного двигуна 1,68 кВт; 380 В; 3,15 А; 2850 об/хв та навантажувального генератора постійного струму. Потужність навантаження 0,5 кВт.

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів) Вступ, якість електроенергії в морському секторі, електромагнітна сумісність в системах з ШІМ перетворювачами частоти, моніторинг показників якості електроенергії, експериментальне визначення та дослідження широкодіапазонних спектрів напруги і струму та їх симетричних і несиметричних складових на вході і виході асинхронного ЧРП, охорона праці.

5. Перелік презентаційних матеріалів Мета роботи, завдання і методи досліджень, актуальність, приклади катастрофічних наслідків від недотримання норм ЯЕ, вплив дії гармонік керованих випрямлячів, вплив від дії синфазних напруг,

існуючі високовартісні суднові аналізатори-реєстратори гармонік, схема стенду для вимірювання спотворень напруги, схема вимірювання напруги , осцилограми і спектри, порівняння результатів, висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
5	Тубальцев А.М., доцент кафедри екології		

7. Дата видачі завдання «__24__» _____квітня_____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вступ. Проблема ЯЕ та ЕМС в автономних (суднових) ЕЕС з частотнорегульованими напівпровідниковими електроприводами	15.02.25 р.	Виконано
2.	Високочастотні гармоніки та синфазна напруга.	01.03.25 р.	Виконано
3.	Моніторинг ЯЕ. Аналізатори та реєстратори ЯЕ в складі СЕЕС	15.03.25 р.	Виконано
4.	Удосконалення методології експериментального визначення та дослідження широкодіапазонних спектрів напруги і струмів на вході і виході асинхронного ЧРП	15.05.25 р.	Виконано
5.	Встановлення, з'єднання та заземлення екранованого кабелю для суднового частотно-регульованого приводу	10.06.25 р.	Виконано

Студент


(підпис)

М.С. Савицький

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

О. К. Жук

(прізвище та ініціали)

Анотація

Розглянуто можливі напрямки удосконалення засобів забезпечення якості електроенергії (ЯЕ) та електромагнітної сумісності (ЕМС) з метою підвищення їхньої ефективності з урахуванням схемних і режимних особливостей інтегрованих суднових електроенергетичних систем (СЕЕС) з потужними напівпровідниковими частотно-регульованими асинхронними електроприводами (ЧРАЕП). Розроблено навантажувальний стенд стенду для асинхронного електропривода з частотним керуванням. Удосконалено методології експериментального визначення та дослідження широкодіапазонних спектрів та їх складових на вході і виході ЧРАП шляхом обробки масивів часових залежностей сигналів через цифровий осцилограф та блоку PowerGUI у MATLAB Simulink.

Ключові слова: якість електроенергії, суднова електроенергетична система, судновий напівпровідниковий пропульсивний комплекс, перетворювач частоти, керований фільтрокомпенсуючий пристрій.

Abstract

Possible directions for improving the means of ensuring the quality of electricity (QE) and electromagnetic compatibility (EMC) are considered in order to increase their efficiency, taking into account the circuit and operating characteristics of integrated ship electrical power systems (SEES) with powerful semiconductor frequency-controlled asynchronous electric drives (CHRAEP). A load stand for a stand for asynchronous electric drive with frequency control has been developed. The methodologies for experimental determination and study of wide-band spectra and their components at the input and output of the CHRAP have been improved by processing arrays of time dependences of signals via a digital oscilloscope and the PowerGUI block in MATLAB Simulink.

Keywords: quality of electricity, ship electrical power system, ship semiconductor propulsion complex, frequency converter, controlled filter-compensating device.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень та термінів	7
Вступ.....	9
Розділ 1. ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В МОРСЬКОМУ СЕКТОРІ.....	14
1.1. Якість електроенергії та її показники в ЕЕС морських суден та споруд з потужним ЧРЕП	14
1.2. Гармонічні спотворення напруги і струмів в автономних ЕЕС	19
1.2.1. Частотно-регульовані приводи змінного струму.....	21
1.2.2. Тиристорні (SCR) приводи постійного струму.....	25
1.3. Способи зменшення гармонічних спотворень	29
1.3.1. Багатопульсні приводи	29
1.3.2. Пасивні широкодіапазонні фільтри.....	30
1.3.3. Силові активні фільтри.....	33
Розділ 2. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ В СИСТЕМАХ З ШІМ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ЧАСТОТИ	36
2.1. Високочастотні гармоніки.....	36
2.2. Синфазні режими	40
2.3. Зниження синфазної напруги.....	42
Розділ 3. МОНІТОРИНГ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	46
3.1. Аналізатори та реєстратори показників якості електроенергії	46
3.2. Моніторинг якості електроенергії	52

Розділ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ШИРОКОДІАПАЗОННИХ СПЕКТРІВ НАПРУГИ І СТРУМУ ТА ЇХ СИМЕТРИЧНИХ І НЕСИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ НА ВХОДІ І ВИХОДІ АСИНХРОННОГО ЧРП	56
4.1. Навантажувальний стенд для дослідження частотнорегульованого асинхронного електропривода.....	56
4.2. Дослідження спектрів та їх складових через стандартний аналізатор показників якості електроенергії.....	60
4.3. Результати дослідження спектрів напруг і струмів та їх складових шляхом обробки масивів часових залежностей сигналів через цифровий осцилограф та блок FFT PowerGUI у MATLAB Simulink	62
4.4. Удосконалення методології експериментального визначення спектрів та коефіцієнта гармонічних спотворень напруги в СЕЕС з ПЧ	68
Розділ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ	73
5.1. Симетричний кабель для суднового ЧРП.....	73
5.2. Встановлення, з'єднання та заземлення екранового кабелю для суднового частотно-регульованого приводу.....	77
5.3. Рекомендації щодо технології встановлення кабелю частотно-регульованого приводу.....	86
Висновки	93
Список використаних джерел	95

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЕЕС – автономна електроенергетична система;
АРН – автоматичний регулятор напруги;
АФГ – активний фільтр гармонік;
БК – батарея конденсаторів;
ДРП – джерело реактивної потужності;
ГЕУ – гребна електрична установка;
ГЕД – гребний електродвигун;
ГРК – гвинтульова колонка;
ГФ – гібридний фільтр;
ДГА – дизель-генераторний агрегат;
ДТК – діодно-транзисторний ключ;
ЕМП – електромагнітна перешкода;
ЕМС – електромагнітна сумісність;
КВ – керований випрямляч;
НП – напівпровідниковий перетворювач;
НФКП – нерегульований фільтрокомпенсуючий пристрій;
ПЯЕ – показники якості електроенергії;
ПКТК – послідовний компенсатор з тиристорним керуванням;
ПС – потужність спотворень;
РК – реакторний компенсатор;
РП – реактивна потужність;
РФ – резонансний фільтр;
РФКП – регульований фільтрокомпенсуючий пристрій;
САР – система автоматичного регулювання;
СГС – сумарне гармонічне спотворення;

					171.4321.КР.ПЗ.Скорочення	Арк.
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

СЕЕС – суднова електроенергетична система;

СЕР – система електроруху;

СЕС – суднова електростанція;

ТП – тиристорний перетворювач;

ФКП – фільтрокомпенсуючий пристрій;

ФНЧ – фільтр низьких частот;

ШР – широтно-імпульсний регулятор;

ЯЕ – якість електроенергії.

					171.4321.КР.ПЗ.Скорочення	Арк.
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність дослідження. Сучасні судна все більше відходять від традиційних систем з тепловим гребним двигуном, надаючи перевагу електричним пропульсивним установкам на базі частотно-регульованих асинхронних електроприводів (ЧРАЕП). Такий перехід обумовлений вищою енергоефективністю, гнучкістю управління та оптимізацією характеристик систем.

Проте інтеграція потужних ЧРАЕП, у складі яких використовуються автономні інвертори напруги (АІН) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), призводить до генерації високочастотних (ВЧ) електромагнітних завад (ЕМЗ), які суттєво погіршують електромагнітну сумісність (ЕМС) та якість електроенергії (ЯЕ) в судових електроенергетичних системах (СЕЕС). Погіршення ЯЕ призводить до зайвих електричних втрат та різних проблем, таких як перебої у функціонуванні електронних пристроїв, зниження ефективності автоматизованих систем, пошкодження обладнання і аварійних ситуацій на судні [2–8]. Це особливо небезпечно, оскільки неналежна робота систем може мати серйозні наслідки для безпеки людей, вантажів і екології, та можуть призводити до економічних і технологічних збитків. Забезпечення високої ЯЕ в СЕЕС є обов'язковим чинником у забезпеченні безпеки та нормального функціонування судових систем, судна та екіпажу в цілому.

Для безпечної експлуатації суден з напівпровідниковими перетворювачами частоти (ПЧ) у складі частотно-регульованих напівпровідникових електроприводів (ЧРЕП) необхідно вирішити дві головні проблеми [1, 2].

Перша з них стосується показників якості електроенергії (ПЯЕ) і полягає в обмеженні загального коефіцієнта гармонічних спотворень напруги THDu на головних шинах СЕЕС для зазначеного діапазона гармонік. Нещодавно ІАКС запровадила нову вимогу UR E24 [3] для суден з електричною рушійною установкою щодо моніторингу та реєстрації в СЕС з ЧРЕП рівнів THDu, які не повинні перевищувати 8% при врахуванні гармонік до 50-го

					171.4321.КР.ПЗ.Вступ	Арк.
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		9

порядку (до 2,5 кГц). Однак ПЧ, які використовують IGBT, генерують гармоніки приблизно до 50 МГц, причому найбільш проблематична ділянка зазвичай знаходиться в діапазоні 10 кГц – 10 МГц, хоча інциденти можуть виникати і на більш низьких частотах перемикання ПЧ. Отже, через недосконалу нормативну базу та невідповідні метрологічні засоби високочастотні гармоніки залишаються неврахованими при визначенні THDu попри їх згубні наслідки.

Друга особливо критична проблема ЕМС, полягає у виникненні синфазної напруги (Common Mode Voltage – CMV) між кожною фазою і корпусом судна та супутнього синфазного струму (СМІ), гармоніки яких розповсюджуються через паразитні ємнісні зв'язки. CMV, є причиною постійних відмов ЧРЕП, навігаційних, контрольних, кранових та пожежних систем, а СМІ руйнують підшипники двигунів [9–13].

Питаннями синфазних напруг та струмів займаються переважно зарубіжні науковці, такі як Ian C. Evans, Mohammed M. Islam, Shuo Wang, Jianqiu Zhang, Sudip K. Mazumder, Frede Blaabjerg, Abraham M. Alcaide, Josef Lutz.

Синфазні струми та напруги не корелюють з основною частотою і тому виглядають як імпульсні завади або «несинхронізований шум» та викликають ще більші спотворення напруги, ніж гармоніки, оскільки їхня частота набагато вища [5–6].

Рівень синфазних струмів безпосередньо залежить від швидкості наростання напруги (dU/dt) на виході АІН, та величини паразитних ємностей системи. Чим вищі ці параметри, тим вищий рівень синфазних ЕМЗ.

Подальше впровадження сучасних високошвидкісних силових напівпровідникових перетворювачів (СНП), зокрема IGBT та SiC транзисторів, тільки ускладнює ситуацію, оскільки із підвищенням частоти комутації значення dU/dt зростає, а разом з ним – і рівень синфазного струму. Існуючі стандартні засоби вимірювання показників ЯЕ, а отже і засобів забезпечення ЕМС, такі як індивідуальні або системні пасивні та активні

					171.4321.КР.ПЗ.Вступ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

фільтри виявляються неефективними по відношенню до синфазних складових спотворень, оскільки вони орієнтовані на визначання та зниження лише диференційних ЕМЗ. Це обумовлює необхідність у розробці спеціалізованих синфазних фільтрів, здатних працювати у широкому частотному діапазоні, а також точного моделювання джерел та шляхів поширення таких високочастотних завад у структурі ЧРАЕП.

Таким чином, актуальність дослідження полягає в подальшому розвитку моделей, що враховують джерела генерації та паразитні ємнісні зв'язки шляхи поширення високочастотних синфазних ЕМЗ, та створення на їх основі ефективних засобів зниження їх рівня.

Метою роботи є розробка методології експериментального визначення спектрів та THDu фазної напруги та її синфазної і диференціальної складових в автономній СЕЕС з ПЧ у складі ЧРЕП без використання коштовних удосконалених аналізаторів; оцінка, на основі експерименту, впливу «супергармонік» (від 2,5 кГц до 25 кГц) на загальну величину THDu.

Для досягнення поставленої мети вирішувались такі **задачі**:

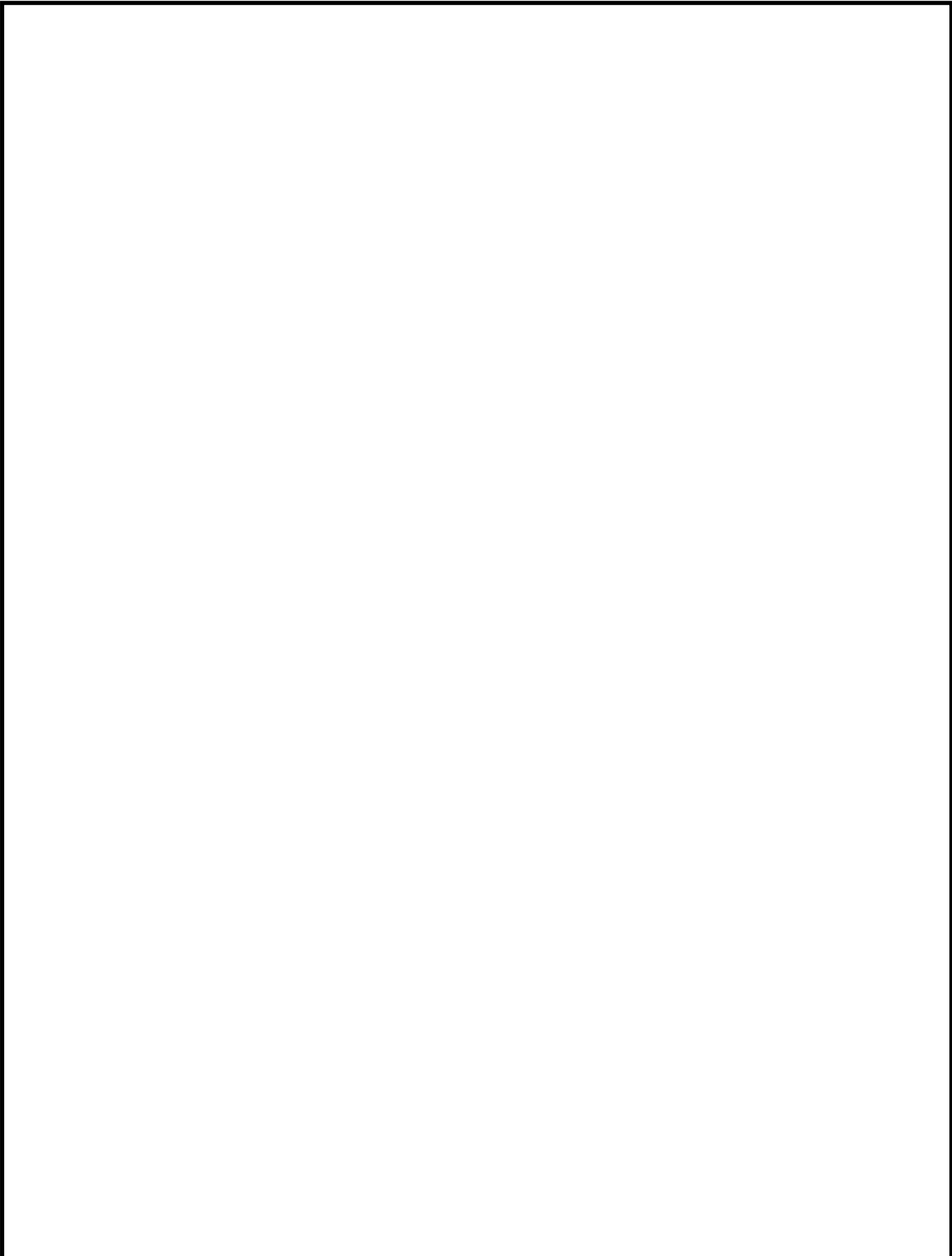
- огляд проблеми ЯЕ та ЕМС в автономних (суднових) ЕЕС з частотно-регульованими напівпровідниковими електроприводами;
- дослідження джерел, механізмів формування та шляхів поширення високочастотних електромагнітних завад у суднових електроенергетичних системах з частотно-регульованими асинхронними електроприводами;
- удосконалення методології експериментального визначення та дослідження широкодіапазонних спектрів та їх складових на вході і виході ЧРАП шляхом обробки масивів часових залежностей сигналів через цифровий осцилограф та блоку PowerGUI у MATLAB Simulink;
- забезпечення ЕМС та безпеки експлуатації ЧРАЕП шляхом використання спеціального симетричного кабелю.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси в пропульсивних електроустановках суден з ЧРАЕП та засобами зниження високочастотних електромагнітних завад.

Предмет дослідження – показники якості електроенергії та методологія їх вимірювання в СЕЕС з ЧРАЕП.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач використано методи теорії електричних кіл та імітаційного моделювання в прикладному програмному пакеті MATLAB/Simulink.

					171.4321.КР.ПЗ.Вступ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		



					171.4321.КР.ПЗ.Р1			
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробник		Савицький М.С.			Якість електроенергії в морському секторі	Літ.	Арк.	Аркуші
Консультант							13	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Жук О. К.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 1. ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В МОРСЬКОМУ СЕКТОРІ

1.1. Якість електроенергії та її показники в ЕЕС морських суден та споруд з потужними частотно-регульованими електроприводами (ЧРП).

Електричні приводи зі регульованою швидкістю, як змінного, так і постійного струму, є стандартним обладнанням на борту морських бурових установок/суден, наземних бурових установок та морських нафтовидобувних установок. Приводи з регульованою швидкістю мають багато застосувань у морському секторі, включаючи головні рушії, підрулюючі установки, «бурові агрегати» (тобто бурові насоси (рис. 1.1), приводи лебідок та верхні приводи), компресори, вентилятори, насоси (особливо електричні занурювальні), приводи опорних стелажів на самопідйомних бурових установках, кранах тощо.



Рисунок 1.1 – Бурові насоси, керовані приводами з регульованою швидкістю

На рис. 1.2 зображено типову однолінійну структуру напівзанурювальної бурової установки DP3 з 12-ти пульсними частотними перетворювачами потужністю 25 600 кВт (~35 000 к.с.) для рушійних установок та приблизно 2 x 5000 кВА (~10 000-12 000 к.с.) 6-ти пульсними буровими приводами. Нелінійне навантаження становить близько 85-90% електричного навантаження бурової установки.

					171.4321.KP.ПЗ.P1	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Крім того, через дію тиристорних приводів постійного струму виникають імпульсні провали напруги, які також створюють проблеми.

Оскільки значна кількість типів обладнання використовує напругу лінії живлення для синхронізації або отримання керуючої інформації, наявність гармонік може спричинити широкий спектр збоїв та/або несправностей. Отже, морські класифікаційні товариства та інші органи мають правила та рекомендації щодо обмеження гармонічного спотворення напруги. Наприклад, Американське бюро судноплавства (ABS) тепер має 5% Uthd (загальне гармонічне спотворення напруги) загалом та 8% Uthd для MODU (мобільних морських бурових установок). Щоб збігатися з початковим правилом 5% Uthd, запровадженим у лютому 2006 року, ABS опублікувало документ «Керівництво щодо контролю гармонік в електроенергетичних системах» [3]. Інші морські класифікаційні органи, хоча й не публікують жодних інструкцій як таких, також мають аналогічні правила щодо спотворення напруги. Однак, за досвідом авторів, жоден цивільний орган морської класифікації ефективно не контролює власні правила гармонік. Це може бути пов'язано з браком знань, досвіду та незалежних і надійних програмних пакетів для оцінки гармонік, а також з комерційними міркуваннями.

Проблема якості електроенергії (ЯЕ) в електроенергетичних системах автономних морських об'єктів, насамперед, для суден з потужними напівпровідниковими комплексами та єдиною інтегрованою СЕЕС залишається вельми актуальною через вплив ЯЕ на умови експлуатації і безпеку судна в цілому. У морській галузі широко відомі інциденти з катастрофічними наслідками, що трапилися через низьку ЯЕ, такі як аварії на пасажирському круїзному лайнері RMC «Queen Mary 2» (вихід з ладу конденсатора в кормовому приміщенні фільтра гармонік та вибух в кормовому головному розподільному щиті; тимчасова втрата судном маневреності) [1,2,3], на пасажирському судні MC «Statendam» (спалах дуги

					171.4321.KP.ПЗ.P1	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

в головному вимикачі та пожежа в приміщенні головного розподільного щита) [1] та на нафтовій платформі «Tern Alpha» (вибух в газокompресійному модулі, пожежа, евакуація персоналу, зупинка процесу буріння) [1].

Короткий перелік найбільш актуальних для СЕЕС показників ЯЕ з відповідними нормами, що прийняті органами IEEE та IEC, а також класифікаційними товариствами ABS та PRS [2], наведено в таблиці 1.1. Ці показники охоплюють: δf_p , δf_{tr} , δf_{per} , δf_{max} – стале, перехідне, періодичне, максимальне відхилення частоти відповідно; δU_p , δU_{tr} , δU_{per} , δU_{max} – стале, перехідне, періодичне, максимальне відхилення напруги відповідно; K_U (THD) – інтегральний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги; $K_{U(v)}$ – коефіцієнт v – ї гармоніки напруги; δP , δQ – коефіцієнти відхилень пропорційності розподілу активної та реактивної потужності.

Інтегровані ЕЕС суден та морських платформ з пропульсивними комплексами мають спільні особливості, які ускладнюють задачу забезпечення ЯЕ:

1. На відміну від сухопутної суднова електрична мережа є автономною та гнучкою енергетичною системою. Її генеруюча здатність заздалегідь точно визначена і обмежена.
2. Потужність КЗ СЕЕС є значно меншою, а її еквівалентний опір є відносно більшим порівняно з промисловими мережами.
3. Потужність окремих навантажень СЕЕС сумірна з потужністю окремої генераторної установки.
4. Морські умови є дуже мінливими, що призводить до незапланованого ступінчастого змінювання активного та реактивного навантаження, напруги, частоти та рівня гармонік суднової мережі.
5. СЕЕС можна розглядати як систему змінюваної частоти та напруги з довгостроковими (сталими) або швидкоплинними (короткочасними, перехідними) значеннями відповідних параметрів [2].

					171.4321.КР.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		17

6. Паралельна робота множинних генераторів потребує керування розподілом активної та реактивної потужності.

Таблиця 1.1 – Показники найбільш актуальних для СЕЕС показників ЯЕ з відповідними нормами

Показник	Значення показника			
	IEEE - 45	PN-IEC6100 92 - 101	ABS	PRS
δf_p	$\pm 3\%$	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$
δf_{tr}				
а) значення	$\pm 4\%$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$
б) тривалість	2с	5с	5с	5с
δf_{per}	0,5%	0,5%	—	—
δf_{max}	5,5%	12,5%	—	—
δU_p	$\pm 5\%$	6% – 10%	+6% – 10%	+6% – 10%
δU_{tr}				
а) значення	$\pm 16\%$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$
б) тривалість	2с	1,5с	1,5с	1,5с
δU_{per}	5%	2%	—	—
δU_{max}	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$	—	—
K_U (THD)	5%	5%	5%	7,5%
$K_{U(v)}$	3%	3%	3%	4,5%
Стрибки напруги u_s , $t_{нар}/t_{сп}$	2500В ($U_{ном}=380-600$ В) 1000В ($U_{ном}=380-600$ В)	5,5 $U_{ном}$ 1,2μс/50μс	δf_{max}	—
δP	—	—	$\pm 15\%$	$\pm 15\%$
δQ	—	—	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$

Оскільки обладнання для контролю гармонічних спотворень часто вважається дорогим і може не безпосередньо сприяти виробництву, комерційні міркування часто домінують і «рішення», якщо їх встановити, можуть забезпечити неідеальну якість електроенергії, зазвичай перевищуючи встановлені межі. В результаті значна кількість установок має значно більше гармонійних спотворень напруги, ніж дозволено. Нерідко на деяких установках вимірюється до П'ЯТИ-ШЕСТИ разів більше дозволеної межі.

Якість та безпека джерел напруги мають вирішальне значення для безпеки та експлуатаційної цілісності будь-якого судна чи установки, незалежно від класу чи типу. Це просто неможливо переоцінити. Будь-який вихід з ладу або несправність обладнання через низьку якість електроенергії може призвести до втрати продуктивності або інциденту з можливими серйозними або катастрофічними наслідками.

Проблема ще більше посилюється тим, що офшорні органи охорони здоров'я та безпеки по всьому світу також не контролюють високий рівень спотворень напруги; натомість, наразі це залишається на розсуд нафтових компаній. Знову ж таки, йдеться про брак знань та досвіду, а також про фінансові обмеження. Однак, ситуація починає змінюватися. Виконавча служба з охорони здоров'я та безпеки праці у Великій Британії зараз займає проактивну позицію, і ходять чутки, що найближчим часом вони запровадять законодавчо встановлене обмеження на 8% Uthd (загальне гармонічне спотворення напруги) для всіх установок у Північному морі. Коли це станеться, передбачається, що воно буде запроваджено по всій галузі по всьому світу. За останні 25 років сталося кілька інцидентів на морі та на шельфі по всьому світу, деякі з яких були дуже серйозними.

1.2 Гармонічні спотворення напруги і струмів в автономних ЕЕС

Більшість звичайних приводів з регульованою швидкістю, що живляться синусоїдальною напругою, споживають несинусоїдальний або «нелінійний» струм. Під час процесу перетворення змінного струму на постійний, як тиристорні приводи постійного струму, так і частотні перетворювачі змінного струму споживають небажані гармонічні струми, які непарно кратні частоті живлення (наприклад, струм 5-ї гармоніки становить $5 \times 60 \text{ Гц} = 300 \text{ Гц}$), що споживаються з джерела.

«Характерні» (тобто очікувані) гармоніки струму залежать від кількості трифазних (тобто 6-імпульсних) вхідних випрямлячів у нелінійному навантаженні та базуються на формулі:

					171.4321.KP.ПЗ.Р1	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$I_h = n.p \pm 1$$

де n – ціле число, p – кількість пульсацій випрямленої напруги (струму) за період (тобто 6 імпульсів).

Приклади характерних порядків гармонік струму:

$$p = 6; h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, \dots$$

$$p = 12; h = 11, 13, 23, 25, 35, 37, \dots$$

$$p = 24; h = 23, 25, 47, 49, \dots$$

Примітка: 12-, 18- та 24-пульсні приводи/системи, проілюстровані вище, складаються з двох, трьох або чотирьох трифазних мостових (тобто 6-пульсних) випрямлячів відповідно, кожен з яких має відповідний фазозсувний трансформатор.

Потім окремі гармонічні струми взаємодіють з імпедансом системи на відповідних частотах, створюючи спотворення напруги на цих частотах; це базується на законі Ома, де:

$$U_h = I_h \times Z_h,$$

де U_h - гармонічна напруга на певній гармонічній частоті;

I_h - гармонічний струм на певній частоті;

Z_h - імпеданс на певній частоті.

Напруги окремих гармонік підсумовуються наступним чином і результатом є «загальне гармонічне спотворення напруги» (U_{thd}):

$$U_{thd} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \times 100\% = \frac{\sqrt{U_5^2 + U_7^2 + U_{11}^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \times 100\%$$

					171.4321.KP.ПЗ.Р1	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Де U_5 , U_7 , U_{11} тощо гармоніки напруги 5,7,11... порядків; U_1 - основна гармоніка напруги; U_{thd} - загальне гармонічне спотворення напруги.

Примітка: « U_{thd} » стосується лінійних напруг, тоді як « V_{thd} » стосується фазних напруг.

1.2.1. Частотно-регульовані приводи змінного струму

З вищесказаного видно, що чим вище значення нелінійного навантаження в кВт, тим більша величина гармонік струмів і вище подальше спотворення напруги. На рис. 1.3 показано приклад лінійних напруг, спотворених через надмірні гармоніки струмів, що споживаються вхідним діодним випрямлячем ЧРАЕП з конденсаторним фільтром.

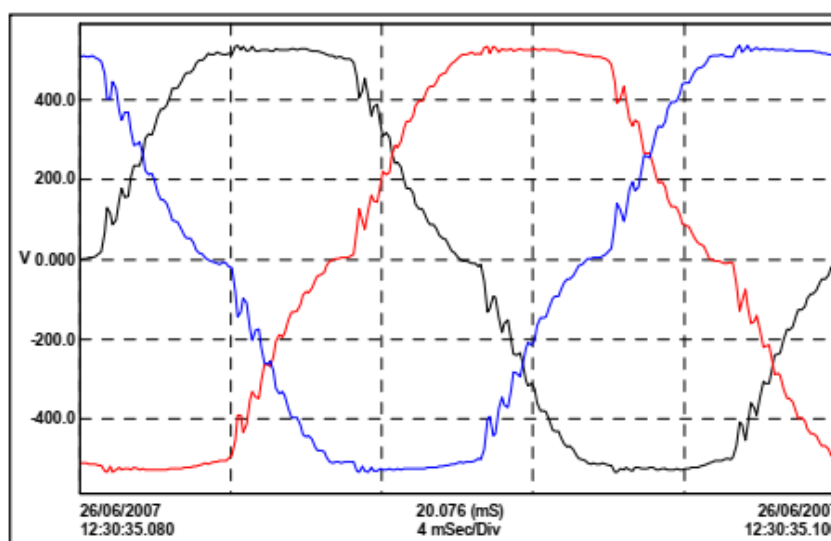


Рисунок 1.3 – Приклад лінійних напруг, спотворених частотно-регульованими приводами змінного струму (8,8% U_{thd})

Як приводи змінного, так і постійного струму з регульованою швидкістю споживають нелінійний струм, але частотно-регульовані приводи змінного струму (ЧРП) схильні створювати вищий рівень гармонійних спотворень напруги через ємнісне навантаження (шина постійного струму), як видно з боку живлення.

ЧРП стають все більш популярними на бурових установках/суднах і складаються з трьох підсистем (рис. 1.4):

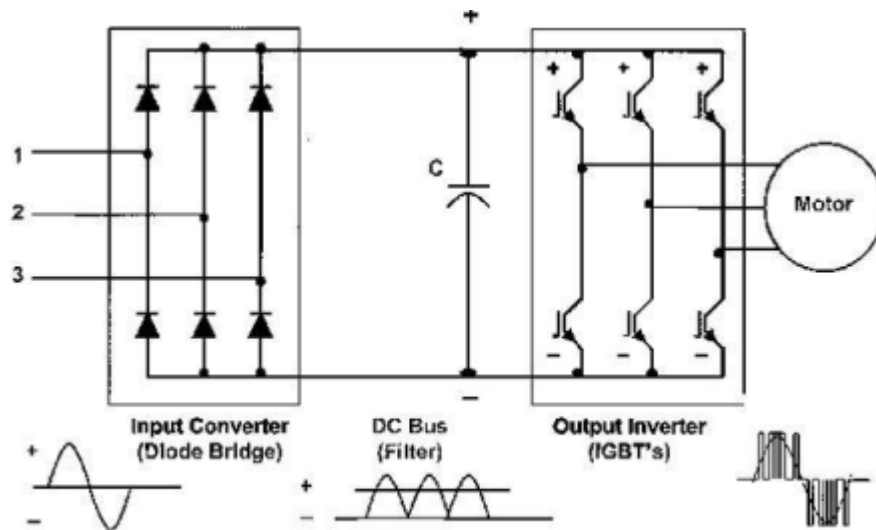


Рисунок 1.4 – Спрощена схема 6-пульсного ЧРАЕП змінного струму

I) Вхідний випрямляч (діодний або SCR попереднього заряду) для перетворення змінного струму в постійний для шини постійного струму.

II) Шина постійного струму, яка по суті є конденсаторною системою накопичення, з якої вихідний інвертор на силових IGBT ключах (біполярних транзисторах з ізольованим затвором) бере енергію.

III) Інверторний IGBT міст, який інвертує напругу шини постійного струму в змінну напругу змінюваної частоти для керування асинхронним двигуном(ами).

ЧРП споживає струм від джерела живлення лише тоді, коли напруга на конденсаторах шини постійного струму нижча за миттєву напругу живлення.

Це відбувається поблизу піку форми хвилі напруги живлення, тому споживані струми мають імпульсний характер з двома пульсаціями фазного струму за половину періоду, як видно на рис. 1.5.

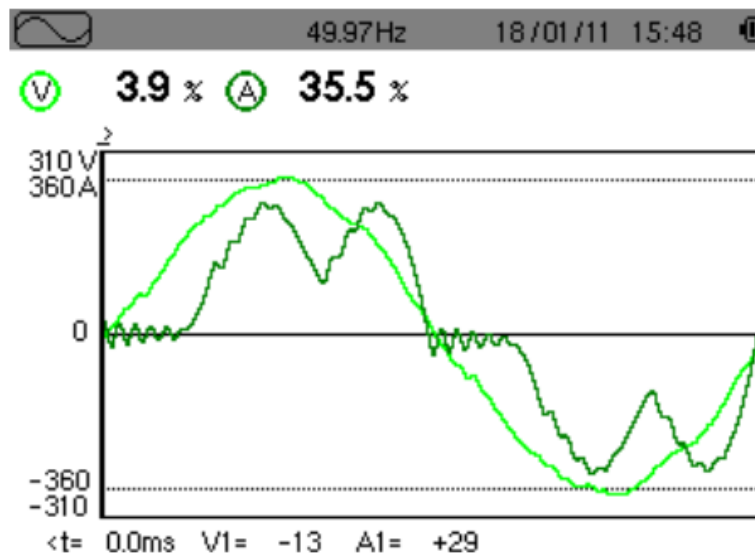


Рисунок 1.5 – Фазні напруга і струм на вході ЧРАЕП

Рис. 1.6 ілюструє нелінійні фазні струми, споживані частотним перетворювачем потужністю 1500 к.с./1100 кВт при помірному навантаженні. Коливання навколо нуля були зумовлені конденсаторами фільтра ЕМС, розташованими нижче за струмом.

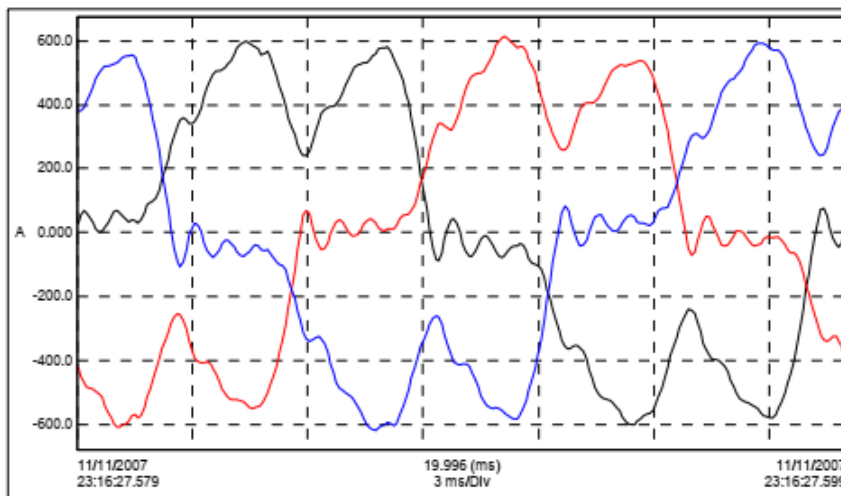


Рисунок 1.6 – Приклад фазних струмів частотного перетворювача потужністю 1500 к.с. (1100 кВт) при помірному навантаженні. 34,88% I_{thd} .

На рис. 1.7 детально зображено гармонічний спектр струму. Зверніть увагу на частковий резонанс на 23-й та 25-й гармоніках через ємність.

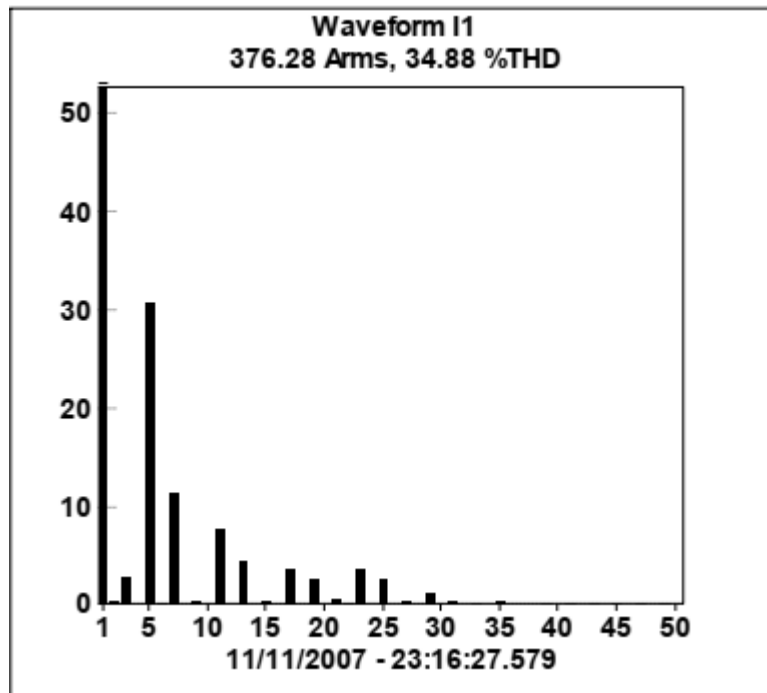


Рисунок 1.7 – Приклад гармонічного спектру струму частотного перетворювача потужністю 1500 к.с. (1100 кВт) . Частковий резонанс на 23-й та 25-й гармоніках)

Потужні перетворювачі частоти (ПЧ) часто використовуються для рушійних установок, бурових насосів, лебідок та бурових приводів , показаних на рис. 1.8, де кілька вихідних інверторних мостів на IGBT (біполярний транзистор з ізольованим затвором) використовують спільні випрямлячі, що працюють на шину постійного струму.

Їх називають «системами зі спільною шиною постійного струму». Така конфігурація зменшує вартість та необхідний простір порівняно з тим, що потрібно для кількох «автономних» приводів.

Рис. 1.8 ілюструє систему спільної шини постійного струму, що складається з двох випрямлячів, ємнісної шини постійного струму (тобто блоку зберігання) та восьми незалежно керованих інверторів ПЧ на IGBT (біполярний транзистор з ізольованим затвором) з ШІМ (широотно-імпульсною модуляцією – поширений тип керування формою сигналу вихідних АІН ПЧ, які є кінцевим вихідним каскадом автономного ПЧ). Ця конкретна система використовує два 6-іпульсні випрямлячі, по одному з кожного боку шинного

з'єднання. Первинні обмотки обох трансформаторів зміщені по фазі на 30° один відносно одного.

Таким чином, якщо шинне з'єднання замкнуте (тобто для забезпечення збалансованого навантаження з кожного боку), буде сформована квазі - 12-пульсна система щодо гармонік. 12-пульсна конфігурація зменшить гармонічні спотворення порівняно зі стандартною 6-пульсною системою, але оптимальна продуктивність значною мірою визначається навантаженням на кожен випрямляч, різними дисбалансами у випрямлячах системи керування, обмотках трансформатора та напругах живлення, а також рівнем фонових спотворень (тобто спотворень напруги через інші навантаження).

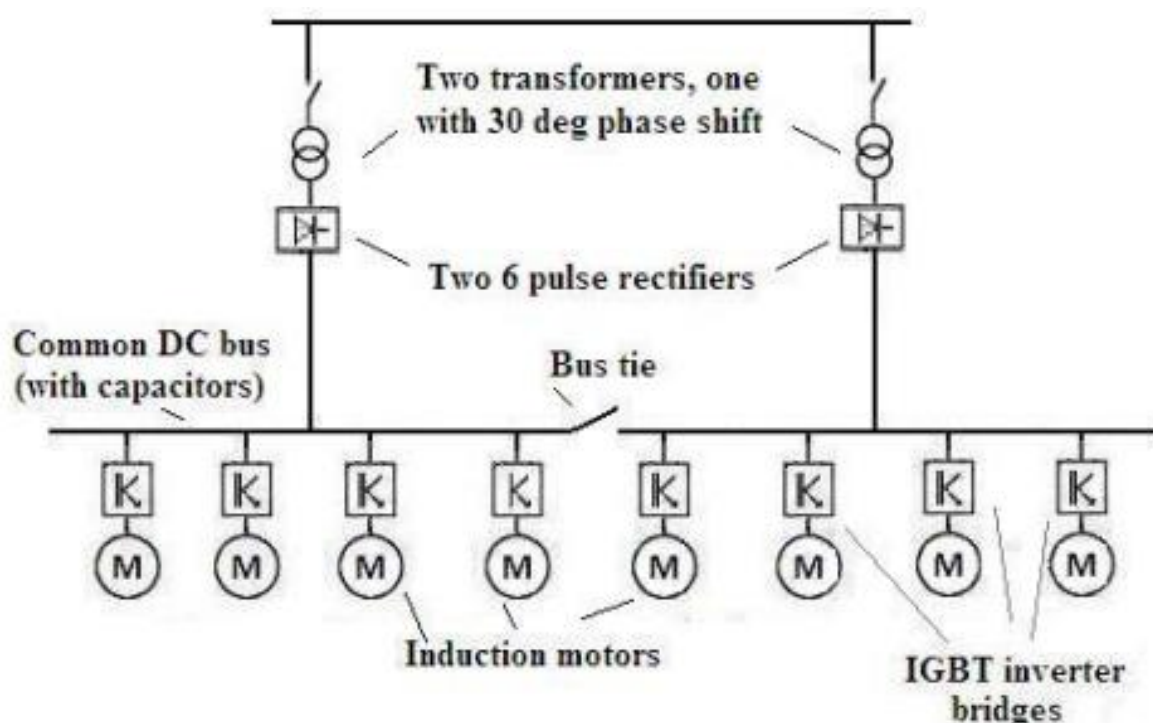


Рисунок 1.8 – Система загальної шини постійного струму з квазі12-пульсною конфігурацією для послаблення гармонік

1.2.2. Тиристорні (SCR) приводи постійного струму

Приводи постійного струму SCR не такі складні, як перетворювачі частоти (ПЧ), і по суті є складними регуляторами напруги постійного струму, де вихідна напруга значною мірою визначає швидкість двигуна постійного струму, тоді як вихідний постійний струм визначає крутний момент двигуна.

					171.4321.KP.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		25

Як видно з рис. 1.9, SCR приводи постійного струму споживають несинусоїдальний струм, який, як правило, є більш плавним за своєю природою, ніж вхідний струм ЧРАЕП, через вплив індуктивності якоря двигуна постійного струму. На рис. 1.10 детально показано типовий спектр гармонік вхідного струму 6-пульсного SCR приводу постійного струму з додатковою індуктивністю реактора, встановленого між приводом SCR та джерелом живлення. На жаль, ця «додаткова індуктивність» часто не встановлюється на бурових установках/суднах через вартість та обмежений простір. Це призводить до збільшення вищих гармонік струмів. Як ми обговоримо пізніше, проблеми з «лінійними вирізами» та іноді піками напруги є небажаним результатом.

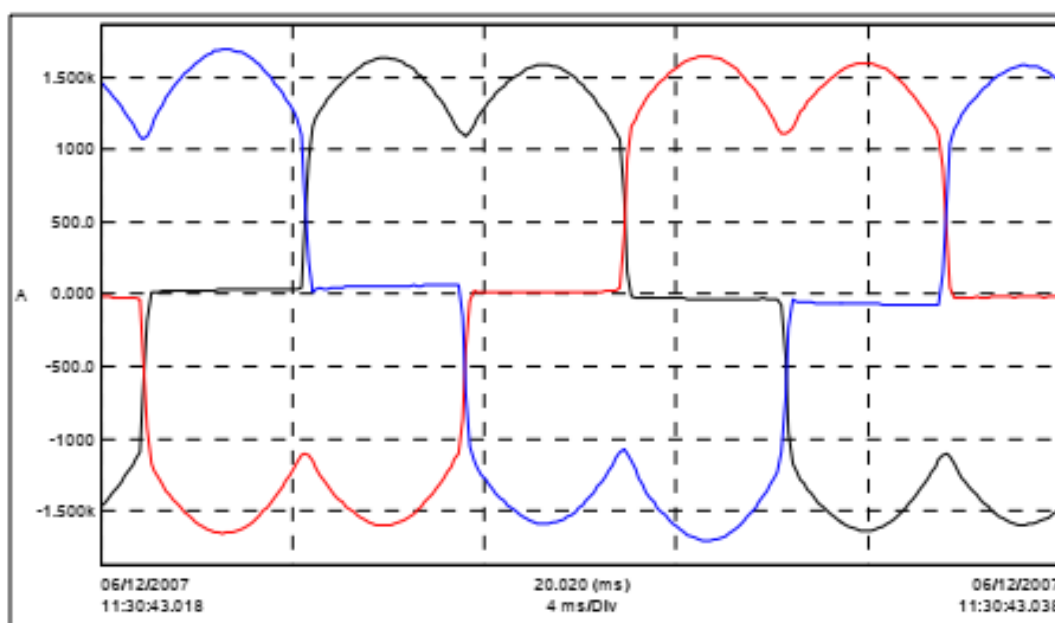


Рисунок 1.9 – Приклад вхідних струмів SCR приводу постійного струму при помірному навантаженні (31,51% I_{thd})

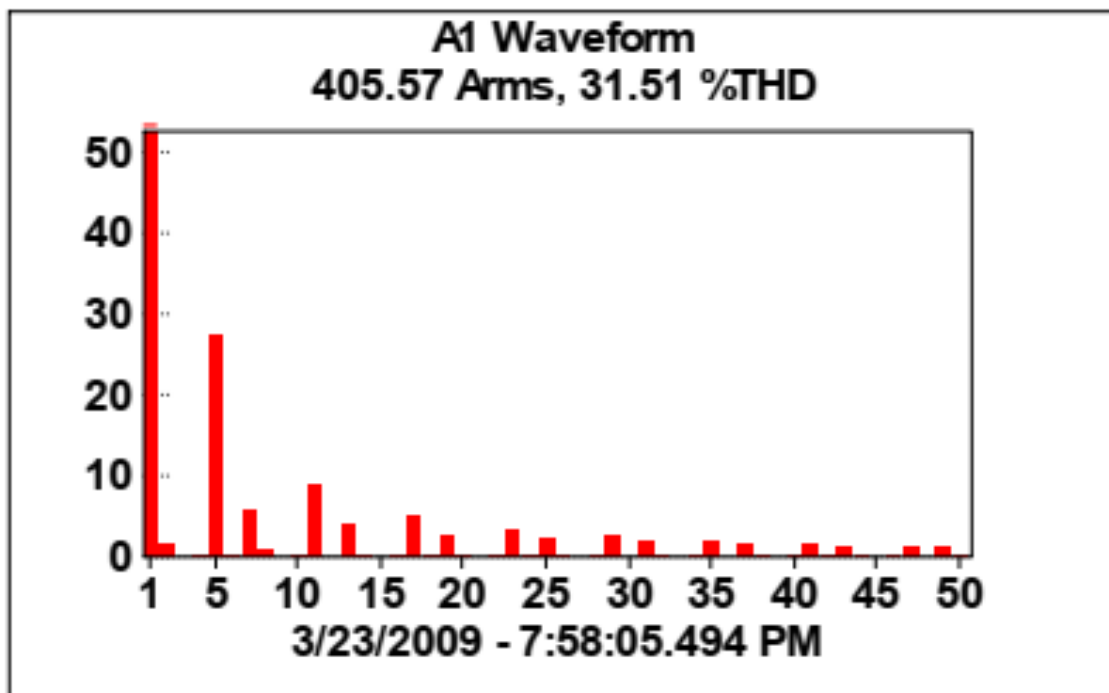


Рисунок 1.10 – Тиристорний SCR випрямляч з лінійним реактором. Типовий спектр гармонік струму (%)

За відносно високих рівнів швидкості/високого крутного моменту привід постійного струму SCR призведе до дещо менших спотворень напруги, ніж частотний перетворювач змінного струму з аналогічним навантаженням у кВт. Однак, зі зменшенням швидкості приводу постійного струму SCR та підтримкою високого крутного моменту, результуюче спотворення напруги (і комутаційні імпульси) значно зростатимуть через те, що кут керування SCR-пристроями поступово збільшується.

На виробничих платформах частотні перетворювачі використовуються для насосів, компресорів та інших завдань. Значна кількість електрофільтрів-занурювальних насосів (тобто електричних занурювальних насосів) використовує багатопульсні перетворювачі частоти (наприклад, 12-, 18- або 24- пульсні), які використовують кілька 6-пульсних випрямлячів та фазозсувні трансформатори.

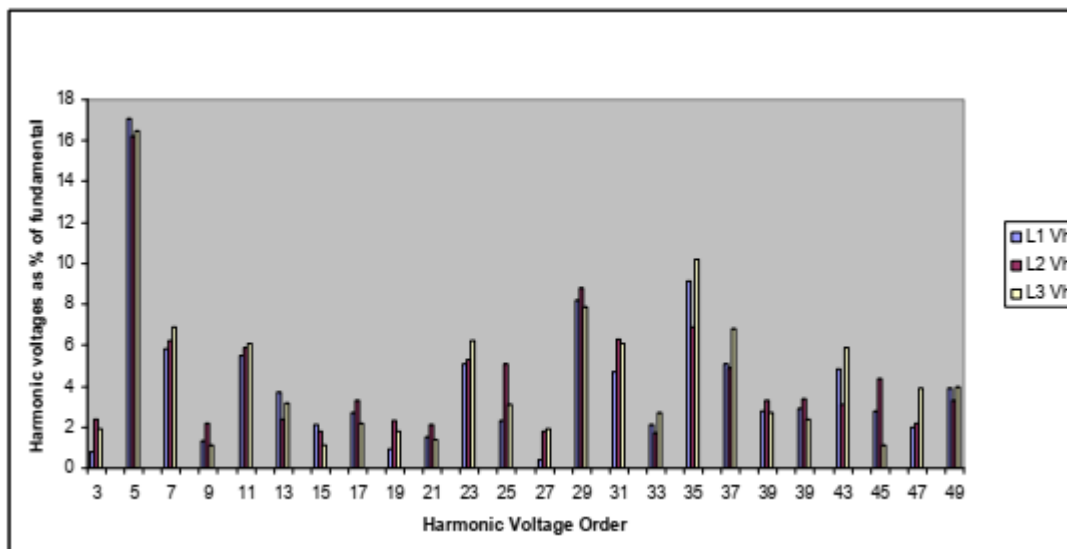


Рисунок 1.11 – Спектр гармонік напруги морської нафтової платформи, виміряний на буровому комплексі 690

На рис. 1.11 показано U_{thd} (загальне гармонічне спотворення напруги), миттєво отримане на буровому комплексі 690 В з буровим комплексом постійного струмового тиристора (DC SCR). Середнє значення U_{thd} становило 25,61%, з яких 19,3% становили >21-ї гармоніки, головним чином через велику кількість 24-імпульсних частотних перетворювачів для занурювальних насосів, підключених до джерел живлення середньої напруги. Рекомендована межа гармонік напруги для установки становила 5%. Гармоніки вищого порядку є більш серйозними через ефект нагрівання від вищої частоти на ампер.

Слід зазначити, що стандартні низьковольтні (LV) вибухобезпечні двигуни з фіксованою швидкістю за стандартом IEC (Міжнародний електротехнічний комітет – встановлює стандарти для електрообладнання за межами Північної Америки) мають лише 2% фоновому U_{thd} , згідно з розділом 6 IEC EN 60034-1 та (IEC EN 60034-12 для типу N, 3% U_{thd}); UL або NEMA наразі не мають подібних обмежень.

Також викликає значне занепокоєння те, що цей приклад не є поодиноким. Провідний професор якості електроенергії Університету США, який також є світовим авторитетом у цій галузі, нещодавно оцінив, що спектр частоти напруги на рис. 1.11 скорочує термін служби двигуна приблизно на 34%.

Однак існують значно більші занепокоєння щодо рівня загального спотворення напруги, як показано на рис. 1.11, та впливу на вибухозахищені двигуни, а також, поки що, невідомого ефекту нагрівання через гармоніки напруги вищого порядку на роторах з подвійною кліткою або глибоким пазом, таких як ті, що використовуються в компресорах, що призводить до ризику займання у разі витоку газу або пари.

1.3. Способи зменшення гармонічних спотворень

1.3.1. Багатопульсні приводи

Історично багатопульсні приводи, зокрема 12-імпульсні приводи, змінного та постійного струму, використовуються для зменшення гармонічних струмів і, таким чином, зменшення спотворень напруги. Вони включають ряд 6-пульсних (тобто трифазних випрямлячів) та фазозсувних трансформаторів. Пульсність (наприклад, 18) визначає теоретично характерні гармоніки. Для 18-пульсної конфігурації характерні гармоніки вхідного струму становитимуть $18 \pm 1 = 17, 19, 35, 37, 47, 49$. На рис. 12 зображено спрощену схему 18-пульсного перетворювача частоти (ПЧ).

Багатопульсні приводи за ідеальних умов можуть забезпечувати хороший рівень ефективності. Однак навіть помірний рівень фонових спотворень напруги ($<5\% U_{thd}$) у поєднанні з будь-якими дисбалансами у випрямлячах, обмотках трансформатора та напрузі живлення серйозно погіршує ефективність. Крім того, багатопульсні приводи, як правило, занадто великі (через трансформатори фазозсуву) та громіздкі. Через суворіші обмеження на спотворення напруги, 12-пульсні версії втратили свою популярність. 18- та 24-пульсні частотні перетворювачі все ще популярні для низьковольтних (НВ) та середньовольтних (СВ) електрозанурювальних насосів (ЕЗН), незважаючи на зазначені недоліки.

					171.4321.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

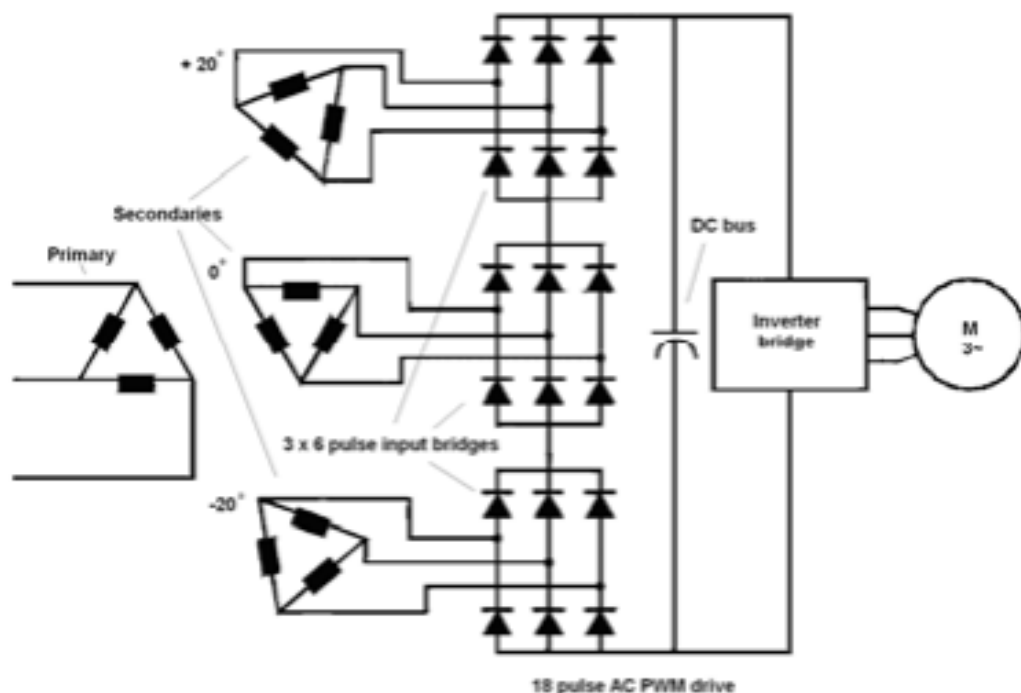


Рисунок 1.12 – Типовий 18-імпульсний ПЧ змінного струму з фазозсувним трансформатором

1.3.2. Пасивні широкодіапазонні фільтри

За останні 5-6 років пасивний «широкодіапазонний фільтр» набув популярності в буровому та морському секторах.

Ці міцні та ефективні пристрої складаються з тісно пов'язаного триланкового реактора, намотаного на спільному осердді, та невеликої конденсаторної батареї (рис. 13). Фільтр з'єднаний послідовно з навантаженням(и) приводу (рис. 14). Ці пристрої були використані як для ЧРП змінного струму (тип D), так і для приводів постійного струму (тип T), з потужністю до 3500 к.с./2650 кВт і зараз розробляються для ЧРП середньої напруги (CH). На рис. 15 показано 2 широкодіапазонні фільтри типу D (AC) потужністю 2300 к.с./1800 кВт під час випробувань на відповідність ABS в Об'єднаних Арабських Еміратах. Ці установки були підключені до загальної системи шини постійного струму AC VF для трьох бурових насосів. Uthd було знижено до рівня нижче 5%, щоб відповідати вимогам.

					171.4321.KP.ПЗ.P1	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		30

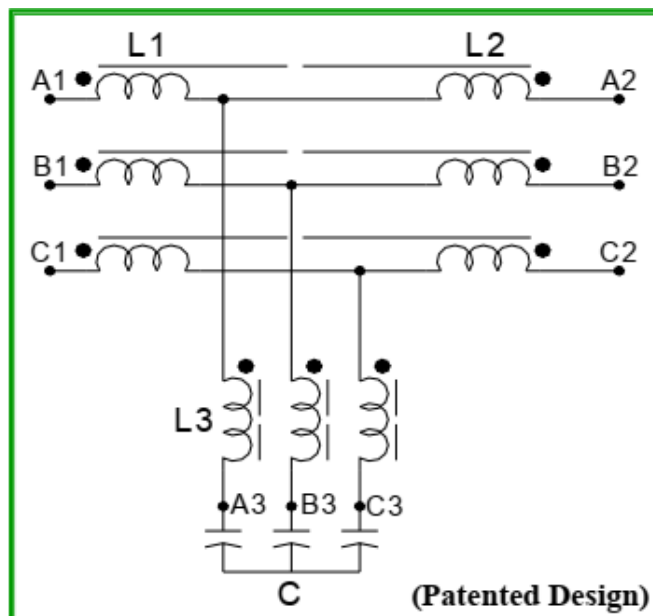


Рисунок 1.13 – Схема вдосконаленого широкодіапазонного фільтра

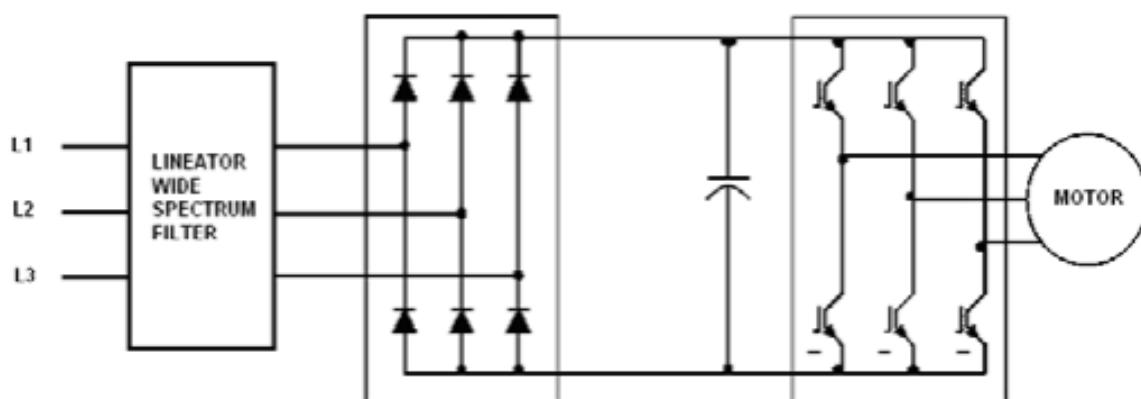


Рисунок 1.14 – Підключення вдосконаленого широкодіапазонного фільтра до ПЧ

Через подібний фільтр також може бути підключена група приводів змінного або постійного струму.

На рис. 1.15 і рис. 1.16 показані спектри гармонік вхідного струму одного й того ж тиристорного приводу постійного струму, але підключеного до мережі безпосередньо (рис. 1.15) та через широкодіапазонний фільтр типу Т (рис. 1.16), який зменшив I_{thd} з 81% до 5,83% I_{thd} .

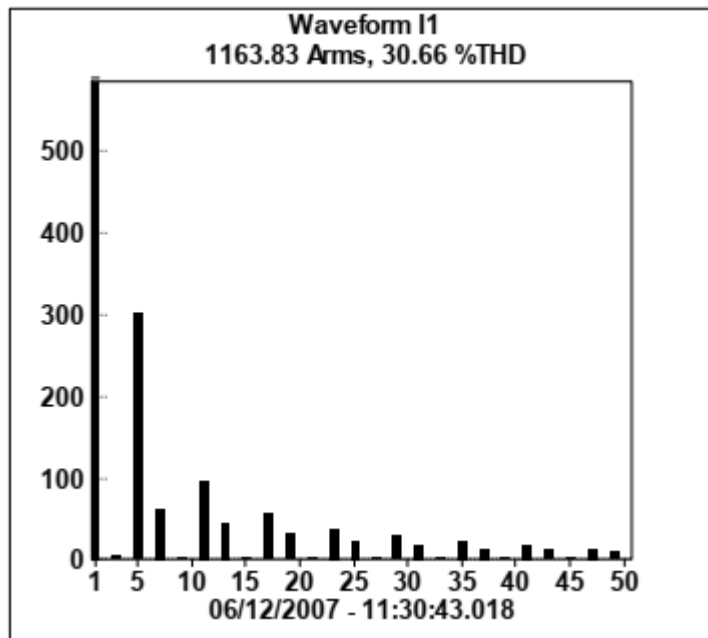


Рисунок 1.15 – Спектр гармонік струму приводу постійного струму SCR
потужністю 900 к.с./630 кВт. Без послаблення – 30,66% Ithd

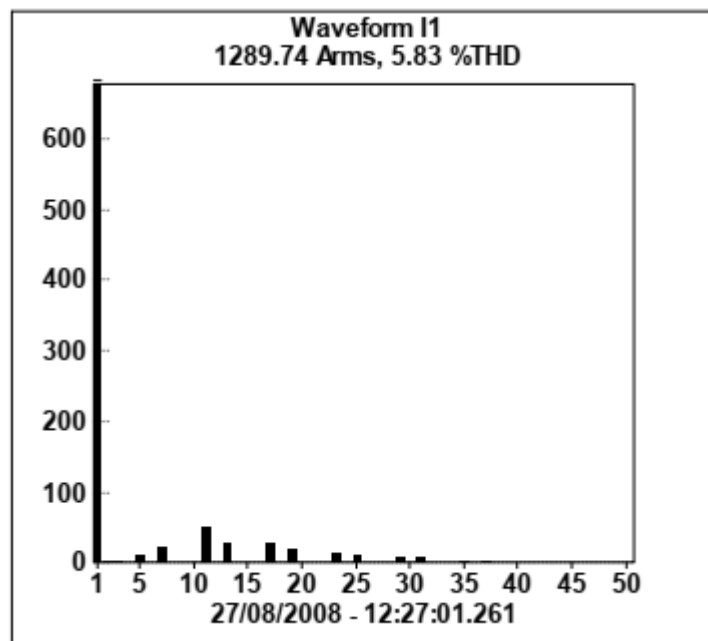


Рисунок 1.16 – Спектр гармонічного струму тиристорного приводу
постійного струму потужністю 900 к.с./630 кВт (I1) в AMPS.

З широкодіапазонним фільтром типу Т - 5,83% Ithd

Для буріння та морського використання високоякісні широкодіапазонні фільтри з дуже низькими значеннями ємності (кВАр) <15%) є важливими для забезпечення сумісності з генераторами за будь-яких умов навантаження.

1.3.3. Силові активні фільтри

Існує кілька типів силових електронних або «активних» фільтрів. Послідовний активний фільтр та паралельний активний фільтр показані на рис. 1.17 та рис. 1.18 відповідно.

Послідовні активні фільтри, які частіше асоціюються з частотними перетворювачами з «активним переднім з'єднанням» або «AFE», з'єднуються послідовно з нелінійним навантаженням і працюють, регулюючи струми в лінію, коригуючи гармоніки та коефіцієнт потужності зміщення (displacement power factor - DPF).

Вони часто тісно інтегровані з приводами двигунів, оскільки схема живлення ідентична вихідному мосту IGBT частотного перетворювача, а використані методи векторного керування ідентичні тим, що використовуються в частотних приводах двигунів. Послідовний AFE фільтр – це спеціальний тип активного фільтра, який здатний підвищувати внутрішню напругу шини постійного струму вище піку лінійної напруги мережі, що дозволяє йому мати унікальний контроль над лінійними струмами для значного зменшення струмів гармонік. Послідовний активний фільтр також може керувати потужністю в обох напрямках, дозволяючи рекуперовану енергію від приводу двигуна в багатьох застосуваннях повертати в мережу.

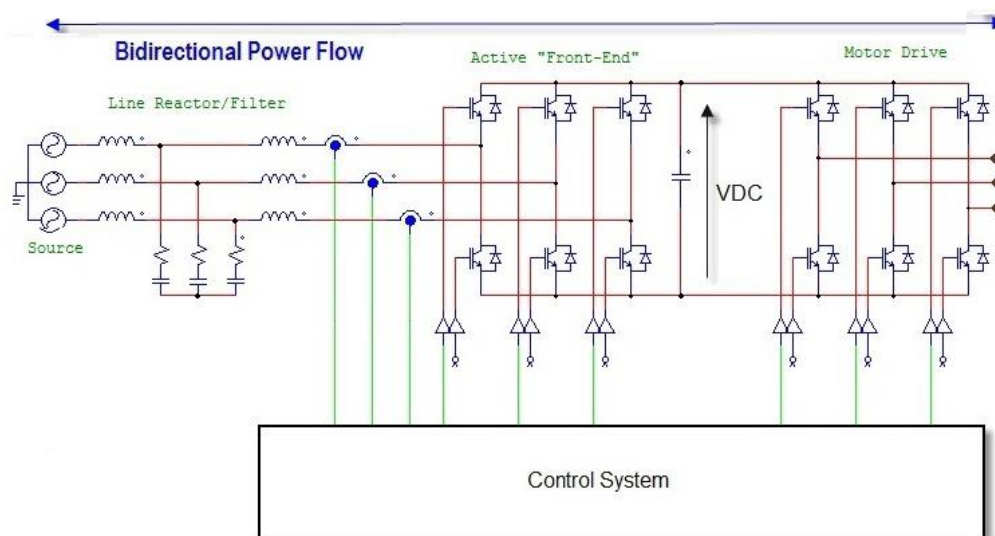


Рисунок 1.17 – Послідовний активний фільтр

Послідовний активний фільтр забезпечує зменшення гармонік на вході перетворювача частоти приводу змінного струму. Асинхронний двигун на рис. 1.17 не показано.

Паралельні активні фільтри (рис. 1.18) також подібні за технологією до перетворювачів частоти, але набагато менші (~на 60-70%), ніж послідовні активні фільтри, оскільки їм потрібно обробляти лише струми гармонік (не загальне середньоквадратичне значення струму), які зазвичай становлять близько 30-40% від повного середньоквадратичного значення струму джерела. У правильно розрахованій системі переважна більшість струмів гармонік відводиться активним фільтром (рис. 1.19), а від генератора або трансформатора відводиться лише струм основної частоти. Паралельні активні фільтри також одночасно подають реактивну потужність і можуть підтримувати високий рівень коефіцієнта потужності зміщення (DPF) системи за будь-яких умов навантаження; це важливо на установках з тиристорними приводами постійного струму (SCR), які мають низький DPF під час роботи з високим крутним моментом та низькою швидкістю.

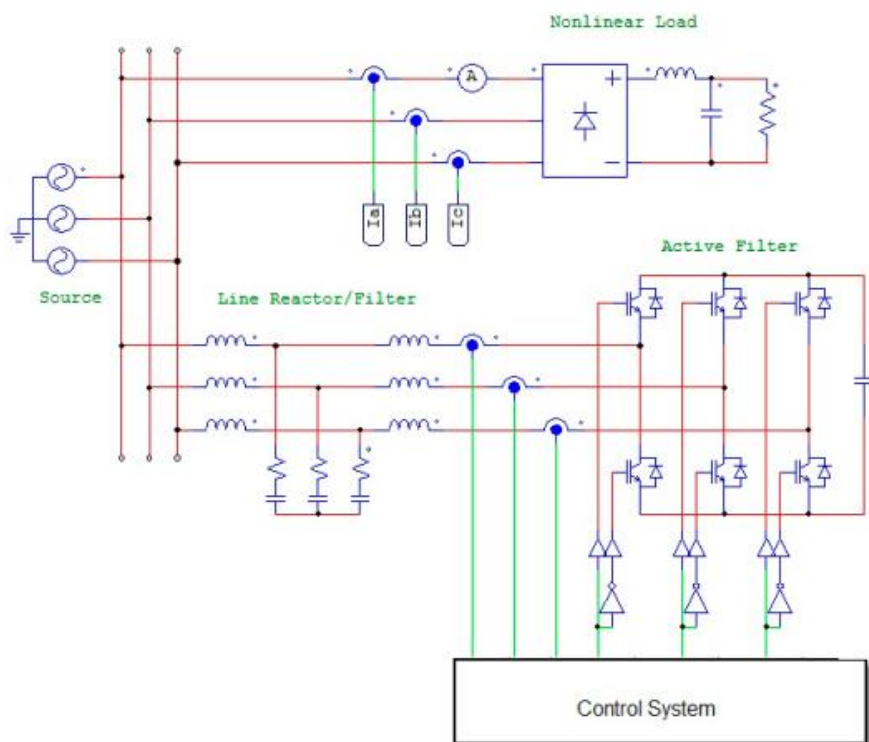
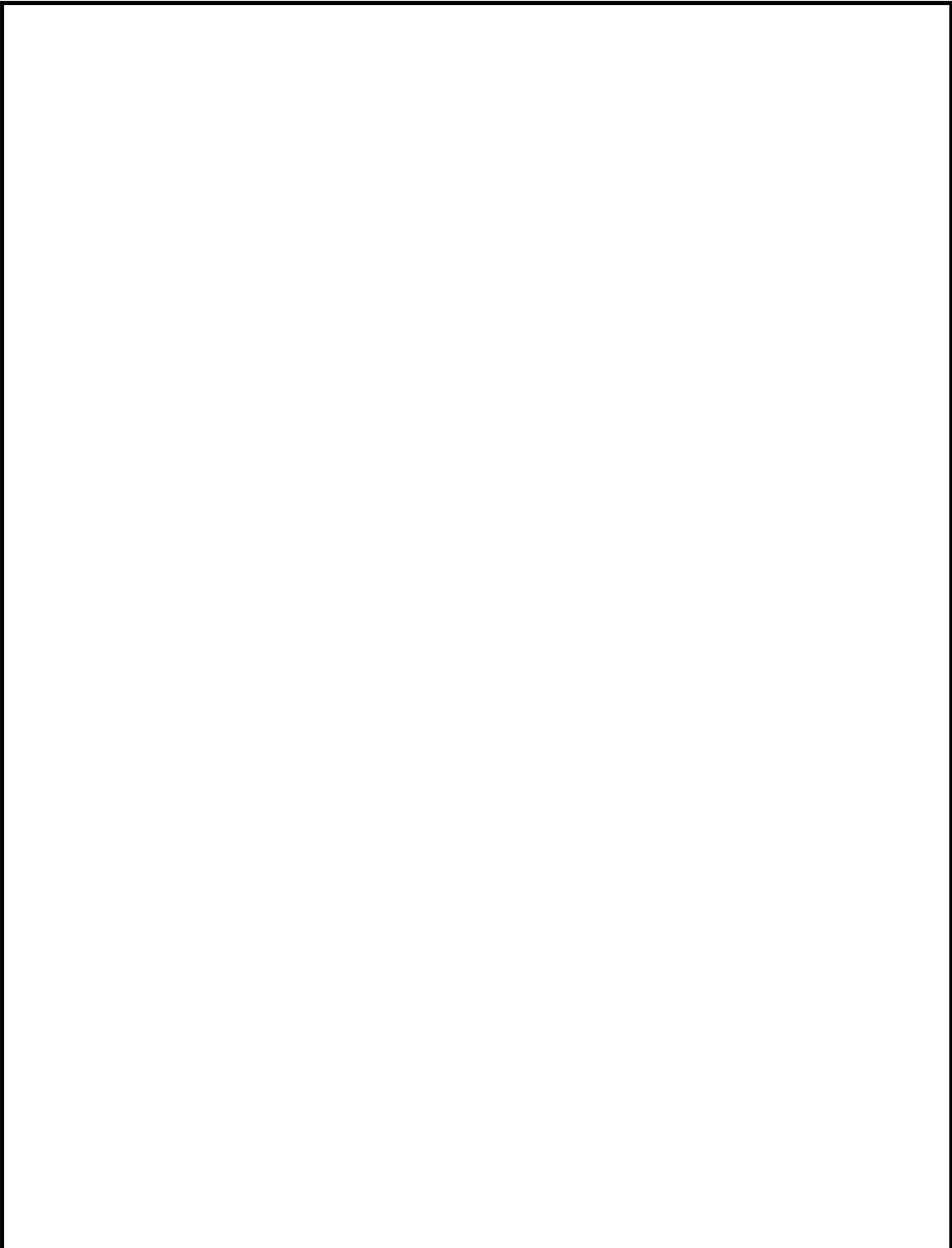


Рисунок 1.18 – Схема та підключення паралельного активного фільтра



					171.4321.КР.ПЗ.Р2			
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробник		Савицький М.С.			ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ В СИСТЕМАХ З ШІМ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ЧАСТОТИ	Літ.	Арк.	Аркуші
Консультант							35	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Жук О. К.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 2. ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ В СИСТЕМАХ З ШІМ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ЧАСТОТИ

2.1. Високочастотні гармоніки

Прийнятний рівень якості електроенергії є абсолютно необхідним для функціональності, експлуатаційної цілісності та безпеки кожного морського судна, модуля плавучої установки та установки, незалежно від класу. Будь-яка відмова або несправність обладнання, включаючи електричну рушійну установку або навігаційні системи, може призвести до аварії в морі або поблизу берега з катастрофічними наслідками.

Високочастотні гармоніки – всупереч більшості міжнародних стандартів та можливостям стандартних аналізаторів якості електроенергії, гармоніки напруги та струму не припиняються на 50-му порядку (2,5 кГц при частоті мережі 50 Гц). Хоча ці гармоніки вищого порядку зазвичай залишаються неврахованими, їхні наслідки – ні!

Наразі готується новий удосконалений міжнародний стандарт на «супергармоніки» (від 2,5 кГц до 150 кГц), який буде впроваджено в морській галузі. В ньому буде враховано результуючий вплив на випромінювання та стійкість обладнання та питання правозастосування.

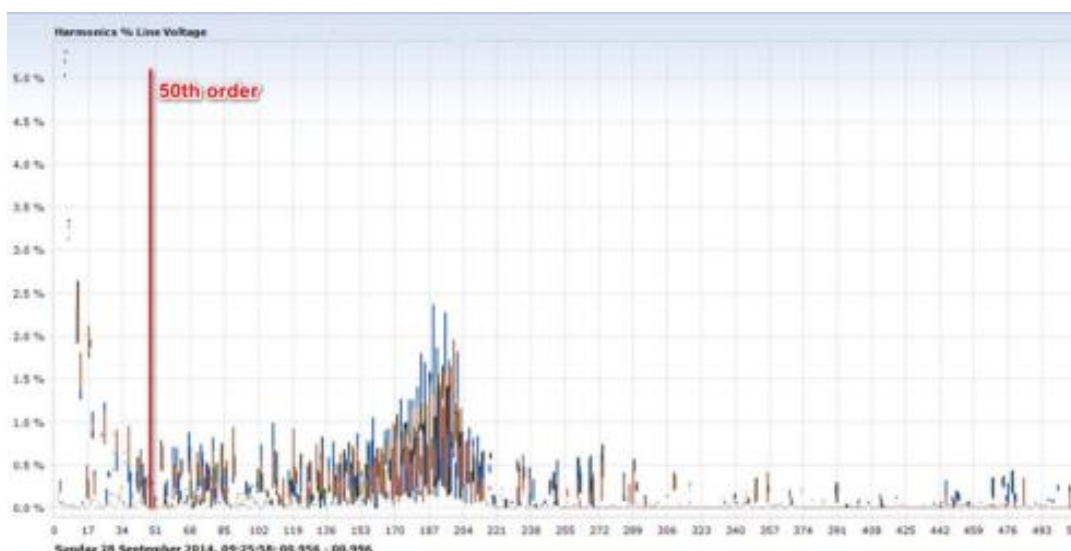


Рисунок 2.1 – Спектр повного гармонічного спотворення напруги (U_{thd}) від частотно-регульованого приводу (ЧРП) потужністю 560 кВт

					171.4321.KP.ПЗ.P2	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		36

Uthd 26,3% (ліміт 5%) було зафіксовано на 600 В, 19,3% Uthd з яких було >21-го порядку ($> 1,26$ кГц) через кілька 24-імпульсних частотно-регульованих приводів (ЧРП) на 11 кВ. Спектральні дані були досліджені РТВ, Німеччина (РТВ, Germany), щоб визначити вплив на вибухобезпечні двигуни EExd з фіксованою швидкістю на борту. Для двигунів, «критичних до статора», додаткове підвищення температури на 24 градуси Цельсія було оцінено на основі гармонік напруги >21-го порядку. Для машин з «критичною характеристикою ротора» на подібних джерелах живлення, зокрема, за концепціями захисту EExe, EExd та ExN, гарячі ротори, що знаходяться значно вище температурного класу, та пов'язаний з ними вплив можуть становити ризик для безпеки. РТВ не змогла змодельовати або розрахувати додатковий вплив нагрівання на машини з критичною характеристикою ротора. Вибухозахищені двигуни з фіксованою швидкістю – стандартні вибухозахищені двигуни змінного струму всіх концепцій захисту розроблені та сертифіковані на основі чистого синусоїдального живлення. Вони втрачають цю сертифікацію, якщо Uthd >0% – «вони більше не працюють в умовах, передбачених під час сертифікації». Стандарт ІЕС 60034-1 (електричні машини) містить вимоги щодо «коефіцієнта гармонійної напруги» HVF. Однак ІЕС-60079-1 (обладнання для вибухонебезпечних зон) наразі не має жодних вимог до HVF щодо температурних випробувань або сертифікації вибухозахищених двигунів з фіксованою швидкістю. Це не обов'язково означає, що вони небезпечні, хоча за певних умов вони можуть бути (наприклад, високочастотні гармоніки в подачі живлення), але просто хтось інший, а не сертифікуючий орган, повинен нести відповідальність за їхню безпеку.

Багато суден, включаючи круїзні лайнери, використовують електричні рушійні установки, або з прямим приводом, або з азимутальним приводом, включаючи синхронні приводи, зазвичай з використанням фазосувних трансформаторів для зменшення результуючого гармонійного спотворення

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

напруги (U_{thd}). Більшість морських класифікаційних товариств обмежують загальне U_{thd}, зазвичай максимум до 8%.

В останні роки до складу як головних рушійних приводів, а також приводів для загального застосування входять перетворювачі частоти з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Хоча вони не мають проблем із затримкою струму та реактивною потужністю, у них є інші проблеми, що викликають занепокоєння. У ПЧ з активним переднім фронтом (AFE) звичайні 6-пульсні випрямлячі попереднього заряду на діодах/SCR замінюються активними випрямлячами на IGBT. Всупереч тому, що можуть стверджувати деякі постачальники, AFE все ще мають значні проблеми, які необхідно подолати.

Підвищені електромагнітні перешкоди (включаючи синфазну напругу/струм), неконтрольоване введення реактивної потужності при нульовому, малому та переривчастому навантаженні, якщо працює кілька приводів AFE, що призводить до нестабільного коефіцієнта потужності зміщення, струмів гармонік вище 50-ї, низької продуктивності та найнижчої загальної ефективності всіх типів частотно-регульованих перетворювачів/варіантів зменшення впливу – все це проблеми, які рідко вимірюються або розглядаються згідно з правилами.

Незалежно від того, чи є вхідний випрямляч ШІМ перетворювача 6-пульсним діодним або AFE, струм, що подається на двигун, є синтезованою синусоїдою. Вихідна напруга є модульованою прямокутною хвилею (рис. 2.2). Це є джерелом більшості проблем, пов'язаних з використанням ШІМ перетворювача.

					171.4321.KP.ПЗ.P2	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

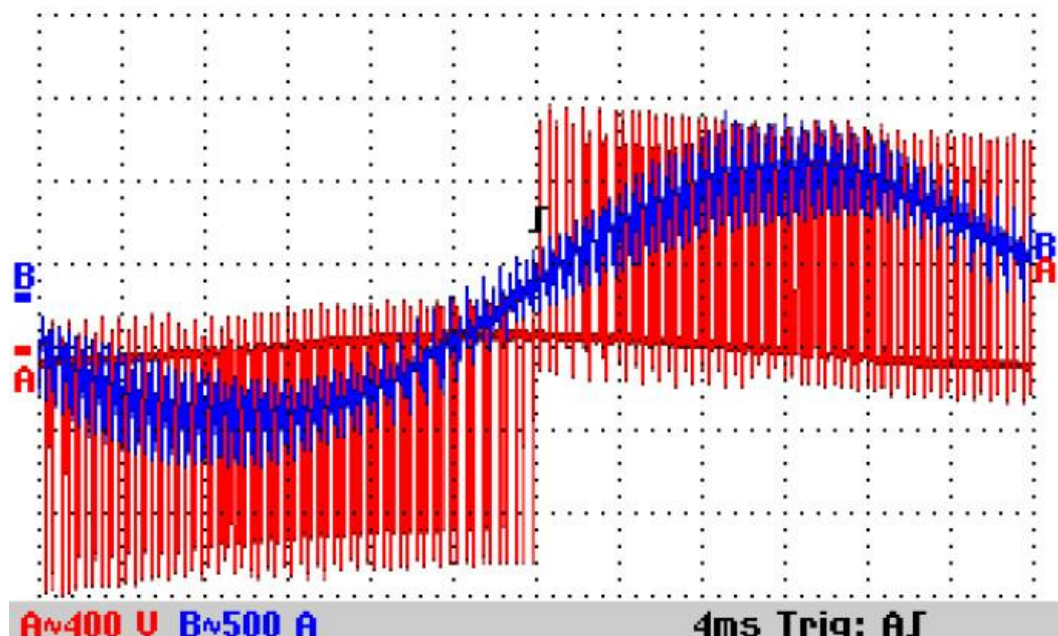


Рисунок 2.2 – Вихідна напруга двигуна являє собою модульовану (тобто зрізану) прямокутну хвилю

Гармонічне спотворення напруги (U_{thd}) через ШІМ-частотні перетворювачі може вимагати встановлення засобів зменшення, як і для будь-якого електроприводу, але існують три окремі, але взаємопов'язані проблеми, які продовжують впливати на ЧРП:

- 1) Надмірне du/dt (швидкість наростання напруги), яке може пошкодити ізоляцію двигуна, особливо під час модернізації та енергозберігаючих застосувань. Нещодавно на різних круїзних та інших суднах траплялися випадки перегорання кількох двигунів.
- 2) Стоячі хвилі (резонанс кабелю) через велику довжину кабелю ($>30-50$ м). Проте синусоїдні вихідні фільтри, якщо їх встановити, можуть запобігти цьому явищу.
- 3) Найскладнішим аспектом ЧРП, про який рідко згадують постачальники, є «синфазна напруга» через ШІМ перемикання вихідної напруги.

2.2. Синфазні режими

Синфазна напруга виникає між кожною фазою та землею. Якщо комбінація частотно-регульованого приводу та двигуна не встановлена у суворій відповідності до рекомендацій щодо електромагнітної сумісності (ЕМС), частота комутації (1–10 кГц) накладається на напругу між фазою та землею. Це може вплинути на кожен елемент обладнання, підключеного до землі (тобто корпусу). Синфазна напруга (CMV) є причиною , постійних відмов ШІМ-рушійних приводів (через їхню власну CMV), а також негативно впливали навігаційні, контрольні, кранові системи та системи пожежогасіння та виявлення газу.

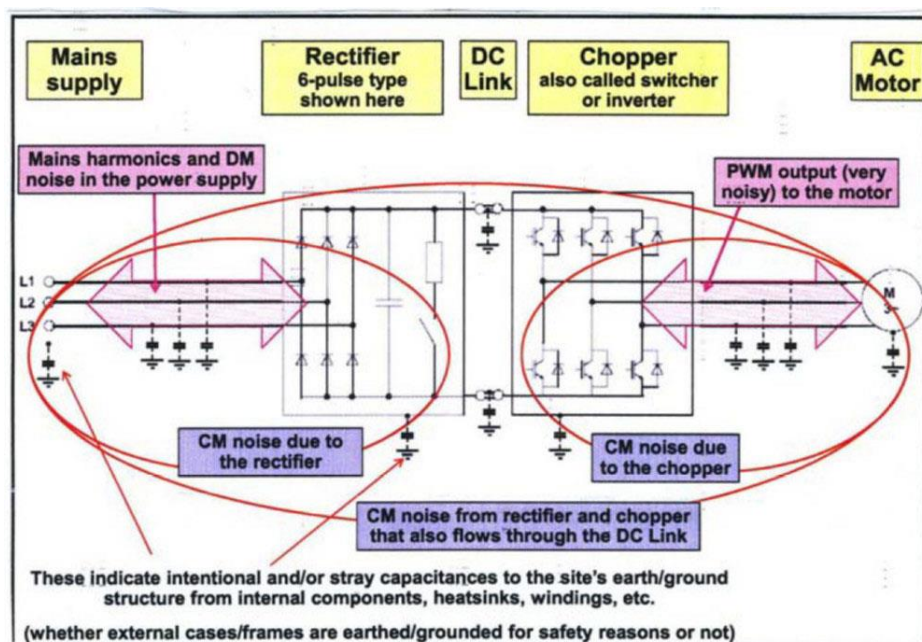


Рисунок 2.3 – Кілька шляхів для синфазної напруги (CMV) у частотно-регульованих приводах

«Синфазна напруга» сама по собі не є проблемою. Однак, щойно в системі виникає будь-яка ємність до землі, починають протікати зворотні шумові струми до землі ICM, як показано на рисунку 2.3. Прикладами такої ємності є: I) блукаюча ємність у кабелях; II) ємність від шасі двигуна до обмотки; III) ємність від кола живлення до шасі.

Зауважте, що синфазні струми в II) часто можуть знаходити свої зворотні шляхи через підшипники двигуна.

CMV може бути дуже руйнівним та шкідливим, але офіційно не визнано морськими органами. Більші «багаторівневі» частотно-регульовані приводи, ймовірно, не мають проблем із CMV. Поточні проблеми з шістьма есмінцями типу 45, «першими у світі електричними військовими кораблями», кожен з яких має 40 МВт багаторівневих головних рушійних установок з ШІМ-частотною модуляцією (ЧМП), що мають до чотирьох разів більшу за ліміт U_{thd} за стандартом НАТО (5%), а також циркулюючу навколо корпусів змінну напругу (КМП) у кВ, свідчать про протилежне.

CMV має супутній синфазний струм. Він поширюється на землю від ЧМП через підшипники двигуна, поступово руйнуючи їх через мікродуги струму на частоті перемикання ЧМП. Підшипники двигуна з фіксованою швидкістю в середовищі, багатому на КМП, викликають серйозне занепокоєння. Відомо про кілька суден одного класу, де підшипники двигуна EExd (вогнестійкі) служать < 3-4 місяців через КМП від багаторівневих головних рушійних установок з ШІМ-модульною модуляцією потужністю >40 МВт. Високочастотні мікродуги струму та пошкодження підшипників, що виникають у Зоні 1, викликають подвійне занепокоєння.

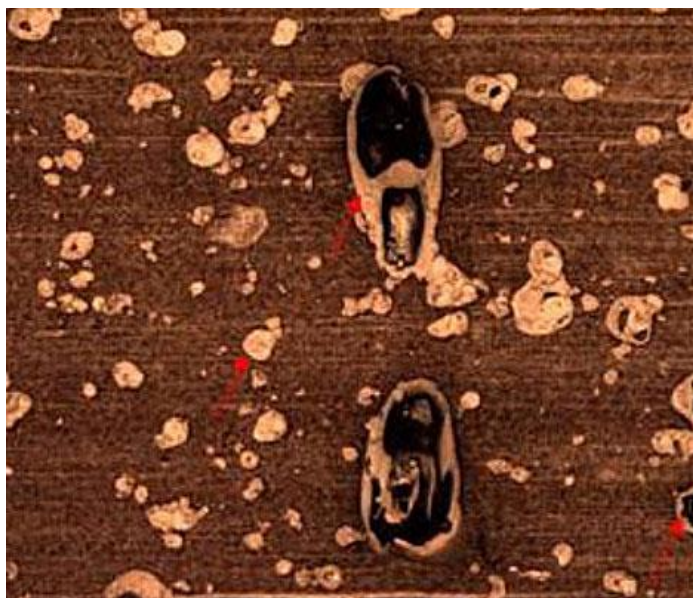


Рисунок 2.4 – Високочастотні мікродуги струму можуть призвести до пошкодження підшипника

					171.4321.KP.ПЗ.P2	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

2.3. Зниження синфазної напруги

Один із прикладів серйозної проблеми синфазного режиму проілюстровано на самопідйомній буровій установці з буровим комплексом, що містить як приводи постійного струму SCR, так і частотний перетворювач змінного струму. Червона лінія на рис. 2.5 позначає напругу фази 1 щодо землі, коли не призначені та не працюють частотні перетворювачі бурового комплексу.

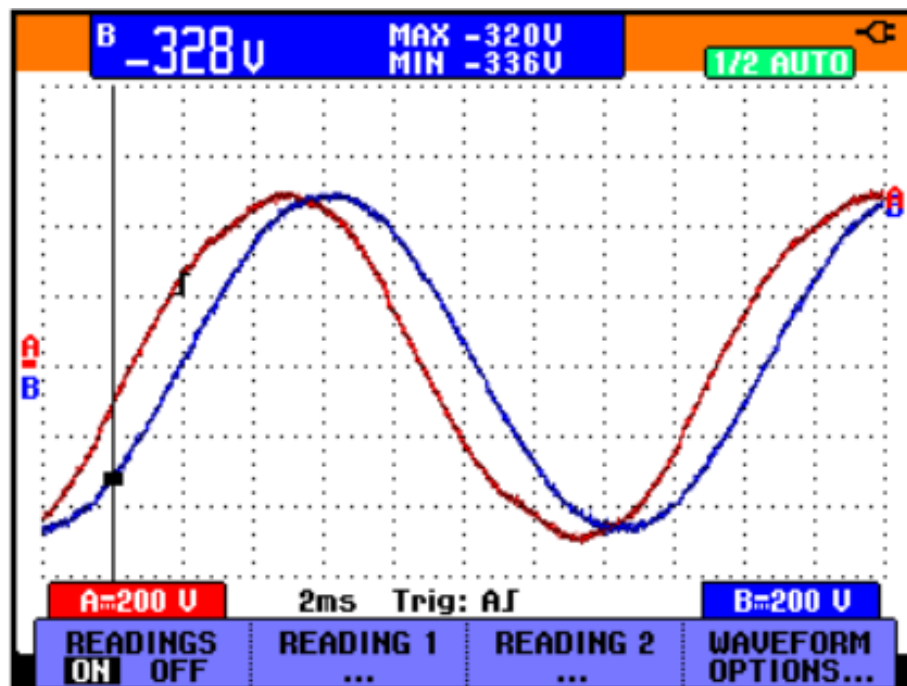


Рисунок 2.5 – Червона лінія позначає типову напругу фази V1 щодо землі, коли не призначені та не працюють частотні перетворювачі лебідки та/або верхнього приводу

На рис. 2.6 нижче червона лінія позначає напругу фази V1 щодо землі, коли будь-який з частотних перетворювачів бурового комплексу був призначений або працював. Наслідком цього стало те, що всі палубні крани стали небезпечними через синфазну напругу, яка збільшувалася з навантаженням частотного перетворювача, що перешкоджала електронним системам керування кранами. Бурову установку було знято з оренди на кілька тижнів, поки проблему не було вирішено; насправді крани були ізольовані від проблеми, яка все ще існує, але установка зараз бурить вже 18 місяців.

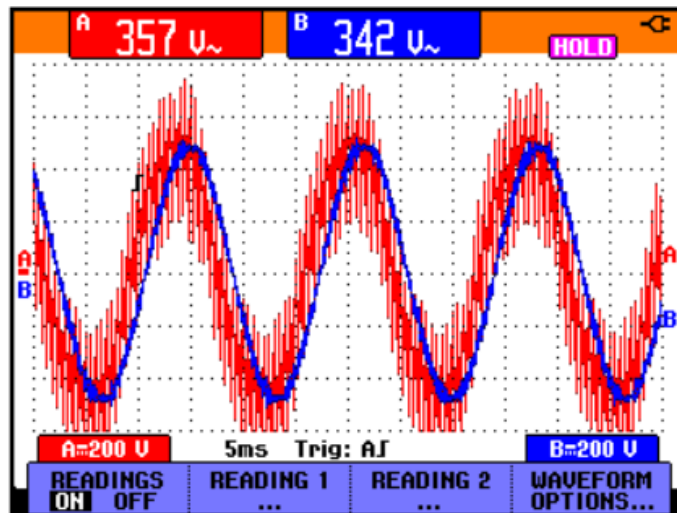


Рисунок 2.6. – Червона лінія позначає напругу фази V1 щодо землі, коли працюють лебідка та/або верхній привід

Під час вимірювань було встановлено джерело синфазної напруги, як видно зі спектру напруги, наведеного на рис. 2.7 нижче. Проблема синфазної напруги була пов'язана з несучою частотою IGBT частотно-регульованого перетворювача (1,9 кГц), що підтверджується 33-ю гармонікою, напругою >150 В щодо землі, що показано нижче. Менша (26 В) напруга 3-ї гармоніки була незагрозовою (незначною) та пов'язана з паралельно підключеними генераторами з різним кроком циркулюючого струму. Проблема посилювалася надзвичайно поганою установкою електромагнітної сумісності.

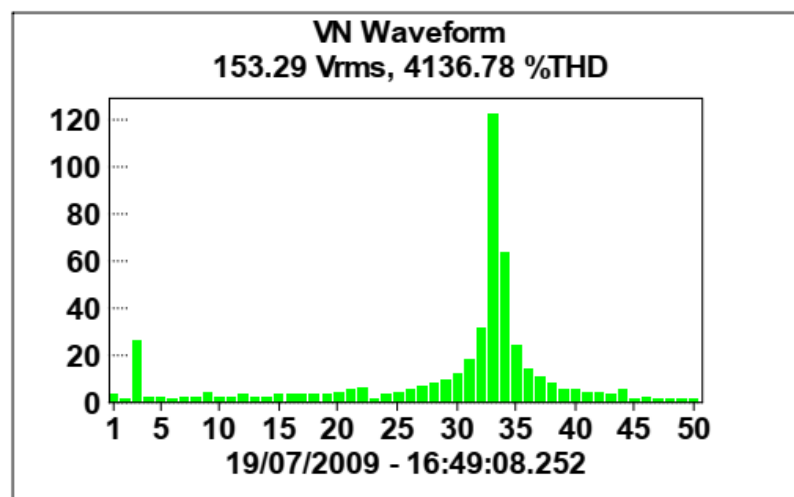
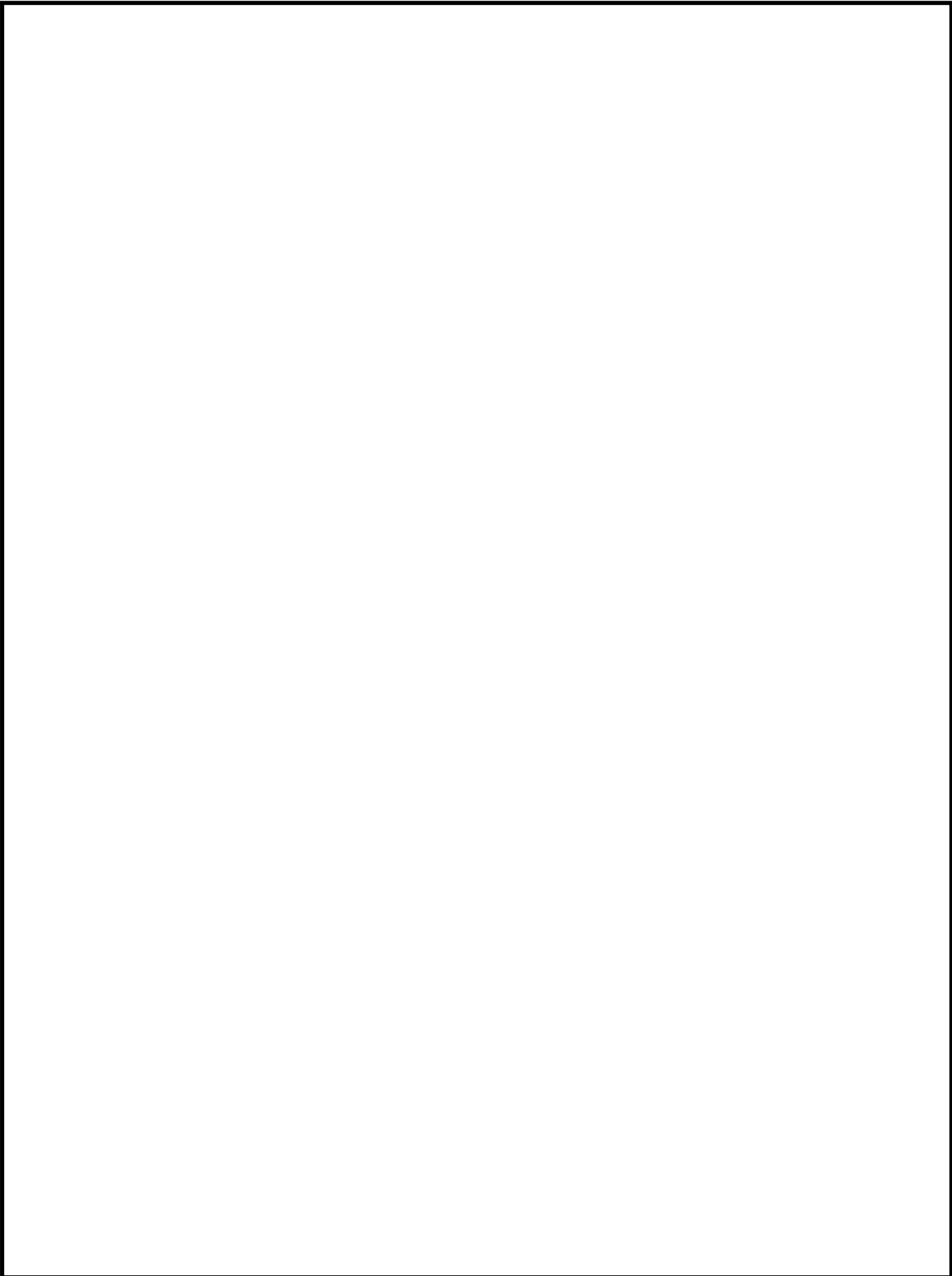


Рисунок 2.7 – Спектр гармонік (V) напруги фази V1 щодо землі, коли працюють частотно-регульовані перетворювачі лебідки або верхнього приводу

Звичайні фільтри ПЧ, що відповідають вимогам ЕМС (електромагнітна сумісність), які порушують шлях зворотного синфазного струму до приводу(ів), не можуть використовуватися в ІТ-мережах (тобто системах живлення з ізольованими нейтральми), оскільки конденсатори ЕМС повинні бути підключені до землі; будь-яке замикання на землю знищить фільтр ЕМС. Так звані «плаваючі фільтри ЕМС» можуть бути складними для безпечного застосування.

Більшість проблем із синфазною напругою частотно-регульованих перетворювачів можна мінімізувати, дотримуючись (точно) правильних методів встановлення ЕМС. Там, де це неможливо на місці (тобто приводне обладнання вже встановлено), доступні спеціальні фільтри синфазної напруги, які разом із можливими модифікаціями встановлення можуть значно послабити синфазну напругу.

					171.4321.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		



					171.4321.КР.ПЗ.РЗ			
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробник		Савицький М.С.			МОНІТОРИНГ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	Літ.	Арк.	Аркуші
Консультант							45	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Жук О. К.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 3. МОНІТОРИНГ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

3.1. Аналізатори та реєстратори показників якості електроенергії

Нещодавно IACS запровадила нову вимогу (UR E24) для суден з електричною рушійною установкою щодо моніторингу та реєстрації рівнів гармонійних спотворень напруги в системі електропостачання судна. Мета полягає в тому, щоб забезпечити раннє виявлення зносу конденсаторів та інших компонентів як пасивних, так і активних фільтрів гармонік, встановлених на цих суднах. Обґрунтування постійного моніторингу якості електроенергії зрозуміле. Окрім задоволення поточних та майбутніх нормативних вимог щодо рівнів гармонічних спотворень напруги, постійний моніторинг може гарантувати своєчасне виявлення будь-яких ознак погіршення якості електроенергії та вжиття заходів для вирішення проблем, перш ніж обладнання постраждає, що призведе до перебоїв, відмови обладнання або ще гірших наслідків. Будь-які «події», що призводять, наприклад, до повного відключення електроенергії, фіксуються та використовуються для сприяння будь-яким розслідуванням причини.

У відповідності до зазначених вимог світовий лідер в галузі контролю якості електроенергії та електромагнітних перешкод в морських ЕЕС – компанія Harmonic Solutions Marine – пропонує два варіанти аналізаторів та реєстраторів ПЯЕ, наприклад, пристроїв типу PQGuard, які забезпечують постійний моніторинг гармонік та інших показників якості електроенергії.

PQGuard 605 – звичайний тип аналізатора потужності та PQ, що монтується на панель або розподільний щит, який вимірює до 63-ї гармоніки. Застосування включає моніторинг якості живлення (PQ) одного або кількох блоків на розподільних щитах, генераторах та значних нелінійних навантаженнях. Здійснює одночасне періодичне вмірювання:

- Напруги (лінійні та фазні)
- Загальне гармонічне спотворення напруги, включаючи Uthd (лінійні напруги) та Vthd (фазні напруги) до 63-го порядку

					171.4321.KP.ПЗ.РЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		46

- Струми (А)
- Спотворення струму (Ithd)
- Частота (Гц)
- Енергія – кВт, кВА, кВАр
- Коефіцієнт потужності зміщення (DPF) та коефіцієнт істинної потужності (TRF)
- Гармонічні напруги та струми (таблиці та спектри гармонік до 63-го порядку)
- Флікер (Pst)
- Температура (якщо підключено РТ 100)



Рисунок 3.1 – Аналізатори гармонік PQGuard 605 для монтажу на панель/розподільний щит

PQGuard, як локальна/віддалена система моніторингу якості електроенергії, має потужні функції:

- Повний набір записів трендів з відтворенням дати/часу. PQGuard 605 забезпечує збільшення відображення параметрів для полегшення аналізу. Параметри запису трендів оновлюються щосекунди. Точність базується на частоті дискретизації.

- Регульований запис подій (наприклад, «відключення ВКР 1») з двома циклами до та після події з відтворенням. Можна встановити граничні значення кожного параметра PQ та за потреби ініціювати тривогу. На деяких більш удосконалених моніторах можна надсилати електронні листи на запрограмовані адреси, щоб повідомити про настання події.

- Реєстрація форм хвиль напруги та струму для усунення несправностей або моніторингу. PQGuard може забезпечити збільшення форм хвиль та спектрів для полегшення аналізу в реальному часі.

- Реєстрація спектрів гармонік напруги та струму в точці підключення до 63-ї гармоніки. PQGuard дозволяє збільшувати форму хвилі для цілей аналізу.

Якщо встановлено додаткові входи/виходи, можна контролювати автоматичні вимикачі та інше захисне обладнання.

Повна система, включаючи промислові комп'ютери та сервери, доступна від Harmonic Solutions Marine.



Рисунок 3.2 – Система моніторингу якості електроенергії (PQ) з PQGuard 605, встановленими по одному на кожен генератор

					171.4321.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

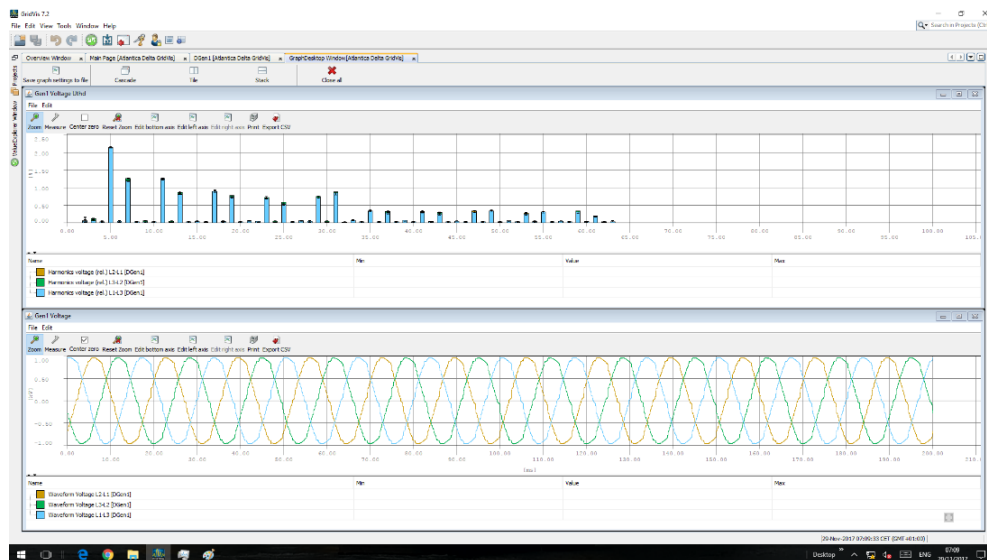


Рисунок 3.3 – Подвійне відображення спектру гармонік напруги та форм сигналів лінійної напруги

До розподільного щита судна, щоб задовольнити вимоги морських класифікаційних товариств згідно з IACS (UR E24) щодо безперервного моніторингу PQ, можна підключити один PQGuard 605.

Може бути застосована додаткова інтернет-система для віддаленого моніторингу якості в головному офісі на відстані 12000 км.

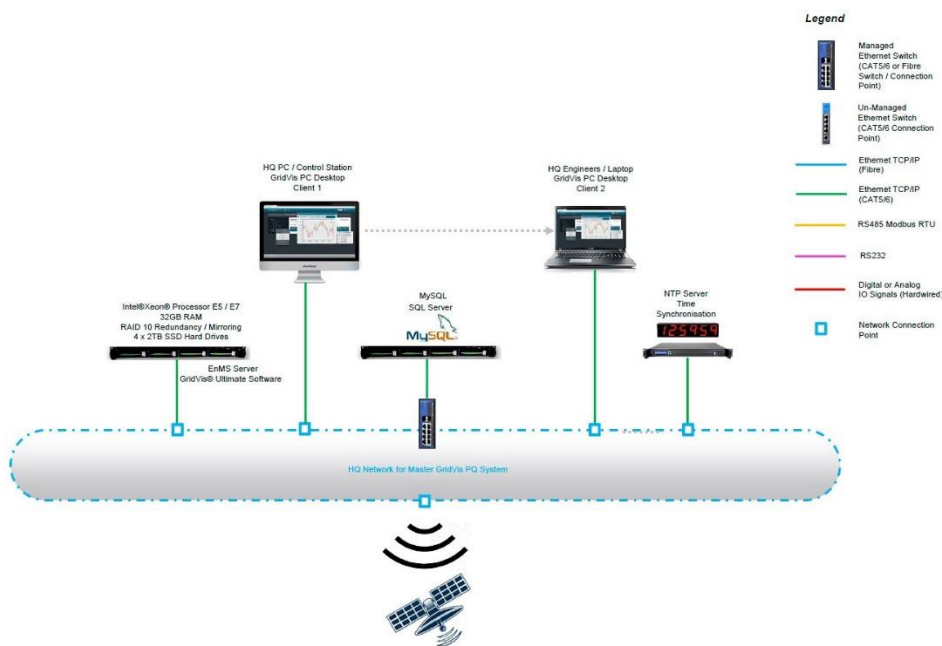


Рисунок 3.4 – Дистанційний моніторинг

PQGuard 4430, зображений на рис.3.4 — це вдосконалений «циклічний» реєстратор (не аналізатор) якості електроенергії, який у поєднанні зі спеціалізованим програмним забезпеченням для аналізу якості електроенергії забезпечує безперечно найкращу у світі систему моніторингу гармонік, якості електроенергії та подій.

Реєстратор PQGuard 4430 може обробляти сигнали струму до 5А на фазу від звичайного трансформатора струму або через гнучкі котушки Роговського.

Повна система, включаючи промислові комп'ютери та сервери, доступна від Harmonic Solutions Marine.

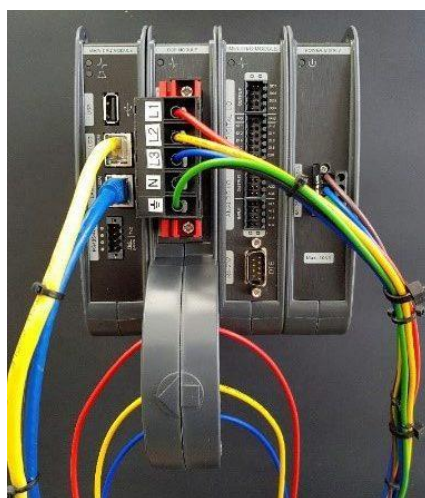


Рисунок 3.4 – Реєстратор PQGuard 4430 з встановленим модулем ввводів/виводів

За допомогою PQGuard 4430 можна контролювати роботу, надійність та температуру генераторів, трансформаторів, автоматичних вимикачів та критично важливого обладнання.

PQGuard 4430 вибірково контролює 1024 точки за цикл і безперервно записує кожен цикл протягом одного року. За допомогою PQGuard 4430 легко перейти від записів місяців до подій мілісекунд або мікросекунд за допомогою миші. Кожен цикл напруги та струму записується, а також майже 10 000 параметрів ПЯЕ. Гармоніки напруги визначаються до 512-го порядку, а гармоніки струму – до 258-го порядку.

					171.4321.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Додаткові характеристики PQGuard 4430:

Вибірка: 1024 точок/цикл

Гармоніки та інтергармоніки: до 512 -ї напруги та 258 -ї струму

Внутрішня пам'ять: 16 ГБ

Виявлення перехідних процесів: 19,5/16,3 мкс (50 Гц/60 Гц)

Порти Ethernet: 2

Час роботи під час втрати потужності: до 25 секунд

Канали напруги: 4 вимкнені плюс земля, 1000 В середньоквадратичне значення безперервно (8 кВ пік)

Стумові канали: до 5 вимкнених, до 5 А (піковий струм 50 А)

Основна частота: від 42,5 Гц до 69 Гц

Джерело живлення: 110-260 В змінного струму та 100-300 В постійного струму, допоміжне живлення 48 В постійного струму

Робоча температура навколишнього середовища: від -20° до 70°С

Виявлення перехідних процесів: 19,5/16,3 мкс (50 Гц/60 Гц)

Порти Ethernet: 2

Час роботи при втраті живлення: до 25 секунд

Канали напруги: 4 вимкнені плюс земля, 1000 В середньоквадратичне значення безперервно (8 кВ пік)

Стумові канали: до 5 вимкнених, до 5 А (піковий струм 50 А)

Основна частота: від 42,5 Гц до 69 Гц

Джерело живлення: 110-260 В змінного струму та 100-300 В постійного струму, допоміжне живлення 48 В постійного струму

Робоча температура навколишнього середовища: від -20° до 70°С

					171.4321.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

3.2. Моніторинг якості електроенергії

Який би тип системи PQGuard не був би встановлений на судні, Harmonic Solutions Marine може виконувати гарантійний контрактний моніторинг ПЯЕ, постійно контролюючи, аналізуючи та повідомляючи про гармоніки та якість електроенергії вашого судна, незалежно від того, чи це круїзний лайнер, чи допоміжне судно у відкритому морі.

Ця послуга також може включати детальні щорічні аудити якості електроенергії (PQ), якщо це можливо, включаючи системи нижче за струмом, де звичайний безперервний моніторинг PQ не застосовується.

Примітка: Гармоніки вище 50 -ї

Всупереч враженню, яке створюється в більшості стандартів і правил морських класифікаційних товариств, гармоніки не припиняються на 50 - му порядку. Дійсно, офіційно існує новий клас гармонік, який називається «супергармоніками», у діапазоні від 4 кГц до 150 кГц.

Обмеження для гармонік на 50-й гармоніці може бути зручним для дотримання правил і стандартів, але може поставити під загрозу безпеку та експлуатаційну цілісність судна, оскільки повна «картина гармонік та PQ» прихована під час використання звичайних аналізаторів гармонік та PQ, які вимірюють до 50-ї (або 63-ї) гармоніки.

На рис. 3.5 наведено спектр гармонік напруги, спричинений комбінацією потужних приводів постійного та змінного струму.

					171.4321.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		



Рисунок 3.5 – Гармонічний спектр лінійної напруги, спричинений поєднанням тиристорних перетворювачів постійного струму та частотних перетворювачів частоти змінного струму

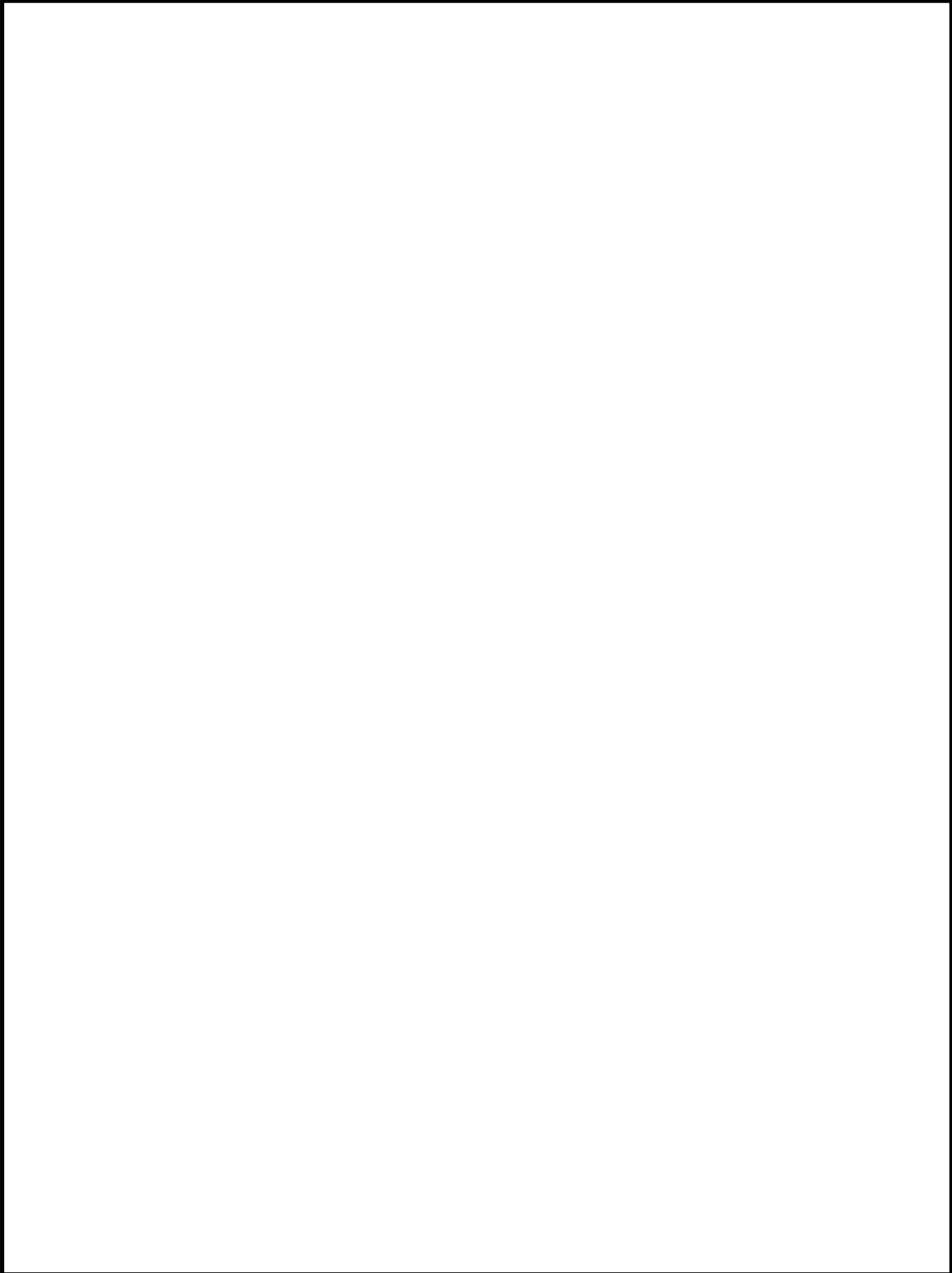
Межа 50-ї гармоніки виділена на осі. Спектрограма свідчить, що гармоніки лінійної напруги поширюються на 141-й порядок, але насправді існують три діапазони дискретного спектру гармонік:

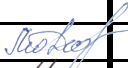
1. Низькочастотний діапазон спектру, приблизно до 25-го порядку, виникає через гармонічні струми, що споживаються з джерела живлення потужними приводами постійного струму.
2. Інший діапазон (від 33-го до 53-го порядку) зумовлений частотним перетворювачем потужністю 560 кВт, фізично не підключеним до енергосистеми (він мав власний генератор). Це синфазна напруга частотного перетворювача, що з'являється на системних шинах через заземлення (корпусне з'єднання).
3. Нарешті, високочастотні гармоніки напруги (з 57-ї по 104-ту), виникають внаслідок спотворюючих імпульсів, зумовлених тиристорними SCR випрямлячами.

З цього прикладу має бути очевидно, що будь-хто, хто намагається усунути проблеми з гармоніками, іншими показниками ЯЕ та ЕМС (тобто синфазними напругами), приймаючи до уваги гармоніки лише до 50-го порядку, може зазнати невдачі у своїх зусиллях.

Тому компанія Harmonic Solutions Marine користується найбільш досконалими сучасними аналізаторами-реєстраторами: PQGuard 4430 має можливість вимірювати до 512-ї гармоніки, а PQGuard 605 наразі вимірює гармоніки до 63-го порядку.

					171.4321.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		



					171.4321.КР.ПЗ.Р4			
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробник		Савицький М.С.			ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ШИРОКОДІАПАЗОННИХ СПЕКТРІВ НАПРУГИ І СТРУМУ ТА ЇХ СИМЕТРИЧНИХ І НЕСИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ	Літ.	Арк.	Аркуші
Консультант							55	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Жук О. К.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ШИРОКОДІАПАЗОННИХ СПЕКТРІВ НАПРУГИ І СТРУМУ ТА ЇХ СИМЕТРИЧНИХ І НЕСИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ НА ВХОДІ І ВИХОДІ АСИНХРОННОГО ЧРП

4.1. Навантажувальний стенд для дослідження частотнорегульованого асинхронного електропривода [1]

Розробка і створення навантажувального стенду з наступним проведенням експериментального дослідження електромагнітних процесів та якості електроенергії при роботі асинхронного електропривода з частотним керуванням є вузловим питанням моєї кваліфікаційної роботи.

Схема стенду представлена на рис.4.1.

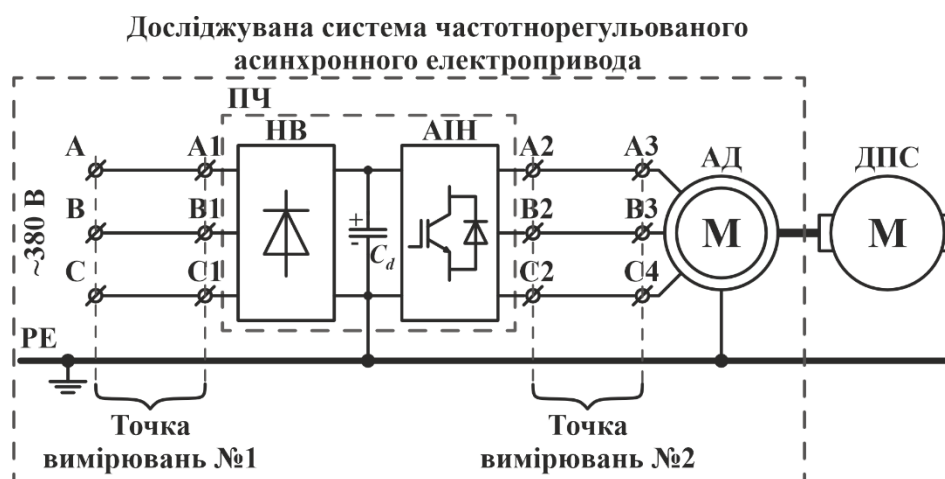


Рисунок 4.1 – Схема стенду для дослідження частотно-регульованого асинхронного електропривода

Стенд для дослідження частотнорегульованого асинхронного електропривода складається з лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) з номінальними параметрами: 15 кВА, 220/20÷400 В, $\cos\varphi=0.8$; перетворювача частоти Schneider ATV312 0,75 кВт, 2,4 кВА, 380...500 В; асинхронного двигуна 1,68 кВт, 380 В, 3,15 А, 2850 об/хв; на валу якого у якості змонтовано навантажувальний генератор постійного струму: 1 кВт, 115 В, 8.7 А. Дослідження проводилося при навантаженні 0,5 кВт.

Експеримент передбачає низку вимірювань з використанням аналізатора якості електроенергії МІ 2893, цифрового осцилографа з пам'яттю SDS 1102CML, трансформаторів струму ТТ1000 та дільника напруги.

Осцилограф SDS 1102CML підключений згідно схемам вимірювань на рис.4.2 а,б використовується для отримання:

- форм кривих фазної напруги U_A, U_B, U_C в точці вимірювань №1;
- форм кривих струму I_A, I_B, I_C в точці вимірювань №1;
- форм кривих фазної напруги U_A, U_B, U_C в точці вимірювань №2;
- форм кривих струму I_A, I_B, I_C в точці вимірювань №2;
- значення споживаних активної, реактивної, повної потужності та коефіцієнта потужності разом зі спектрами до 50-ї гармоніки і коефіцієнтом спотворень визначались аналізатором МІ 2893.

Масиви вимірюваних сигналів напруги і струму та їх симетричних і несиметричних складових, одержані через цифровий осцилограф, додаються. Відповідні отриманим сигналам амплітудні спектри гармонік та коефіцієнти гармонічних спотворень напруги і струму визначались шляхом обробки зазначених масивів через процедуру FFT в Power Guy Matlab.

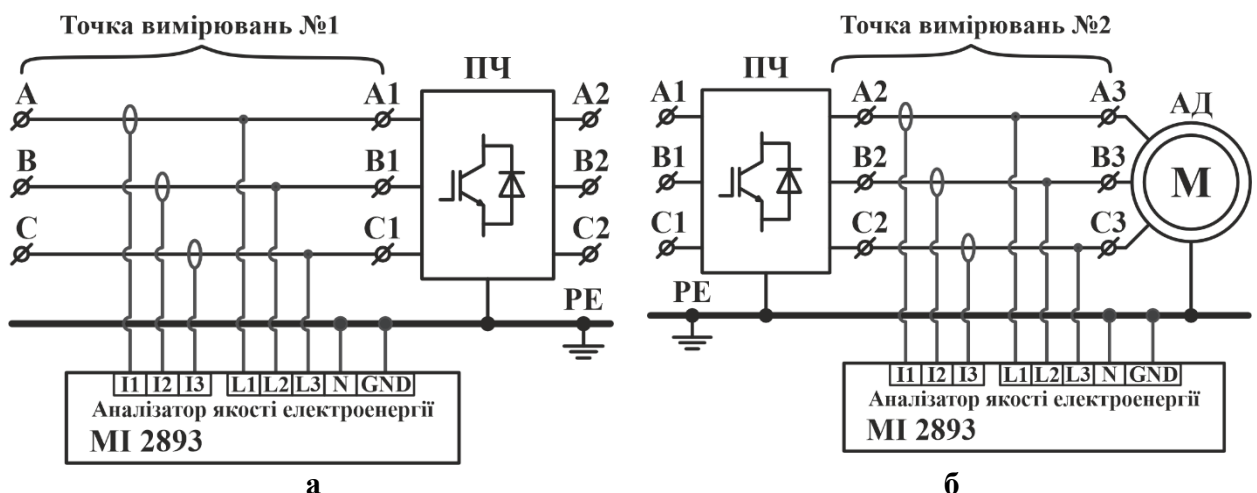


Рисунок 4.2 – Схема вимірювання напруги, струму та ПЯЕ за допомогою аналізатора МІ2893

Використовуючи осцилограф SDS 1102CML та трансформатори струму ТТ1000, що підключаються за схемою на рис.4.3 отримані:

- форми кривих фазного струму в точці вимірювання №1 за схемою вимірювання на рис. 4а;
- форми кривих фазного струму в точці вимірювання №2 за схемою вимірювання на рис. 4б;
- форми кривих несиметричної складової струму в точці вимірювання №1 за схемою вимірювання на рис. 5а;
- форми кривих несиметричної складової струму в точці вимірювання №2 за схемою вимірювання на рис. 5б;
- форми кривих симетричної складової струму в точці вимірювання №1 за схемою вимірювання на рис. 6а;
- форми кривих симетричної складової струму в точці вимірювання №2 за схемою вимірювання на рис. 6б.

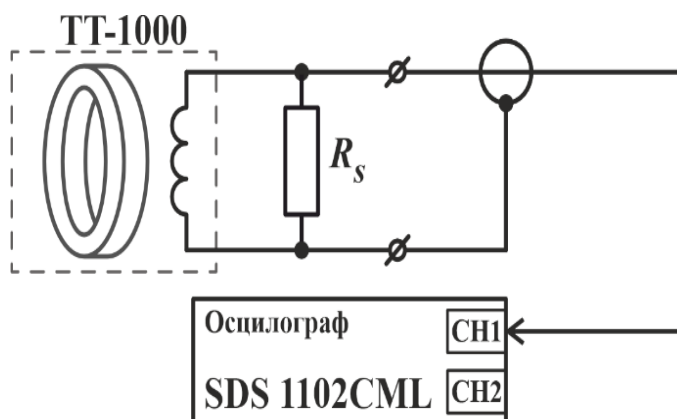


Рисунок 4.3 – Схема під'єднання трансформатора струму до осцилографа

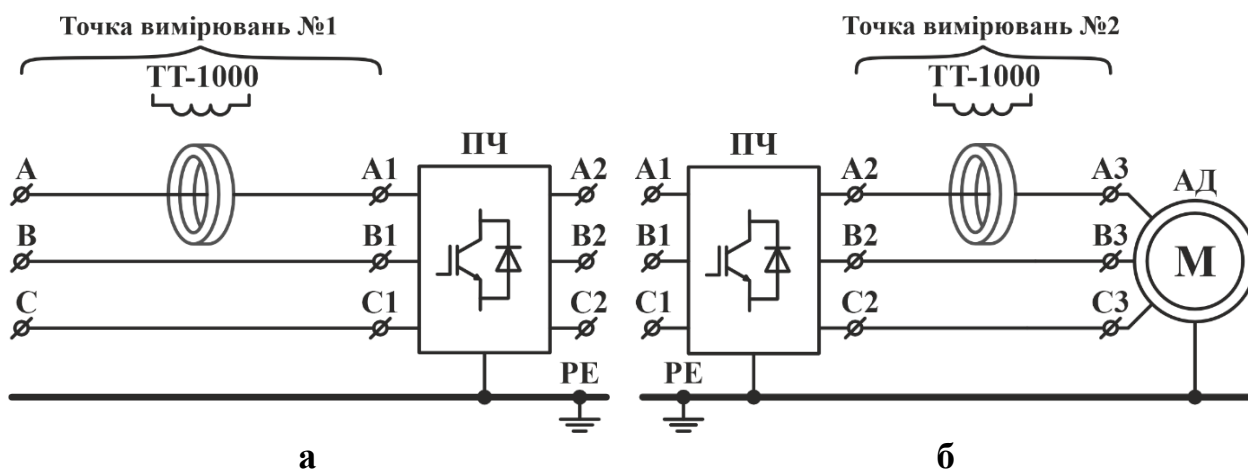


Рисунок 4.4 – Вимірювання фазного струму

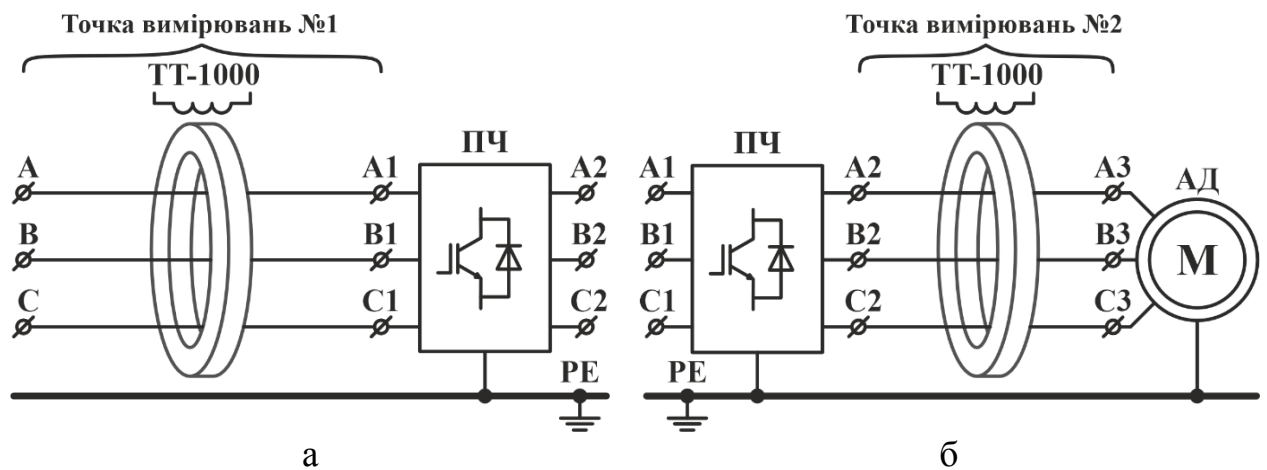


Рисунок 4.5 – Вимірювання несиметричної складової струму

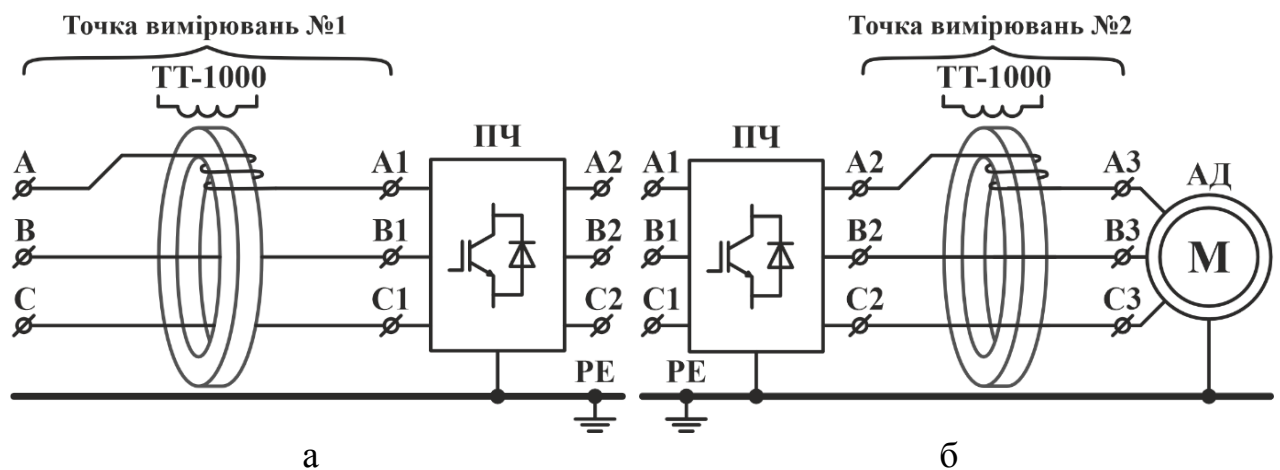


Рисунок 4.6 – Вимірювання симетричної складової струму

Використовуючи осцилограф SDS 1102CML та дільник напруги, що підключаються за схемами на рис.4.7 отримаємо:

- форми кривих несиметричної складової напруги в точці вимірювання №1 за схемою вимірювання на рис. 4.7а;
- форми кривих несиметричної складової напруги в точці вимірювання №2 за схемою вимірювання на рис.4.7б.

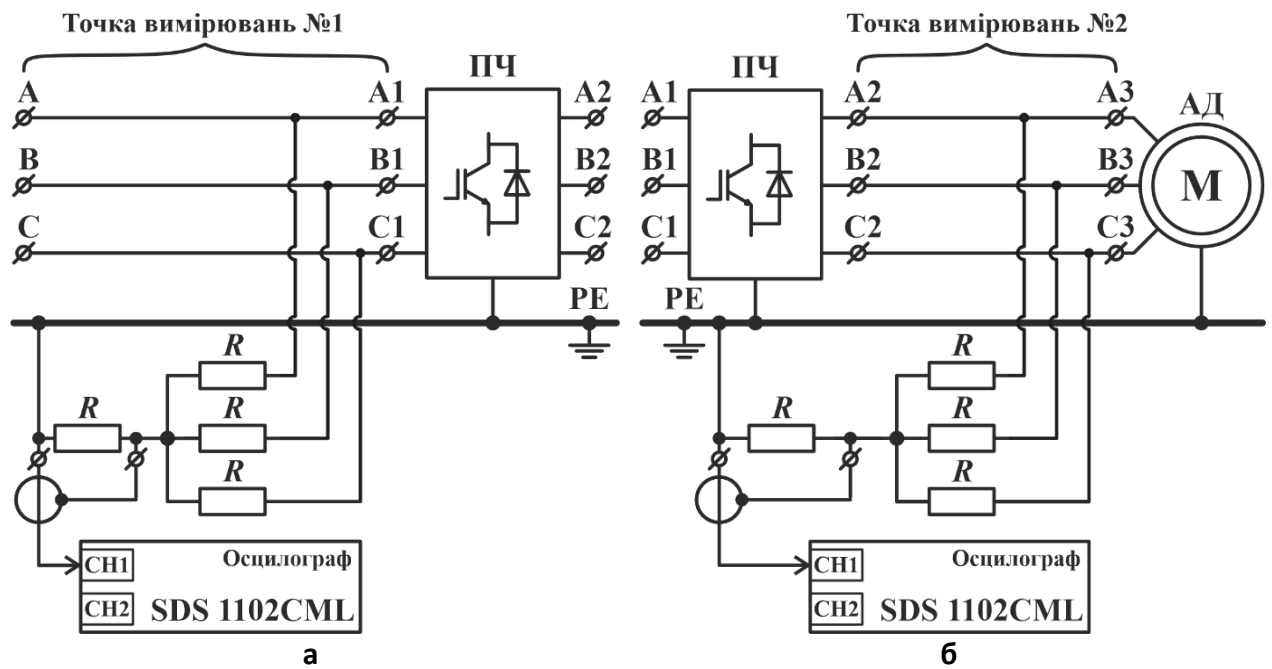
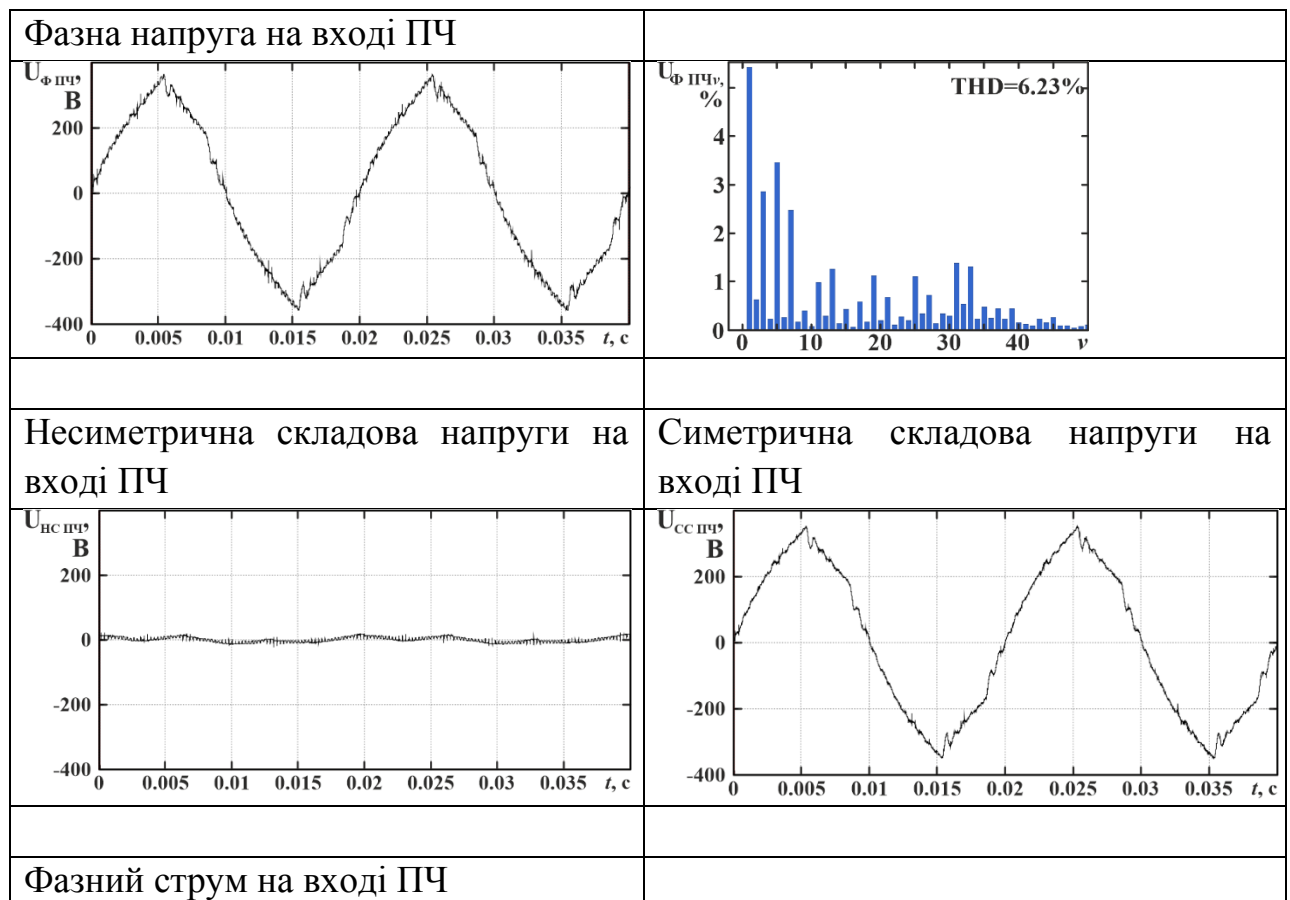
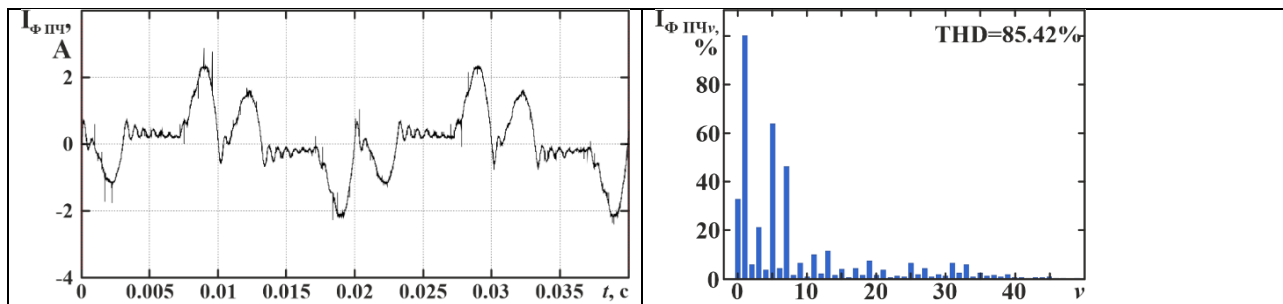


Рисунок 4.7 – Вимірювання несиметричної складової напруги

4.2. Дослідження спектрів та їх складових напруги і струму через стандартний аналізатор показників якості електроенергії [1]





Симетрична складова струму на вході ПЧ

Несиметрична складова струму на вході ПЧ

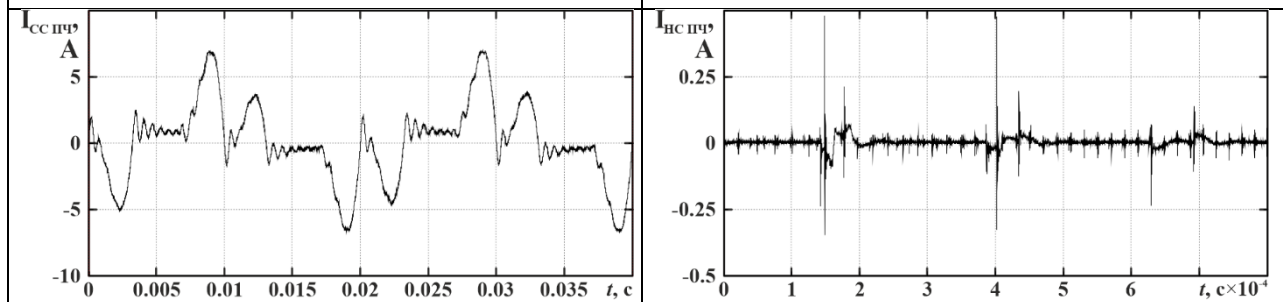
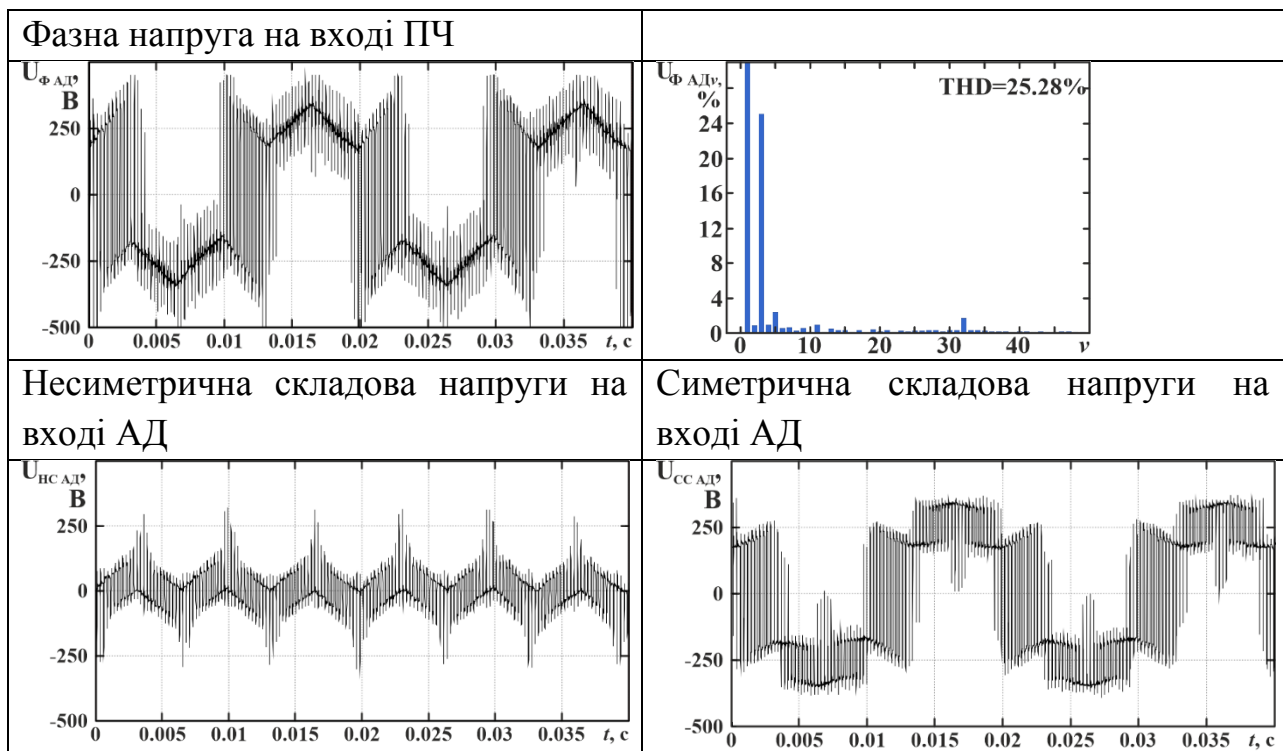


Рисунок 4.8 – Результати експериментальних вимірювань на вході ПЧ з номінальним навантаженням АД 0,5 кВт

Результати експериментальних вимірювань на вході АД з номінальним навантаженням 0,5 кВт. Форми симетричної складової напруги отриманні шляхом вилучення несиметричної складової із форми фазного струму.

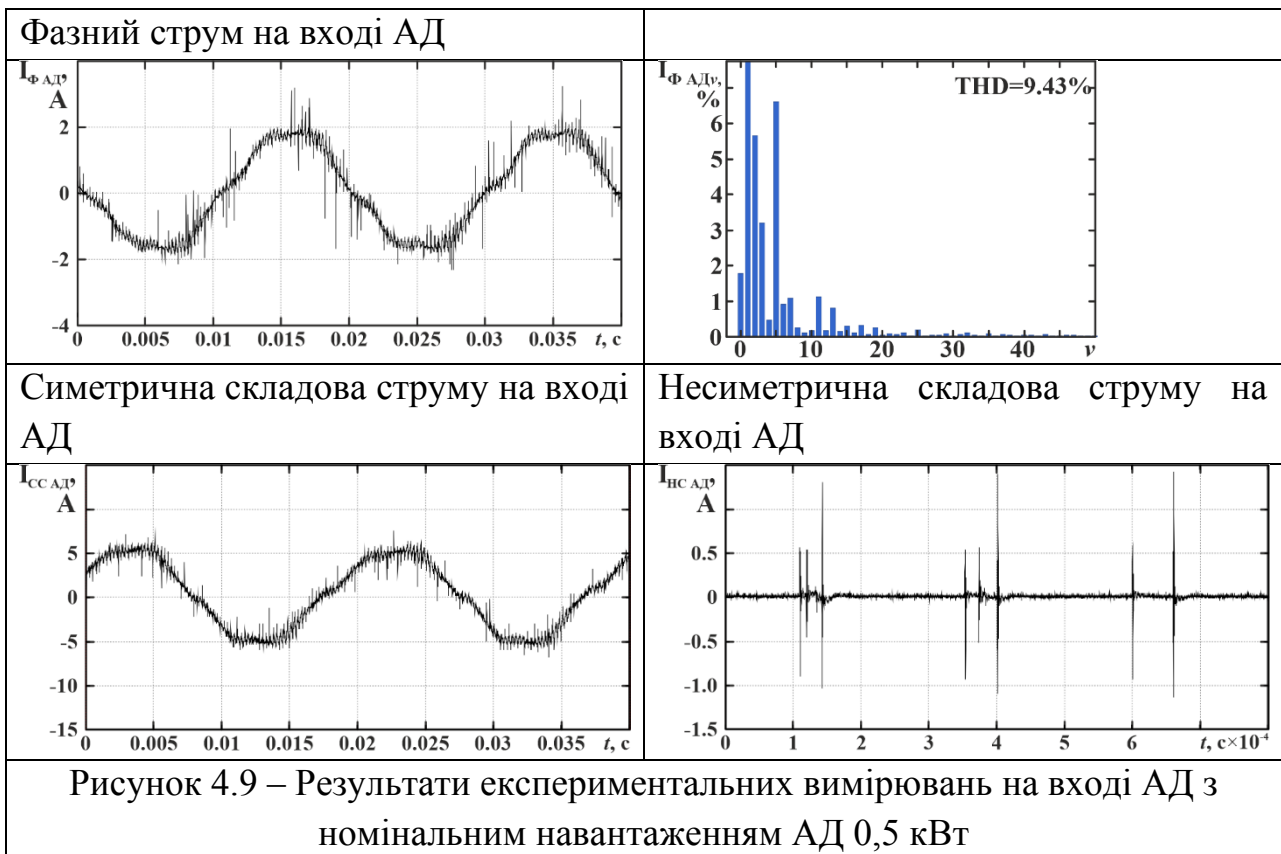


Фазна напруга на вході ПЧ

Симетрична складова напруги на вході АД

Несиметрична складова напруги на вході АД

Симетрична складова напруги на вході АД



4.3. Результати дослідження спектрів напруг і струмів та їх складових шляхом обробки масивів часових залежностей сигналів через цифровий осцилограф та блок FFT PowerGUI у MATLAB Simulink [1]

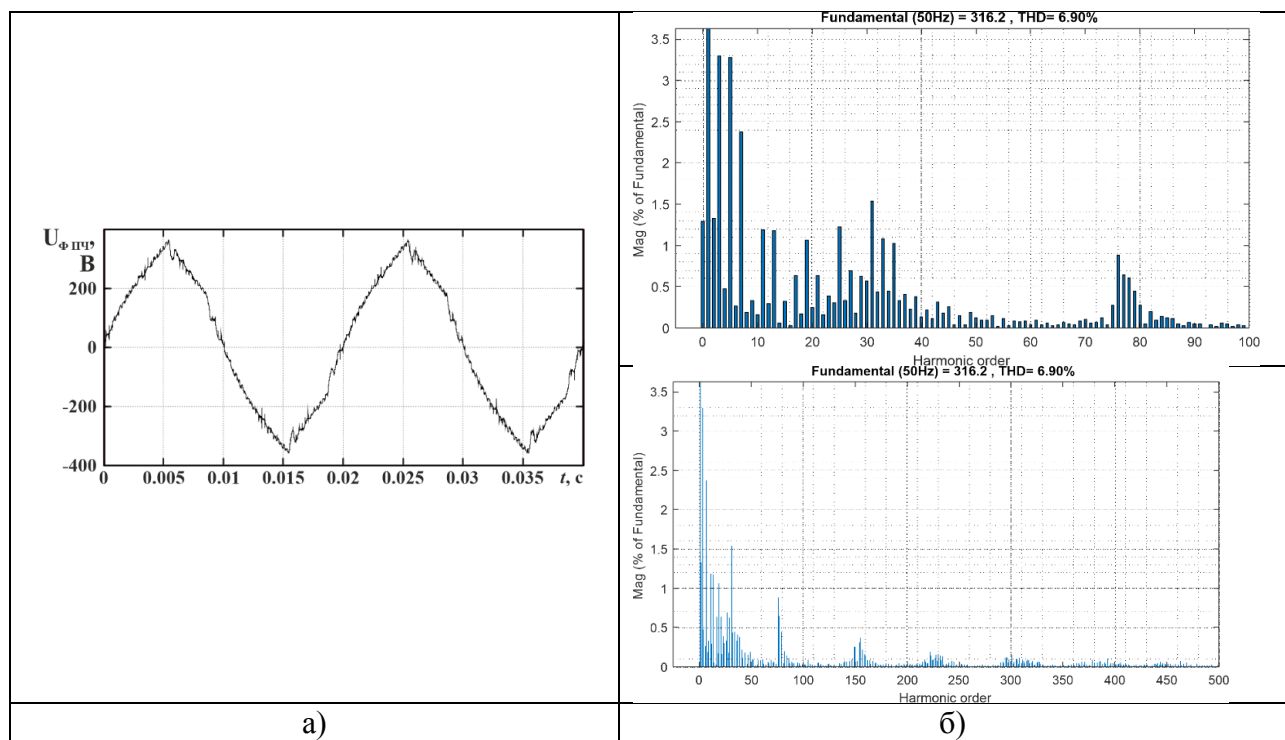
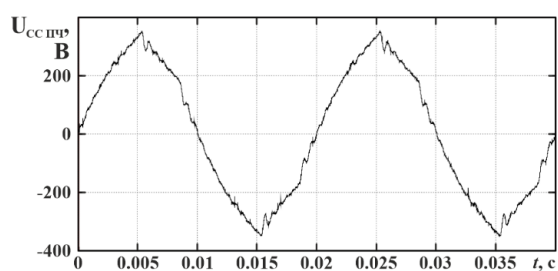
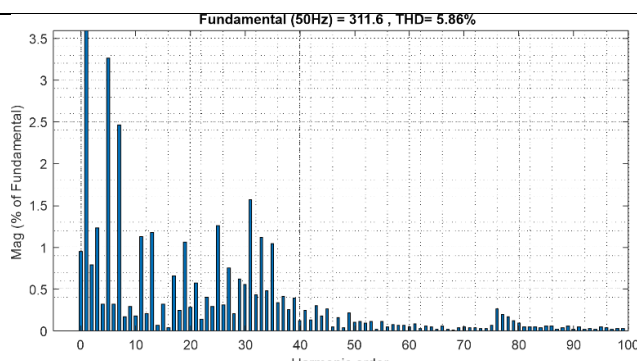


Рисунок 4.10 – Осцилограма фазної напруги вході ПЧ (а) та її спектри (б)

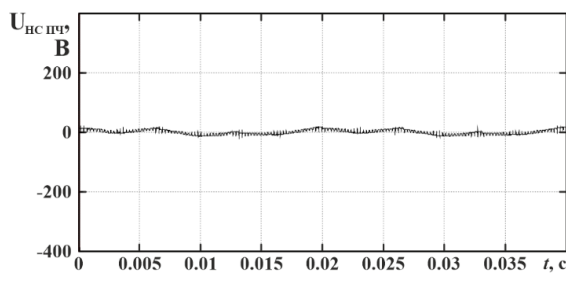


а)

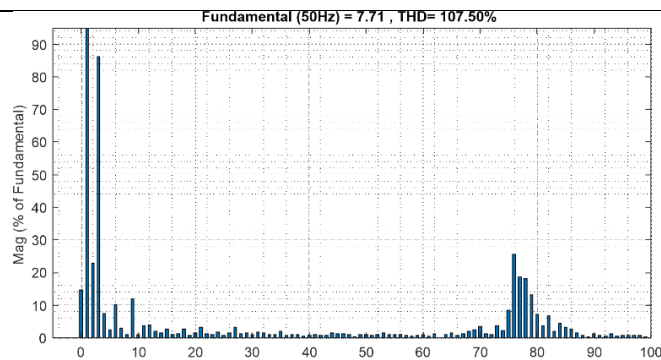


б)

Рисунок 4.11 – Осцилограма симетричної складової напруги (а) та відповідні спектри гармонік (б) на вході ПЧ, з номінальним навантаженням 0,5 кВт

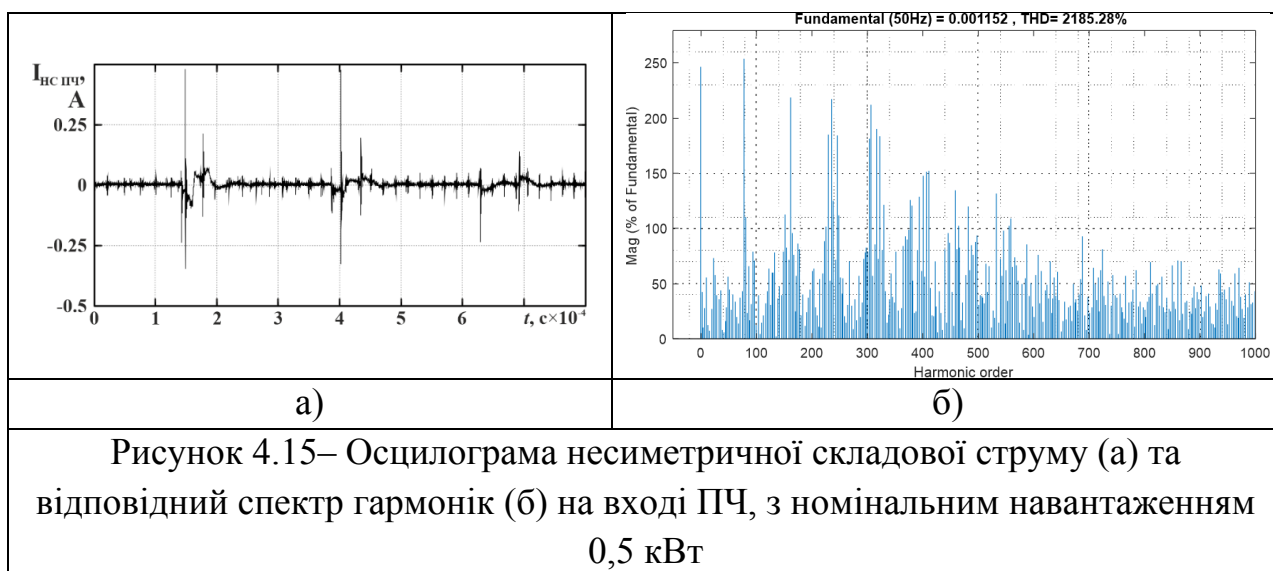
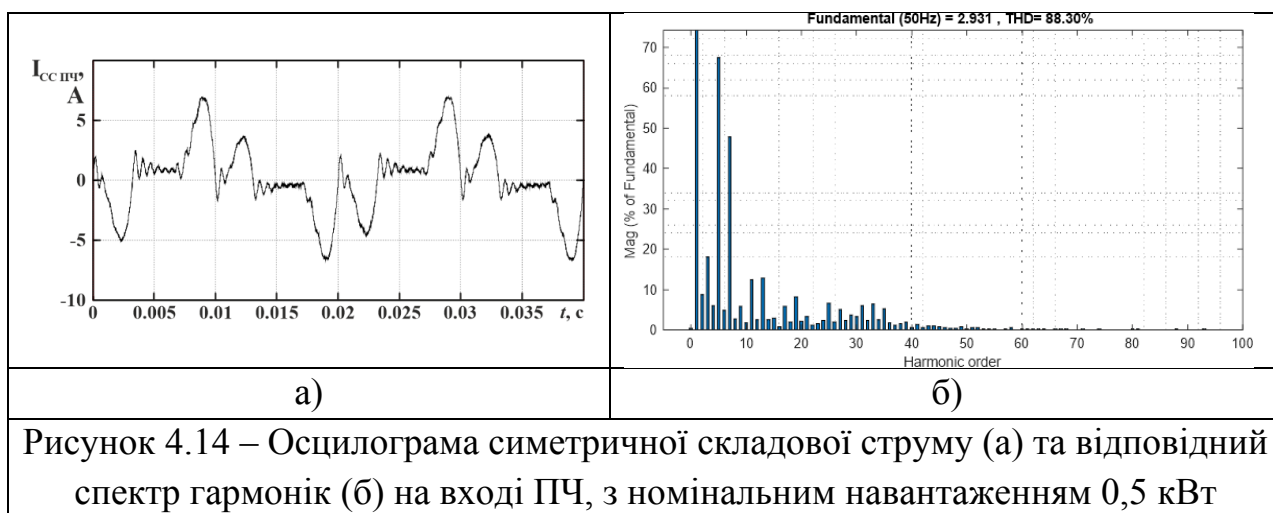
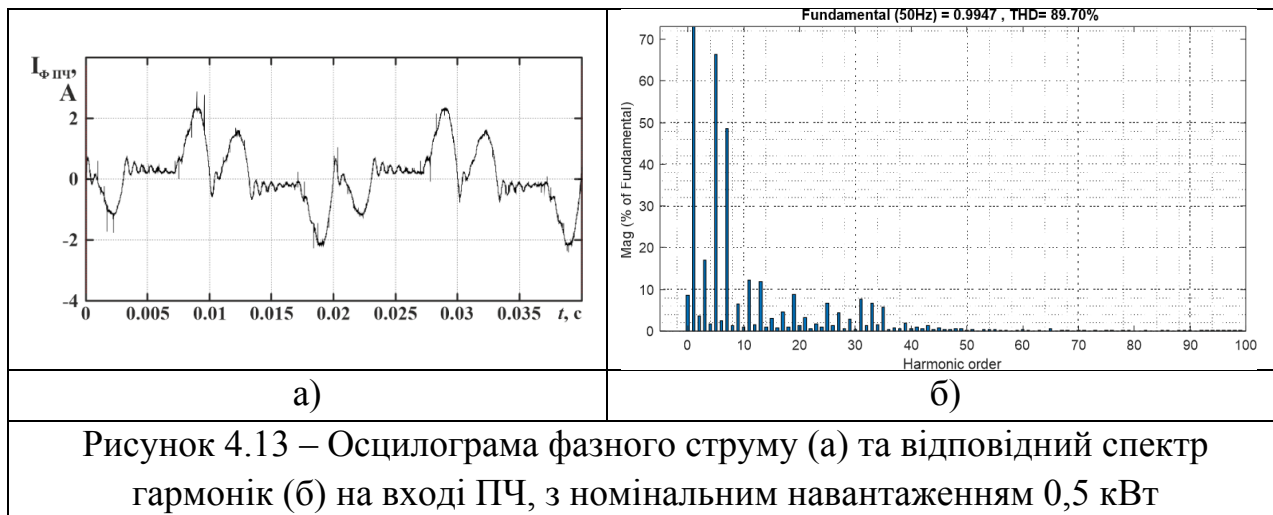


а)



б)

Рисунок 4.12 – Осцилограма несиметричної складової напруги (а) та відповідні спектри гармонік (б) на вході ПЧ, з навантаженням 0,5 кВт



Результати експериментальних вимірювань на вході АД з номінальним навантаженням 0,5 кВт. Форми симетричної складової напруги отриманні шляхом вилучення несиметричної складової із форми фазного струму.

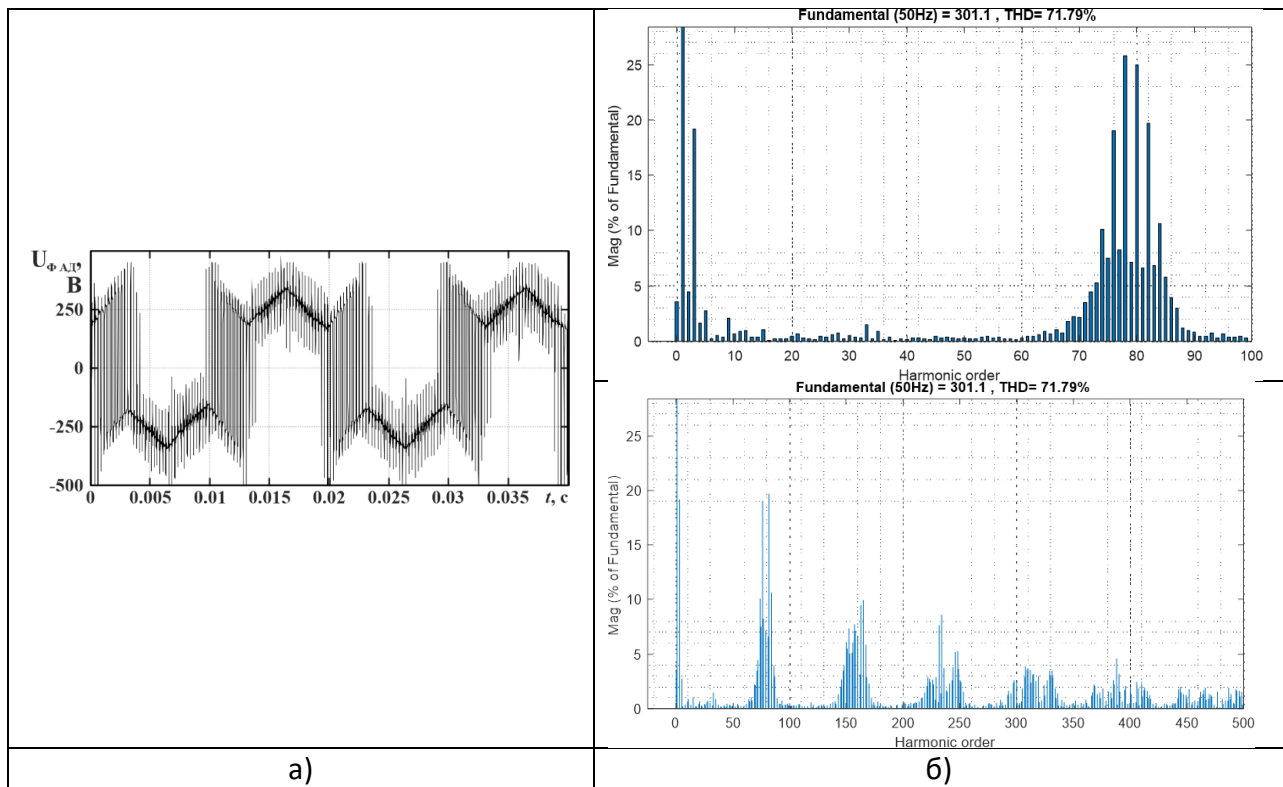


Рисунок 4.16 – Осцилограма фазної напруги (а) та відповідні спектри гармонік (б) на вході АД, з номінальним навантаженням 0,5 кВт

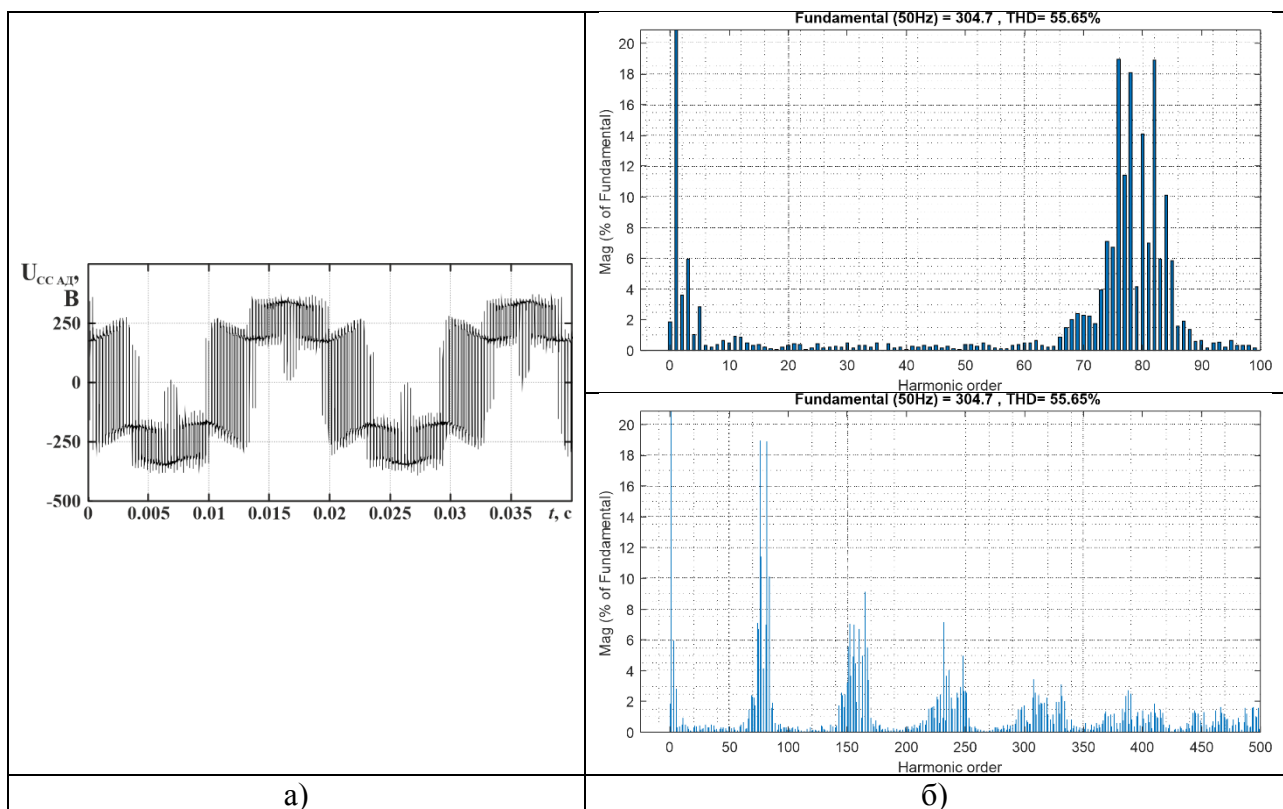
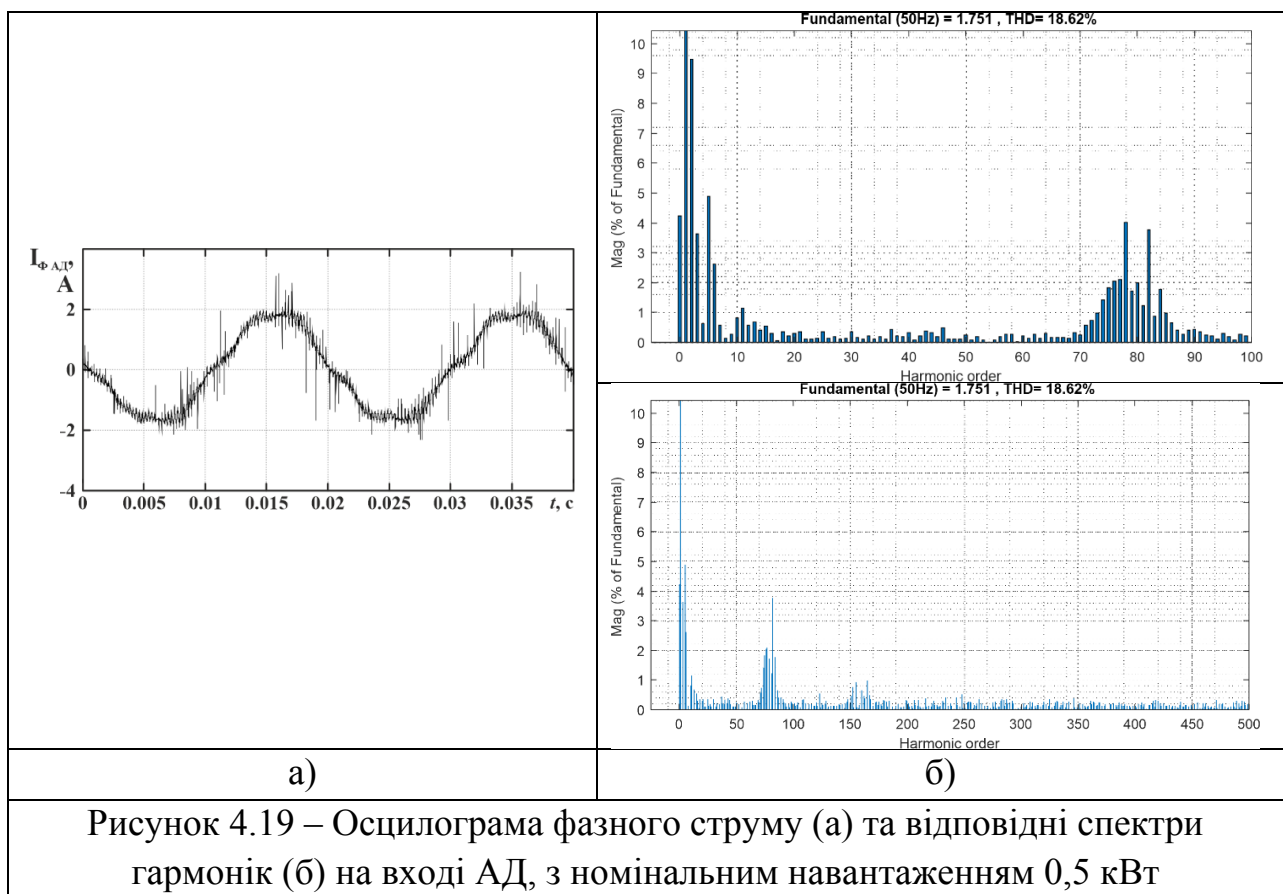
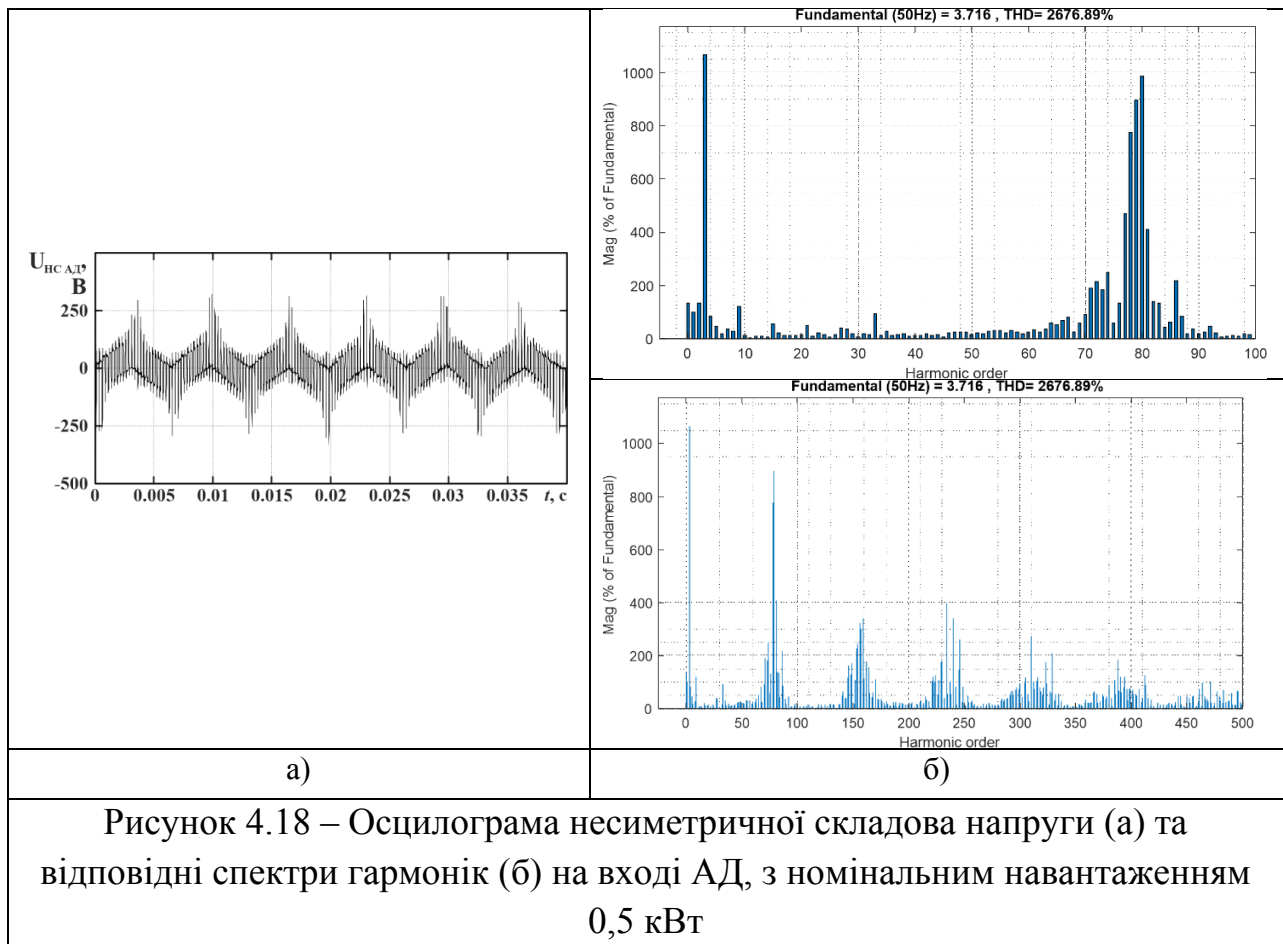


Рисунок 4.17 – Осцилограма симетричної складова напруги (а) та відповідні спектри гармонік (б) на вході АД, з номінальним навантаженням 0,5 кВт



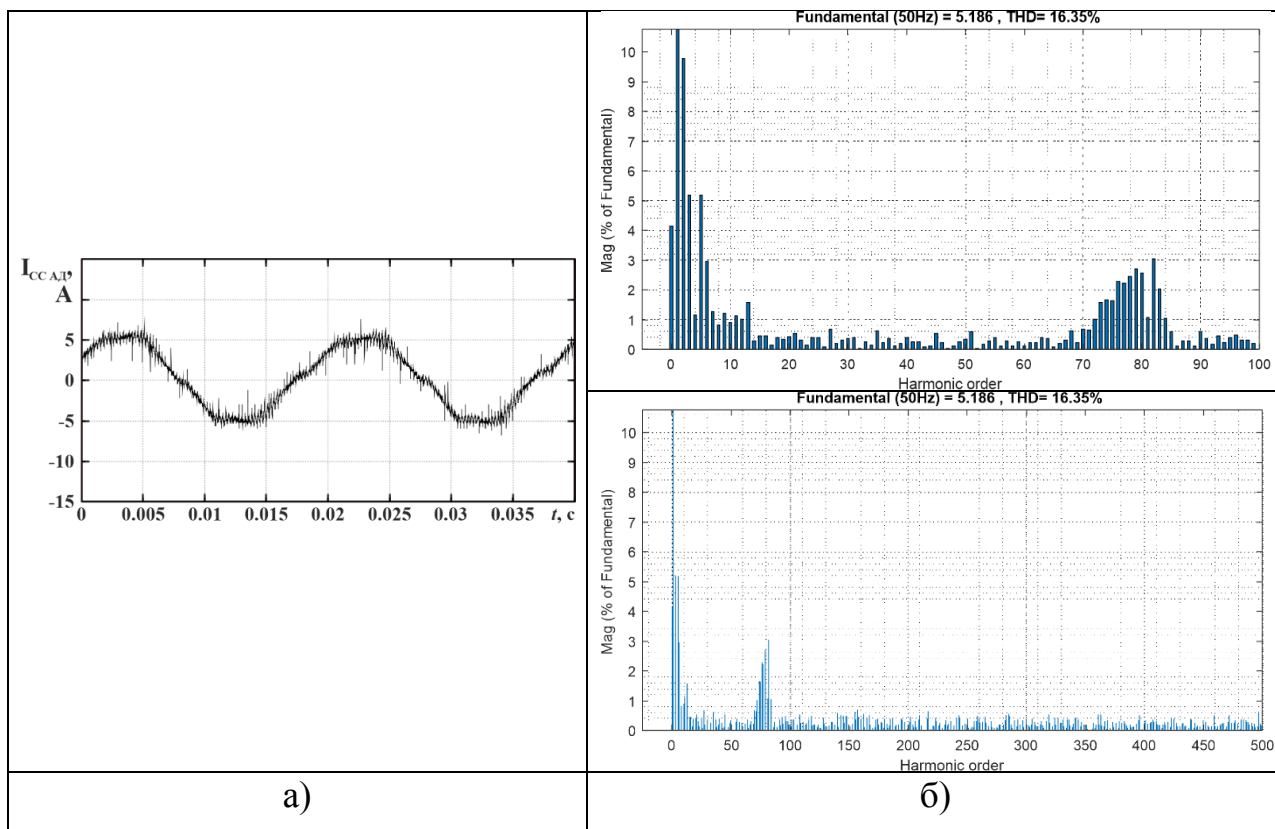


Рисунок 4.20 – Осцилограма симетричної складової струму (а) та відповідні спектри гармонік (б) на вході АД, з номінальним навантаженням 0,5 кВт

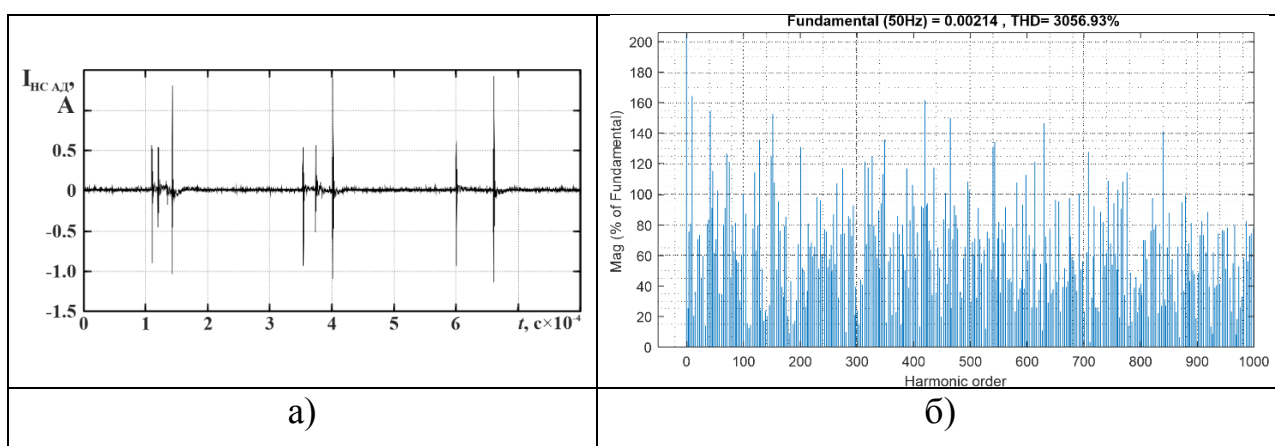


Рисунок 4.21 – Осцилограма несиметричної складової струму (а) та відповідний спектр гармонік (б) на вході АД з номінальним навантаженням 0,5 кВт

4.4. Удосконалення методології експериментального визначення

спектрів та коефіцієнта гармонічних спотворень напруги в СЕС з ПЧ [1]

Для безпечної експлуатації суден з напівпровідниковими перетворювачами частоти (ПЧ) у складі частотно-регульованих напівпровідникових електроприводів (ЧРЕП) необхідно вирішити дві головні проблеми [1, 2].

Перша з них стосується показників якості електроенергії (ПЯЕ) і полягає в обмеженні загального коефіцієнта гармонічних спотворень напруги на головних шинах суднової електророзподільчої системи (СЕС) для зазначеного діапазона гармонік. Нещодавно IACS запровадила нову вимогу (UR E24 [3]) для суден з електричною рушійною установкою щодо моніторингу та реєстрації в СЕС з ЧРЕП рівнів, які не повинні перевищувати 8% при врахуванні гармонік до 50-го порядку (до 2,5 кГц). Однак ПЧ, які використовують IGBT, генерують гармоніки приблизно до 50 МГц, причому найбільш проблематична ділянка зазвичай знаходиться в діапазоні 10 кГц-10 МГц, хоча проблеми можуть виникати і на частотах перемикання ПЧ. Отже, через недосконалу нормативну базу високочастотні гармоніки залишаються неврахованими при визначенні попри їх згубні наслідки.

Друга проблема відноситься до сфери електромагнітної сумісності (ЕМС) і полягає у виникненні синфазної напруги (Common Mode Voltage – CMV) між кожною фазою і корпусом судна та супутнього синфазного струму (СМІ), гармоніки яких розповсюджуються через паразитні ємнісні зв'язки. CMV є причиною постійних відмов ЧРЕП, навігаційних, контрольних, кранових та пожежних систем, а СМІ руйнують підшипники двигунів.

Метою моєї кваліфікаційної роботи є розробка методології експериментального визначення спектрів фазної напруги та її синфазної і диференціальної складових в автономній СЕС з ПЧ у складі ЧРЕП без використання коштовних удосконалених аналізаторів; оцінка, на основі

					171.4321.КР.ПЗ.Р4	Арк.
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		68

експерименту, впливу «супергармонік» (від 2,5 кГц до 25 кГц) на загальну величину.

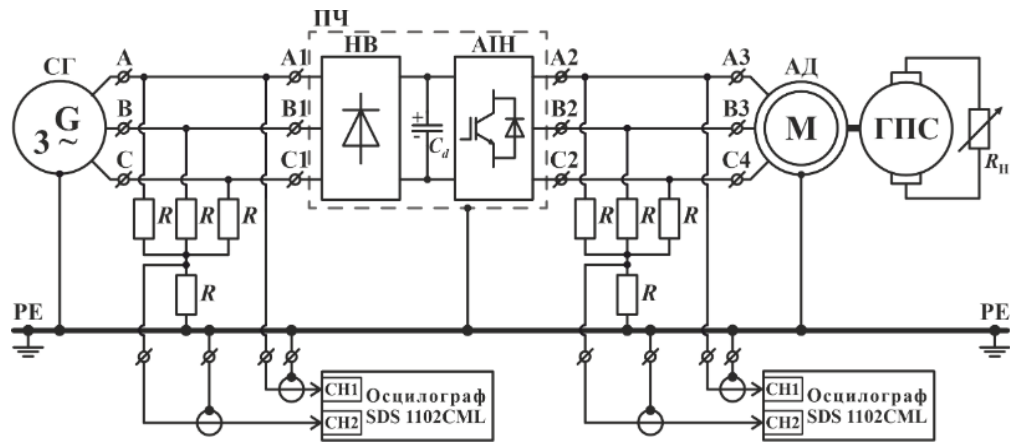


Рисунок 4.22 – Схема стенду для вимірювання спотворень напруги в автономній системі з ЧРЕП

Експериментальний стенд складається з трансформатора, що заміщує генератор: 15 кВА, 220/20÷400 В; $\cos\varphi=0.8$; перетворювача частоти Schneider ATV312 0,75 кВт; 380...500 В; асинхронного двигуна 1,68 кВт; 380 В; 3,15 А; 2850 об/хв та навантажувального генератора постійного струму. Дослідження проводилося при потужності навантаження 0,5 кВт.

Оскільки загальноновживані аналізатори ПЯЕ, зокрема МІ 2893, враховують тільки НЧ гармоніки до 2,5 кГц і дають занижені рівні, в експерименті замість удосконаленого і дорогого широкополосного аналізатора-реєстратора використовувався цифровий осцилограф (ЦО) SDS1102CML, який зберігає сигнали у вигляді масиву точок (X, Y) на флеш-пам'яті. Імпорт цих даних у MATLAB Simulink дозволив відтворити сигнал і провести його гармонічний аналіз за допомогою блоку PowerGUI. Обсяг у 20480 точок за період з запасом забезпечує аналіз до 25 кГц (до 500-ї гармоніки), що перевершує існуючі спектроаналізатори і відкриває доступ до дослідження ВЧ-компонентів спектрів і відповідних складових. Загальна величина, що визначається за зазначеною методикою, являє собою квадратурну суму складових НЧ та ВЧ діапазонів, тобто

$$THD_U = (THD_{U_{HЧ}}^2 + THD_{U_{ВЧ}}^2)^{1/2}, \text{ де } THD_{U_{HЧ}} = \left(\sum_{\nu=1}^{49} U_{\nu}^2 - U_1^2 \right)^{1/2} / U_1; \quad THD_{U_{ВЧ}} = \left(\sum_{\nu=50}^{500} U_{\nu}^2 \right)^{1/2} / U_1;$$

В ході експерименту одержано представлені на рис. 2 осцилограми фазної напруги на виході ПЧ та її складових і відповідні спектри з визначенням THD_U .

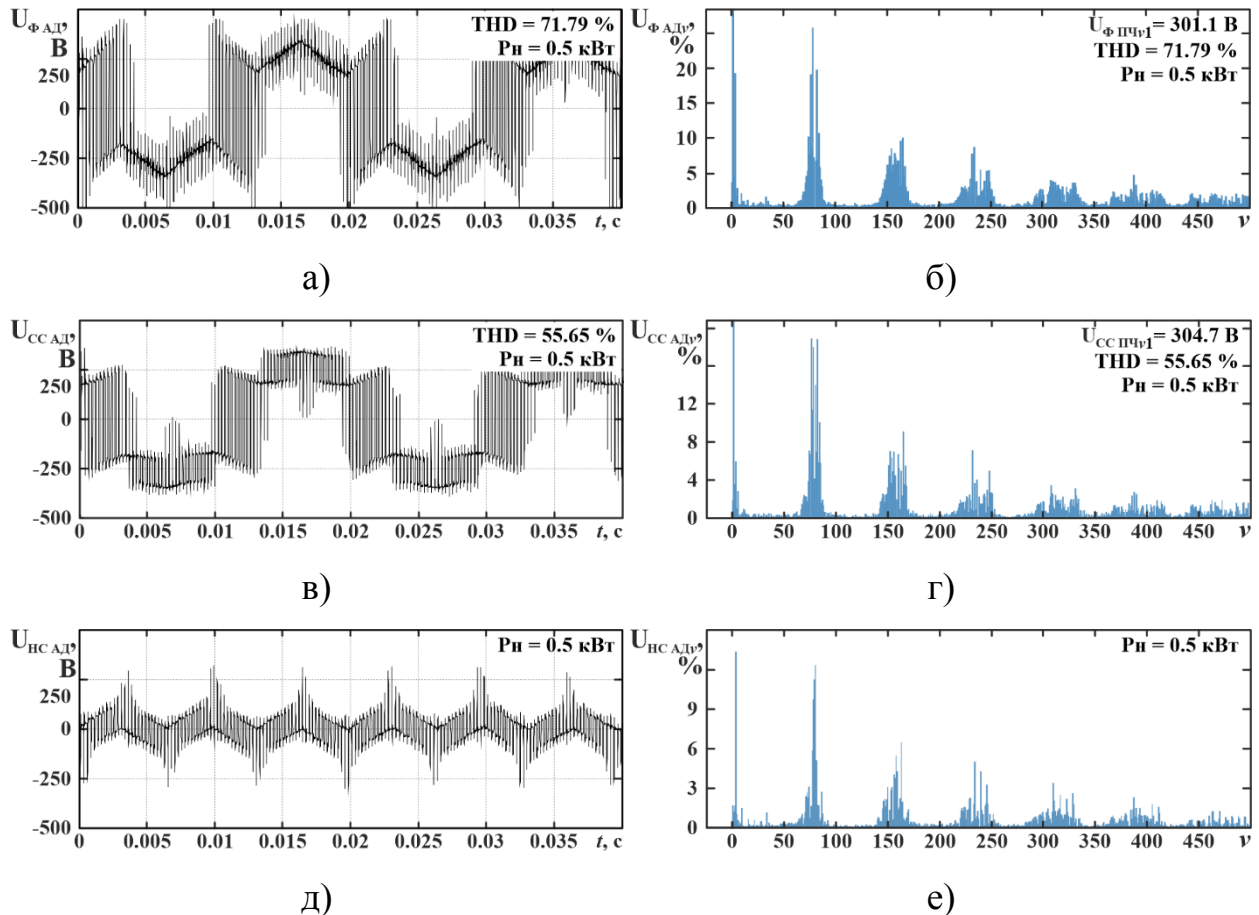


Рисунок 4.23 – Осцилограми і спектри: а, б) фазної напруги на виході ПЧ та її складових : в, г) диференційної (симетричної) та д, е) синфазної (несиметричної)

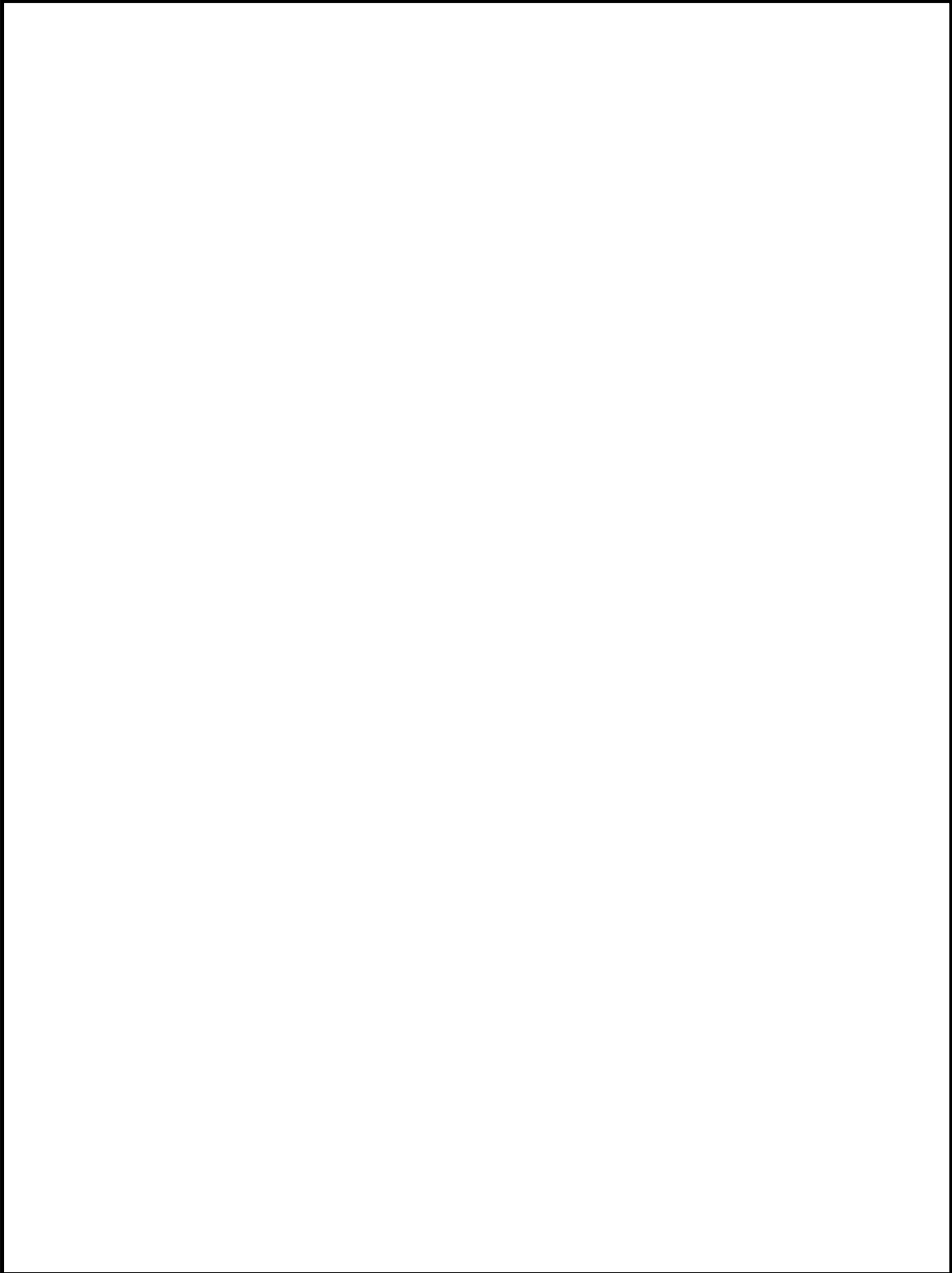
Таблиця 4.1 – Порівняння результатів визначення THD_U

Спосіб вимірювання	THD_U , %	$THD_{U_{HЧ}}$, %	$THD_{U_{ВЧ}}$, %
Аналізатор МІ 2893	25	25	-
Цифровий осцилограф + MATLAB	71,8	20,4	68,8

Висновки

1. У всіх спектрах постерігаються максимуми околі частот, що кратні частоті перемикання ПЧ $f_k = 4000$ Гц ($\nu_k = 80$). Спектри фазної напруги та її симетричної складової містять гармоніку з найбільшою амплітудою на основній частоті. У спектрі несиметричної складової найбільшу амплітуду має третя гармоніка, а основна відсутня.
2. Запропонована методологія дозволяє врахувати високочастотну область спектра і позбутися майже трикратної похибки в сторону заниження дійсної величини THD_U .

					171.4321.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		



					171.4321.КР.ПЗ.Р5			
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробник		Савицький М.С.			Охорона праці	Літ.	Арк.	Аркуші
Консультант		Губальцев А. М.					72	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Жук О. К.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Симетричний кабель для суднового ЧРП

В установці частотно-регульованого перетворювача частоти (ЧРП) перемикачі IGBT постійно працюють на високій частоті, що створює вихідну напругу інвертора з ШІМ-хвилею.

Це перемикання IGBT також створює напругу лінії двигуна на землю, яку зазвичай називають синфазною напругою. Більшість приводів змінного струму, крім своїх звичайних трифазних вихідних напруг, створюють четверту ненавмисну напругу на землю, відому як синфазна напруга.

Синфазний струм – це струм, який виходить з джерела і не повертається до джерела. У більшості замкнутих електричних кіл більша частина струму повертається до джерела. Однак, існує невелика кількість струму, яка в будь-якому колі випромінюється і не повертається.

Синфазні напруги викликають протікання коротких високочастотних імпульсів синфазного струму в колах захисного заземлення, і важливо, щоб синфазні струми поверталися до інвертора, не спричиняючи проблем з електромагнітною сумісністю (ЕМС) в іншому обладнанні, а це означає, що синфазні струми не повинні протікати в системі захисного заземлення.

Найкращий і найпростіший спосіб зробити це – використовувати екрановані кабелі частотно-регульованого приводу (ЧРП), які мають належний захист та забезпечують шлях з низьким імпедансом для повернення синфазного струму до інвертора.

					171.4321.КР.ПЗ.Р5	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Конструкція симетричного кабелю для суднового ЧРП:

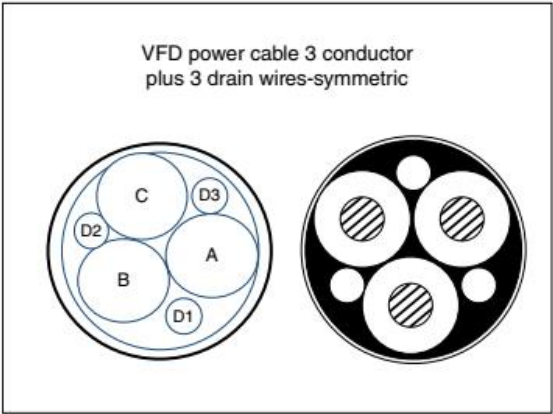


Figure 8.1

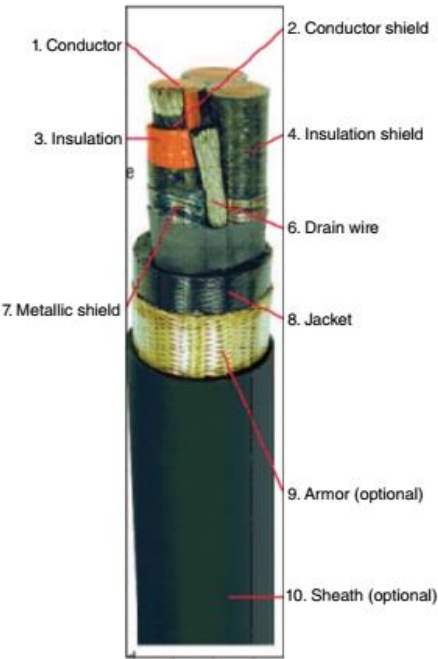


Figure 8.2 Typical MV Three Conductor Power Cable (Adapted).

Рисунок 5.1 – 5.2 – Типовий трипровідний силовий кабель середньої напруги (адаптований)

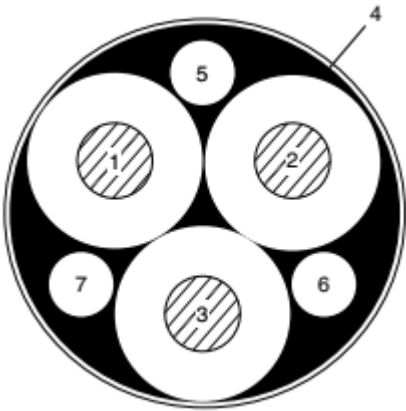


Рисунок 5.3 – Трипровідний кабель частотного перетворювача середньої напруги для енергосистеми - без броні

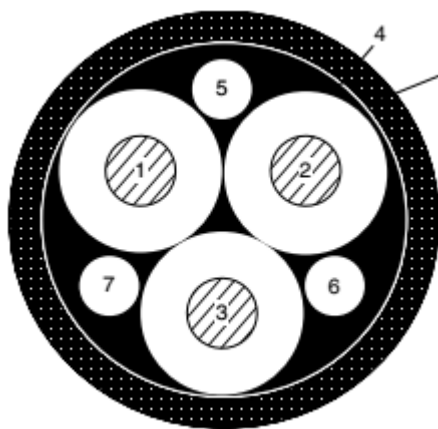


Рисунок 5.4 – Трипровідний кабель частотно перетворювача середньої напруги для енергосистеми з бронєю

1. Основний кабель з провідником та ізоляцією
2. Основний кабель з провідником та ізоляцією
3. Основний кабель з провідником та ізоляцією
4. Зовнішня загальна ізоляція
5. Міжвузловий заземлювальний провідник - голий
6. Міжвузловий заземлювальний провідник - голий
7. Міжвузловий заземлювальний провідник - голий
8. Броня

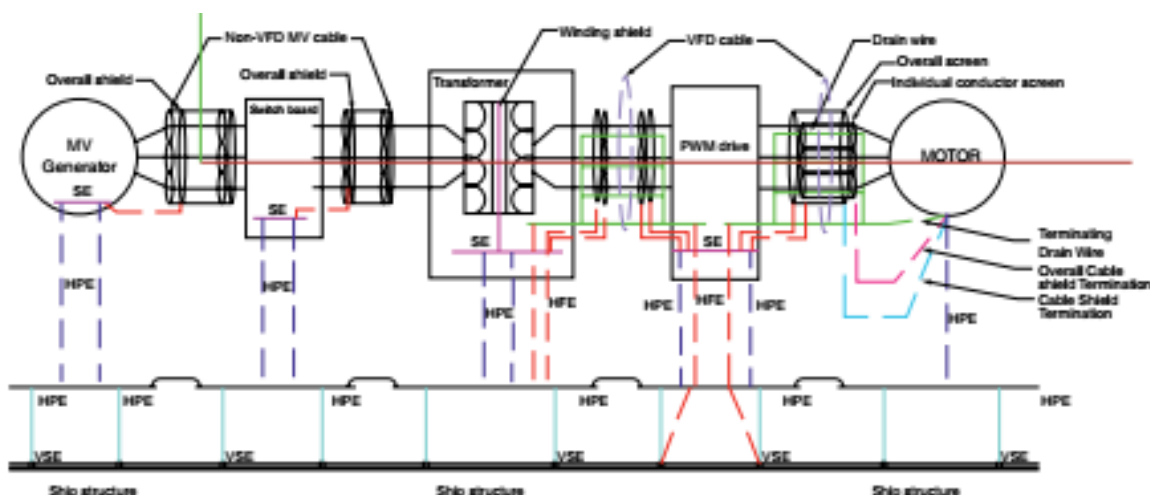


Figure 8.5 Typical VFD Cable Schematics Showing Generator to Motor (Sample-1).

Рисунок 5.5 – Типова схема кабелю ЧРП, що показує з'єднання генератора з двигуном та заземлення (приклад 1)

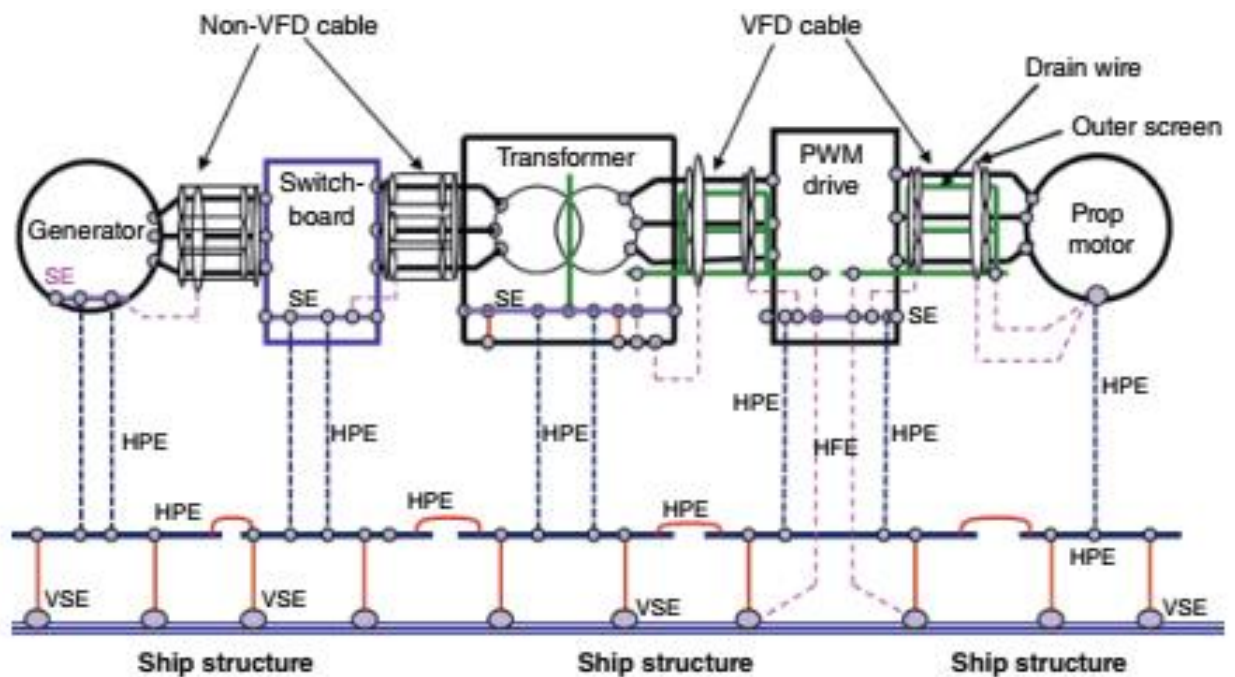


Figure 8.6 Typical Power System Cable (Sample 2).

Рисунок 5.6 – Типовий кабель системи живлення (приклад 2)

Кабель ЧРП повинен витримувати такі робочі умови, як повторювані пікові сплески напруги 1600 вольт від низьковольтних IGBT-приводів і водночас не погіршувати продуктивність інших компонентів системи приводу. Пікові напруги в системі 460 В можуть досягати від 1200 до 1600 В, що призводить до швидкого пробоя ізоляції двигуна та його виходу з ладу. Якщо це не контролювати, може статися пробой ізоляції.

Ті ж пікові напруги, які пошкоджують двигун, також можуть пошкодити кабель.

В ідеальній системі кабельного живлення чистий миттєвий струм, що протікає в загальній кабельній системі, має бути нульовим. Це включає всі фазні провідники, всі заземлювальні провідники та екран. Цього можна досягти за допомогою симетричного кабелю.

В установці ЧРП IGBT-перемикачі постійно працюють на високій частоті, і це створює вихідну напругу інвертора з ШІМ-хвилею. Це перемикання IGBT також викликає напругу між лінією двигуна та землею, яку зазвичай називають синфазною напругою. Більшість приводів змінного струму, окрім своїх звичайних трифазних вихідних напруг, створюють четверту непередбачувану напругу на землю, відому як **синфазна напруга**.

Синфазний струм – це струм, який залишає джерело і не повертається до джерела. У більшості замкнутих електричних кіл більша частина струму повертається до джерела. Однак існує невелика кількість струму, яка в будь-якому колі випромінюється і не повертається. Синфазні напруги викликають короткі високочастотні імпульси синфазного струму в колах захисного заземлення, і важливо, щоб синфазні струми поверталися до інвертора, не спричиняючи проблем з електромагнітною сумісністю (ЕМС) в іншому обладнанні, а це означає, що **синфазні струми не повинні протікати в системі захисного заземлення**.

Найкращий і найпростіший спосіб зробити це – використовувати екрановані кабелі частотно-регульованого приводу, які належним чином закінчені та забезпечують шлях з низьким імпедансом для повернення синфазного струму до інвертора.

5.2. Встановлення, з'єднання та заземлення екранованого кабелю для судового частотно-регульованого приводу. Загальне екранування [13]

Загальне екранування слід вибирати для захисту від стрибків напруги або інших перехідних процесів, а також для захисту від магнітного поля (індуктивного) зв'язку.

Заземлення живлення призначене для забезпечення електробезпеки та підвищення надійності та роботи електрично керованого або живильного обладнання в межах об'єкта. Сигнальне заземлення, з іншого боку, забезпечує роботу без шуму та надійність електронної системи. Однак

					171.4321.KP.ПЗ.P5	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		77

важливіше узгодження методів безпеки та високочастотного заземлення, щоб не жертвувати електробезпекою заради задовільної роботи електронної системи. Спочатку слід виконати вимоги Національного електротехнічного кодексу (NEC) (ANSI/NFPA 70-1993); потім слід виконати заземлення сигналу сумісним способом, який не скасовує аспектів безпеки установки. Рекомендується, щоб усі, хто бере участь у проектуванні, повністю розуміли вимоги безпеки системи, а потім наклали електронні вимоги на основи електробезпеки таким чином, щоб не знизити безпеку.

Екран заземлений на одному кінці – це метод зменшення низькочастотного шуму, який може не підходити для високочастотного шуму або шуму, спричиненого перехідними процесами. Екранування може бути заземлене як на передавальному, так і на приймальному кінці.

Екран заземлений на передавальному кінці

Заземлення загального екрану кабелю або екранованої пари на передавальному кінці усуває перехідну напругу на кабелі, спричинену електричним полем. Однак для магнітно-індукованого потенціалу існує інша умова. Заземлення екрану на передавальному кінці не впливає на магнітно-індуковану складову.

Заземлення екрану на приймальному кінці

Заземлення всього екрану або екранованої пари на приймальному кінці знову запобігає потраплянню електричного поля до кабелю, усуваючи складову електричного поля.

Для магнітно-індукованої складової вхідна ємність тепер є єдиним елементом кола між джерелом напруги та кабелем. Ємність між кабелем і землею та вхідна ємність утворюють ділянку напруги. Таке розташування зменшує імпульсну напругу на кабелі. Величина зниження збільшується з довжиною кабелю.

					171.4321.KP.ПЗ.P5	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Тут, від напруженості електричного поля, струми зміщення по кабелю через ємнісний зв'язок з джерелом перешкод відводяться на землю на кожному кінці, і на кабелі не виникає перехідної напруги.

Заземлення екрана з обох кінців завершує замкнутий контур через кабель і систему заземлювального килимка, якщо обладнання або електроніка на кожному заземленому кінці заземлені незалежно. Магнітне поле, що з'єднує цей контур, індукує потенціал, який, у свою чергу, викликає протікання вторинного струму в контурі. Магнітне поле, спричинене цим індукованим струмом, протистоїть первинному полю, так що сумарне поле в контурі достатньо лише для того, щоб викликати падіння потенціалу, пов'язане із загальним резистивним та реактивним імпедансом навколо контуру струму. Цей струм протікає аксіально вздовж екрана кабелю.

Таким чином, між кабелем і екраном на приймальному кінці існує лише невелика магнітно індукована напруга. Якщо екран заземлений у двох відносно більших точках розділення, існує ризик того, що градієнти потенціалу в системі заземлювального килимка під час несправностей можуть спричинити протікання відносно більших екрануючих струмів. Екранований кабель може пошкодитися, якщо екран не є міцним провідником. Тому потрібен важчий (товстіший) екран (а не фольгований). Зазвичай для обробки цих імпульсних струмів достатньо використовувати загальний екран з гофрованої міді товщиною 0,125 мм (0,005 дюйма) або алюмінію товщиною 0,2 мм (0,008 дюйма).

Захист від перехідних процесів за допомогою загальних екранів

Коли два електричні або електронні пристрої з'єднані між собою кабелем, екран якого заземлений лише на одному кінці, навантаження та джерело мають імпеданс до спільного джерела опору (зазвичай землі). Це створює «петлю заземлення» між джерелом та навантаженням через провідники та спільний «заземлений» опором. Спільним опором може бути земля, і прикладом може бути проводка між двома будівлями. Якщо

					171.4321.KP.ПЗ.Р5	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

перехідний процес, такий як блискавка, спричиняє швидкозмінні електромагнітні силові лінії, що перетинають кабель, тоді струм буде індукований або введений у всі металеві частини кабелю, крім тих, що відкриті (незаземлені) на обох кінцях, включаючи провідники та екран(и).

Струм, індукований у внутрішніх провідниках кабелю, буде пропорційний імпедансу петлі кожного провідника та буде синфазним.

Це ускладнює, наприклад, виявлення та вимірювання малих диференціальних струмів за допомогою приладів, підключених між лініями.

На практиці індуковані струми можуть бути ідентичними, якщо вони синфазні, та дуже близькими за величиною через подібність імпедансів петлі.

Індукований струм тепер здатний створювати великі імпульсні струми в джерелі або навантаженні, що може призвести до руйнування електроніки, підключеної до кінців провідників.

Для компенсації індукованих струмів у провідниках можна використовувати кабель із загальним екраном достатньої товщини. Кабель з екраном, ефективно заземленим на обох кінцях, забезпечує захист від електромагнітного впливу. (ПРИМІТКА — Іноді для опису заземлення екрана використовується термін «зв'язаний». Зазвичай екран має нижчий загальний імпеданс по всій своїй довжині, а його імпеданс до загального заземлювального середовища на обох кінцях нижчий, ніж імпеданс внутрішніх провідників. Екран повинен бути заземлений безперервно по всій своїй довжині та на обох кінцях, щоб не було випадкових шляхів, що встановлюються через електронні компоненти. З нижчим імпедансом петлі екран може створювати більший індукований «шум» або імпульсний струм, ніж внутрішні провідники. Ця умова є перевагою, оскільки, оскільки екран проводить більше струму, він також стає ще одним електромагнітним впливом, що впливає на внутрішні провідники. Результатом є другий індукований струм у провідниках від протікання струму по екрану.

					171.4321.KP.ПЗ.P5	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Однак індукований струм від екрана протилежний по фазі струму, індукованому початковим перехідним впливом. За цих умов внутрішні провідники стикаються з двома індукованими струмами, але протилежної полярності. Результатом є струм у провіднику, який на 180° зміщений по фазі зі струмом шуму. В результаті індукований струм від екрана компенсує («вирівнює») початковий імпульсний струм («шум»). струм у провідниках.

Перехідні магнітні поля від струму перешкоди (I_m) індукують потенціал, який викликає перехідний струм в екрані (I_s) та провідниках (I_c). Оскільки джерело струму екрану (I_s) та струму провідника (I_c) було одним і тим самим (тобто струм перешкоди), ці струми знаходяться в фазі. Екран та провідники щільно пов'язані один з одним паралельним шляхом по всій довжині кабелю. Таким чином, струм, що протікає в загальному екрані, індукуює другий струм (I_{sc}) у провідниках. I_{sc} знаходиться в протифазі на 180° відносно струму екрану (I_s).

Як наслідок, цей протиструм майже повністю компенсує струм перешкод у провідниках. Щоб впоратися з величиною струму, необхідною для ефективного компенсації струму перешкод, кабель потребує загального екранування з алюмінію товщиною 0,19 мм (7,5 міл), міді товщиною 0,125 мм (5 міл) або іншого загального екрануючого чи броньового матеріалу. Компенсуюча або зсувна дія протиструму ніколи не буває точною, але призводить до певного та значного зменшення чистого індукованого струму. У цьому обговоренні припускалося, що опорною напругою кола керування є зовнішнє заземлення. Якщо прилад кола керування підключений до екрана, заземлення екрана з обох кінців може збільшити струм перешкод у провідниках.

Вплив загального екранування, що складається з поздовжньо сформованого пластикового покриття алюмінію товщиною 0,19 мм (7,5 міл), на зменшення впливу перехідних процесів було перевірено експериментально. Випробувальне коло приладового кабелю з двома парами скручених

					171.4321.KP.ПЗ.P5	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

провідників було імпульсно піддано коливальній перенапрузі 62,5 кГц, 50 кВ, 8730 А. Виміряні напруги щодо землі загального екрану та провідників для відкритого або заземленого екрану наведені в таблиці 7. Ці дані показують, що заземлення екрану на обох кінцях суттєво зменшує індуковану напругу на провідниках. Якщо загальний екран залишити плаваючим або заземлити лише на одному кінці, він не буде повним колом, як провідники. Тому протиструм для компенсації струму перешкод у провідниках не може протікати. В результаті схема керування не захищена від перехідних процесів. Дані також вказують на те, що використання скрученої пари або фольгованого екрану недостатньо для екранування сигнальних провідників від електричних перехідних процесів.

Щоб максимізувати потік цього протиструму, слід приділяти пильну увагу всьому, що впливає на протікання струму. Зокрема, необхідні електрична безперервність екрану, електрично стабільні з'єднання з низьким опором та заземлення з низьким опором. Для двох окремих областей, що мають спільний шлях заземлення, можна пропускати струм безпосередньо через цей шлях заземлення. За цієї умови екран все ще має нижчий імпеданс і утворює шлях паралельно сигнальним провідникам, які зазвичай мають вищий імпеданс. Тому більша частина шумового струму протікає в колі екранування, а не в сигнальному провіднику.

Якщо залишити екран незаземленим («плаваючий екран»), це зведе нанівець здатність системи екранування гасити електромагнітно індуковані струми. Загальні екрани, заземлені/з'єднані з обох кінців, зберігають свою здатність до електростатичного екранування, а також забезпечують електромагнітне екранування.

Заземлення кабелю з фольгованими екранами та загальними екранами.

Система заземлення

Заземлення застосовується, перш за все, як пристрій захисту персоналу; по-друге, як засіб обмеження пошкодження обладнання та кабелів; і по-третє,

					171.4321.KP.ПЗ.P5	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

для селективної координації (захисту) електричної системи. Правильною практикою для сучасних установок є забезпечення одноточкового заземлення. Перелік окремих систем, які може знадобитися підключити до цього заземлення, наведено нижче:

- а) заземлення системи живлення (системне заземлення);
- б) система заземлення сигналів приладів;
- с) система заземлення сигналів комп'ютерів;
- д) система заземлення блискавкозахисту.

Може бути визначено або спроектовано від однієї до чотирьох окремих систем заземлення. Ці системи використовують провідники для з'єднання один з одним і заземлюються в одній точці, утворюючи єдину систему заземлення.

Метою заземлення є захист від блискавки та замикань на землю ліній електропередач, використовуючи землю як частину зворотного шляху для цих струмів. Принцип заземлення, що застосовується для напруги використання $< 600 \text{ В}$, полягає не у використанні «землі» як зворотного шляху струму, а у використанні системи взаємопов'язаних провідників для вирівнювання різниці напруг. Ця система може ефективніше обмежувати різницю напруги, ніж кілька заземлень.

Для контролю перехідних процесів та високочастотних перешкод систему заземлення слід розглядати як можливу систему розподілу перешкод. Перехідні процеси, що вводяться в систему заземлення внаслідок перемикання живлення або інших джерел, можуть поширюватися на всі частини заземлювальних провідників, включаючи електронні схеми малого сигналу, які мають спільну систему заземлення. Це може статися, оскільки заземлювальний електрод має імпеданс перенапруги значно більший за нуль, а заземлювальні провідники, підключені до нього, мають імпеданс перенапруги значно менший за нескінченність.

					171.4321.KP.ПЗ.P5	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		83

Щоб запобігти перетворенню системи заземлення на систему розподілу перешкод, заземлення має бути узгоджене з екрануванням. Тобто, локальний екран (корпус обладнання, стійка, кімната з екранами або будівля) повинен служити точкою заземлення для всіх кіл всередині екрану, а заземлювальні провідники не повинні проникати крізь будь-який екран. Екрани є замкнутими поверхнями, і заземлювальним провідникам не дозволяється проникати крізь поверхні екрану.

Зовнішнє заземлення з'єднане із зовнішньою поверхнею, а внутрішнє заземлення - з внутрішньою поверхнею. Таким чином, жодні перехідні або широкосмгові хвилі перешкод не допускаються до захищеного простору на заземлювальному провіднику.

Зокрема, великі перехідні процеси, що генеруються зовні будівлі (такі як перехідні процеси перемикання живлення або блискавки), можуть бути майже повністю виключені з чутливих інтегральних схем всередині корпусу обладнання, оскільки ці хвилі перериваються кількома шарами екранування. Проте вимоги безпеки задовольняються, оскільки в межах будь-якого екранованого об'єму всі корпуси, стійки та обладнання заземлені на локальну структуру екранування. Крім того, струми короткого замикання постійного струму та 60 Гц можуть протікати, викликаючи спрацьовування запобіжників та автоматичних вимикачів, оскільки екрани прозорі для частот живлення.

Екран кабелю є частиною системи екранування і не є заземлювальним провідником. Для підсистеми екран може складатися з двох корпусів обладнання, з'єднаних між собою екранованим кабелем. Повний екран (два екрани обладнання та екран кабелю) слід закрити, з'єднавши екран кабелю з корпусами обладнання на кожному кінці — бажано з кільцевим з'єднанням між екраном кабелю та екраном обладнання. З'єднання типу «пігтейл» (КОСИЧКА) підходить лише для звукових частот; На вищих частотах його індуктивний опір достатній для створення значного розриву між екранованими частинами. Електростатичний екран також є окремим

					171.4321.KP.ПЗ.P5	Арк.
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		84

випадком, який не можна застосовувати до екранування від перехідних процесів та широкосмугового екранування.

Практика замикання для загального екранування

З'єднувачі для з'єднання екранів - це пристрої для замикання електричного екранування, які виконують дуже важливу функцію в захисті приладів та систем керування від електромагнітних перешкод. Основна функція роз'ємів полягає в передачі струмів екранування, пов'язаних з електричними перешкодами, від екрану кабелю до екрану обладнання, не допускаючи потрапляння електричних перешкод в обладнання. Тому електрична стабільність роз'ємів є надзвичайно важливою.

Еволюція в конструкції роз'ємів призвела до появи роз'ємів, придатних для кабелів з пластиковим покриттям або без екрану. Ці роз'єми не потребують зняття оболонки, коли оболонка клейко прикріплена до загального екрану. Роз'єми надіваються як на оболонку, так і на загальний екран, використовуючи невеликі виступи для фіксації в оболонці та проникнення крізь пластикові покриття на внутрішній стороні екрану. Телекомунікаційною галуззю були розроблені складні вимоги до випробувань для забезпечення надійної роботи роз'ємів. Зазвичай для прийняття необхідно успішно пройти такі типи випробувань:

- а) опір роз'єму;
- б) вимоги до навколишнього середовища — вібрація, циклічні зміни температури, вплив сірководню та сольового туману;
- с) випробування на довговічність — струм короткого замикання та стрибок струму.

Звичайний спосіб обробки екрану на роз'ємі полягає в ізоляції екрану стрічкою та з'єднанні його з задньою оболонкою корпусу обладнання через (косичку) кігтейл. Хвіст може вносити в коло індуктивність близько 1000 нГн/м, що набагато перевищує індуктивність передачі, що створюється екраном рівної довжини. Струм екрану, що протікає через індуктивність

					171.4321.KP.ПЗ.P5	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

кігтейлу, створює напругу перешкод між екраном кабелю та корпусом обладнання. Важливо, щоб заземлюючі з'єднання з екраном були якомога коротшими.

Для деяких кабелів можливо концентрично закінчити загальний екран на оболонці роз'єму без зазорів по колу. Коли виконується ця процедура, на провідники подається значно менша напруга з таких причин:

- а) Довжина шляху, по якому має протікати струм екрану, коротша.
- б) Напруженість поля всередині екрана майже дорівнює нулю, оскільки магнітне поле повністю знаходиться зовні області, зайнятої сигнальними провідниками (основний фактор).
- с) Напруженість поля зовні екрана зменшується завдяки більшому діаметру шляху, по якому протікає струм (незначний фактор).

5.3. Рекомендації щодо технології встановлення кабелю частотно-регульованого приводу [13].

Проблемами з кабелем частотно-регульованого приводу є синфазні струми (СМС), що генеруються частотно-регульованим приводом, та електромагнітне випромінювання. Обидва вони генеруються як небажаний побічний продукт високочастотних імпульсно-широотно-модульованих сигналів приводу. Правильний вибір кабелю, прокладання кабелю та замикання кабелю для силового кабелю, кабелю керування та сигнального кабелю контролера частотно-регульованого приводу повинні відповідати рекомендаціям виробника частотно-регульованого приводу з урахуванням наступних факторів:

- 1) Забезпечте керований та контрольований шлях для синфазного струму, що генерується частотним перетворювачем (ЧП), щоб забезпечити мінімальне проходження синфазного струму через сталевий корпус судна.
- 2) Забезпечте безперервний екран по всьому кабелю від інвертора до двигуна (мінімізуючи кількість електромагнітного випромінювання, яке може виходити з кабелю та спричиняти перешкоди для інших систем).

					171.4321.KP.ПЗ.P5	Арк.
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		86

3) Ефективно заземліть корпус двигуна ЧП (зменшуючи небезпеку ураження електричним струмом).

Виробники приводів рекомендують використовувати екран кабелю ЧП з обох кінців, щоб забезпечити ефективний шлях для синфазного струму. Кінцеве замикання кабелю також повинно бути в електричному контакті з екраном кабелю з усіх боків (360°), щоб забезпечити шлях з низьким імпедансом від екрану кабелю до точки входу в корпусі контролера двигуна ЧП та двигуна. Цей метод замикання також мінімізує електромагнітне випромінювання від кабелю. Окрім належного замикання, переконайтеся, що оболонка кабелю між інвертором та кінцевими замиканнями двигуна залишається неушкодженою. Оболонка кабелю діятиме як ізолятор, щоб запобігти переходу синфазного струму, що проходить по екрану кабелю, на землю будівлі.

Доцільно розміщувати вхідні/вихідні кабелі з одного боку шафи та відокремлювати кабелі програмованого логічного контролера (ПЛК) та іншого обладнання керування та зв'язку від протилежного боку шафи, щоб зменшити вплив електромагнітних перешкод від приводів.

Маркування оболонки:

А) Вставте кабель у корпус. Надійно прокладіть кабель через корпус до клем приводу (або двигуна), забезпечуючи достатню довжину кабелю для мінімізації його натягу.

В) Виміряйте довжину кабелю, необхідну для досягнення позначених точок підключення, залишаючи зайву довжину для обрізання після того, як кабель буде прокладено до точок підключення після підготовки.

С) Позначте оболонку в точці входу в корпус. Це місце, де оболонка кабелю буде обрізана та зачищена.

Зняття оболонки:

А) Оберніть ізоляційну стрічку навколо оболонки в попередньо зробленій позначці, вирівнявши передній край стрічки з позначкою.

					171.4321.KP.ПЗ.P5	Арк.
						87
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- В) Розріжте оболонку вздовж переднього краю стрічки до шару екранування, не прорізаючи екран.
- С) Розріжте поздовжньо від кінця кабелю до переднього краю стрічки аж до шару екранування.
- Д) Зніміть оболонку.

Зняття екрана:

- А) Відміряйте два дюйми від раніше відрізаного краю оболонки та позначте.
- В) Оберніть смужку мідної стрічки (довжина приблизно дорівнює півторам довжинам окружності екрана) навколо екрана, вирівнявши передній край стрічки з позначкою.
- С) Вирівняйте та обмотайте ізоляційну стрічку по мідній стрічці (для контрасту з екраном під час різання), а потім обріжте навколо екрана по передньому краю стрічки аж до шару збірки кабелю.
- Д) Зніміть екран та видаліть ізоляційну стрічку, нанесену в пункті «С», залишивши мідну стрічку.

Прикріплення заземлювального стрижня:

- А) Видаліть наповнювачі. Скрутіть дренажні дроти разом та обмотайте дроти ізоляційною стрічкою.
- В) Розмістіть припаяну ділянку заземлювального стрижня врівень з екраном. Оберніть заземлювальний стрижень навколо екрана, зберігаючи натяг, щоб уникнути розтягування обплетення стрижня.
- С) Закріпіть заземлювальний стрижень на екрані, застосовуючи пружину постійного зусилля в тому ж напрямку, куди був обмотаний екран.
- Д) Оберніть ізоляційну стрічку навколо пружини та заземлювального стрижня, щоб закріпити їх на екрані.

Закінчення заземлювального стрижня:

- А) Якщо ви будете кріпити кабель до корпусу (або розподільної коробки двигуна) за допомогою кабельного фітинга (сальника), розмістіть фітинг (сальник) над кабелем, перш ніж продовжувати.

					171.4321.KP.ПЗ.P5	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

В) Розширте відкритий кінець заземлювального стрижня.

С) Очистіть поверхню задньої пластини, щоб після підключення заземлювального стрижня до неї був хороший шлях з низьким імпедансом для синфазного струму, що протікає через заземлювальний стрижень.

Д) Прикріпіть заземлювальний стрижень та обгорнутий(і) дріт(и) заземлення (якщо є) до поверхні задньої пластини за допомогою великої плоскої шайби. Якщо ви встановлюєте закінчення на кінці кабелю з боку двигуна, прикріпіть заземлювальний стрижень та обгорнутий(і) дріт(и) заземлення (якщо є) до стінки розподільної коробки.

Закінчення провідників:

А) Прокладіть фазні провідники та заземлення до відповідних точок закінчень як у корпусі приводу, так і в розподільній коробці двигуна.

В) Обріжте будь-яку зайву довжину, залишаючи достатньо матеріалу для зміни фази, якщо це необхідно.

С) Прикріпіть наконечники до фазних провідників відповідно до інструкцій виробників приводу та двигуна.

Заземлення та з'єднання на борту судна. Рекомендації щодо завершення

Шина заземлення шафи частотного перетворювача (ЧП) повинна бути підключена до корпусу в точці, і ця точка має бути доступною для проведення вимірювань. Якщо кілька модулів приводу ЧПВ знаходяться в одному корпусі шафи, всі модулі ЧПВ повинні бути заземлені з міркувань особистої безпеки, щоб запобігти небажаному накопиченню напруги за будь-яких обставин.

Не рекомендується використовувати заземлення через гвинти кріплення шафи та шасі шафи. Щоб забезпечити належне заземлення, заземлення модуля має бути підключене затвердженим методом. Високочастотне та низькоімпедансне заземлення має бути близько 0,1 Ом. Цього можна досягти за допомогою плоского мідного обплетення, як показано на рисунку 5.7.

					171.4321.KP.ПЗ.P5	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		89



Рисунок 5.7 – Рекомендовані заземлювальні з'єднувачі

Використовуйте заземлювальну стрічку замість суцільного круглого дроту для заземлення. Це усуває скін-ефект, настільки помітний у високочастотних сигналах ЧПВ. Оскільки ЧПВ мають незбалансовані трифазні векторні суми, струм ніколи не дорівнює нулю в нейтралі. Це вимагає належного екранування та заземлення шляхів з низьким опором назад до приводу (і для захисту від впливу синфазних струмів та високочастотних струмів підшипників).

Ніколи не використовуйте неекрановані кабелі в трубах або лотках, щоб запобігти ненавмисним шляхам до заземлення, створюючи петлі заземлення. Крім того, кабелі повинні мати належне екранування та заземлення там, де вони підключаються до корпусу приводу та там, де вони підключаються до двигуна. Для цього використовуйте сальники ЕМС та екрановані кабелі.

Кабельні сальники ЕМС

Кабельні сальники ЕМС забезпечують 360° контакт з корпусом для кращих шляхів до землі. Фактично, заземлюючі сальники ЕМС можна використовувати як на двигуні, так і на корпусі. Деякі з них виготовлені з нікельованої латуні та мають клас захисту IP 68; сальники ЕМС доступні з різьбою NPT та метричною різьбою та розмірами. Окрім 360° завершення на корпусі, косичка екрану повинна бути якомога коротшою під час під'єднання до клеми РЕ на приводі.

					171.4321.KP.ПЗ.P5	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		90

Довжина кабелю між контролером двигуна частотного перетворювача та двигуном

Почнемо з довгих кабельних ділянок між контролером двигуна частотного перетворювача та двигуном з точки зору належної роботи частотного перетворювача:

- 1) Ємність кабелів (фаза-земля) може створювати достатній струм на землю, що може призвести до несправності цифрових сигналів та роботи обладнання.
- 2) Ці обмеження стосуються лише струмів заземлення (де частотний перетворювач не працюватиме належним чином). Існують інші міркування, такі як пошкодження підшипника двигуна, напруження ізоляції двигуна та напруження ізоляції кабелю частотного перетворювача.
- 3) Для захисту ізоляції двигуна є кілька міркувань. Вкажіть ізоляцію двигуна щонайменше 1400 В.
- 4) Вкажіть кабель частотного перетворювача на 2 кВ.
- 5) Існують рекомендації щодо використання різних типів фільтрів для різних застосувань частотного перетворювача. Застереження полягає в тому, що використання будь-якого фільтра, пов'язаного з керуванням електромагнітними перешкодами/електромагнітною сумісністю, має розглядатися як системна проблема, а не лише як проблема окремого частотного перетворювача.

Через скін-ефект на високих частотах не використовуйте дренажний провід з одним терміналом. Він не забезпечує достатньої площі поверхні для проведення високочастотного шуму до землі. Натомість найкраще підключити екран безпосередньо до клеми РЕ на приводі. Оскільки сигнали частотного перетворювача мають дуже високу частоту, вони демонструють скін-ефект на проводах на цих високих частотах. Для ознайомлення, скін-ефект - це тенденція змінного струму протікати переважно поблизу зовнішньої поверхні електричного провідника. Ефект стає все більш

					171.4321.KP.ПЗ.Р5	Арк.
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		91

очевидним зі збільшенням частоти. Саме тому для заземлення найкраще використовувати заземлювальну косичку замість суцільного круглого дроту.

					171.4321.КР.ПЗ.Р5	Арк.
						92
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

1. Недотримання норм на показники якості електроенергії не є рідкістю в буровій та морській промисловості, а також на суднах з потужними напівпровідниковими руховими електроприводами, попри те, що відповідні наслідки є дуже дорогими з точки зору економічних збитків та безпеки для персоналу.
2. Наслідки низької якості електроенергії, як правило, не повністю усвідомлюються або не визнаються, доки не стає надто пізно.
3. Розуміння того, що гармоніки, комутаційні спотворення та пов'язані з ними ефекти, а також проблеми синфазного режиму певною мірою існують у всіх приводах змінного та постійного струму з регульованою швидкістю є важливим фактом, яке всі спеціалісти повинні врахувати в розрахунках, включаючи розрахунки безпеки.
4. Існують серйозні наслідки надмірного спотворення напруги в мережі або перегріву електрообладнання та перебоїв електроживлення, спричинених гармоніками, стрибками напруги або несправностями внаслідок синфазних струмів.
5. Жоден засіб забезпечення якості електроенергії не є ідеальним; всі вони можуть вимагати певних поєднань та компромісів на місці. Однак, якщо їх правильно застосувати, якість електроенергії може досягти безпечного та прийнятного рівня, що забезпечить зменшення спотворень і відповідних ризиків.
6. Розуміння та усунення цих ризиків – єдиний спосіб уникнути катастрофічних наслідків, коли їх найменше очікують. Це вимагає високого рівня інженерної експертизи умов ЕМС.
7. Постійний моніторинг ПЯЕ разом із удосконаленням відповідних засобів може гарантувати своєчасне виявлення будь-яких ознак погіршення якості електроенергії та вжиття заходів для вирішення проблем, перш ніж

					171.4321.КР.ПЗ.Висновки	Арк.
						93
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

обладнання постраждає, що призведе до перебоїв, відмови обладнання або ще гірших наслідків.

8. Через недосконалу нормативну базу високочастотні гармоніки, попри їх згубні наслідки, наразі залишаються неврахованими при визначенні THD_U .

9. Розроблена співробітниками ННІ АЕ НУК (к.т.н., доц. Жуком Д.О., Жуком О.К., к.т.н., доц. Дьяконовим О.С., Козловим М.О.) і використана мною при написанні БКР методологія експериментального визначення та дослідження широкодіапазонних спектрів та їх складових на вході і виході ЧРАП шляхом обробки масивів часових залежностей сигналів через цифровий осцилограф та блоку PowerGUI у MATLAB Simulink дозволяє врахувати високочастотну область спектра і позбутися майже трикратної похибки в сторону заниження дійсної величини THD_U .

					171.4321.КР.ПЗ.Висновки	Арк.
						94
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жук Д.О., Жук О.К., Дьяконов О.С., Козлов М.О. Дослідження спотворень напруги в автономній системі з частотно-регульованим електроприводом *Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв* / **Комплексне** забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2025) : матеріали тез доповідей XV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 22–23 травня 2025 р.) : у 2 т. / Національний університет «Чернігівська політехніка» – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2025. – Т. 2., с.220 – 222. [https://conference-
chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/](https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/)
2. Bourguet S., Guerin P, Le Doeuff R., *Non-characteristic harmonics generated by frequency converter*, GE44 , Laboratory, Saint-Nazaire, France, All Electric Ship 2003, Edinburgh.
3. *Guidance Notes on Control of Harmonics in Electrical Power Systems*, May 2006, American Bureau of Shipping.
4. IEC 60034-1, *Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*, 2004-04, International Electrotechnical Commission
IEC 60034-12, *Rotating electrical machines – Part 12: Starting performance of single-speed three-phase cage induction motors*, 2002-04, International Electrotechnical Commission.
5. Evans I C., *Are We Playing with Fire*, Electrical Review (UK), Vol. 221.No 3. Feb 1988. Page 32.
6. Mindykowski J, Tarasiuk T., M Szweda M., Evans IC., “*Electric Power Quality Measurements on an All Electric Ship with Active Front End Propulsion Drives*”, Polish Register of Shipping, Gdynia Maritime University. June 2007.
7. *Offshore Standards, DNV-OS-D201 – Electrical Installations*, January 2005, Det Norske Veritas.

					171.4321.КР.ПЗ.Джерела	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

8. *Rules and Regulations for the Classification of Ships*, July 2001, Lloyds Register of Shipping.
9. Evans I C., Hoevenaars A H., *Meeting Harmonic Limits of Marine Vessels*, ESTS 2007, Arlington, VA, May 2007.
10. Evans I C., Johnson J., *Practical Aspects of Applying Broadband Active Filters on Four Applications*. EPQU 2007, Barcelona, Spain, October 2007.
11. Hoevenaars A H., Evans I C., Desai B., *Preventing AC Drive Failures due to Commutation Notches on a Drilling Rig*. PCIC-2009, September 2007.
12. Evans I C., Limpaecher R., *Clean, Innovative DC Power for Marine, Offshore and Subsea Applications using AC-Link Technology*. White Paper. November 2009
13. Mohammed M. Islam. *VFD Challenges for Shipboard Electrical Power System Design*, IEEE Press, 445 Hoes Lane, Piscataway, NJ 08854, 2020

					171.4321.КР.ПЗ.Джерела	Арк.
						96
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		