

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ АВТОМАТИКИ ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ**

Кафедра: «Електричної інженерії та електроніки»

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему:

**“АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ СУДНОВОГО ВИСОКОВОЛЬТНОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПІДРУЛЮЮЧОГО ПРИСТРОЮ”**

Виконав: студент 6 курсу, групи 3601

спеціальності:

271 – Річковий та морський транспорт

Спеціалізація: «Експлуатація суднового
електрообладнання і засобів автоматики»

Владислав Кравченко

допущений до захисту

Завідувач кафедри

Проф. Микола Муха

Керівник

Проф. Віктор Бушер

Нормоконтролер

Рецензент

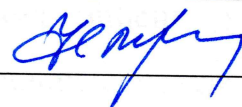
Ірина Гвоздева

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ АВТОМАТИКИ ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

Кафедра: «Електричної інженерії та електроніки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри _____



«____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу магістра

Кравченка Владислава Васильовича

1. Тема: Аналіз режимів роботи суднового високовольтного електропривода підрулюючого пристрою.

затверджена наказом ректора № 1503 від " 10 " 12 202 5 року

1. Термін закінчення роботи: " 10 " грудня 202 5 року

2. Вихідні дані до роботи: технічна документація контейнеровоза місткістю 10600 контейнерів та підрулюючого пристрою KAWASAKI SIDE THRUSTER KT-255B5, науково-технічні праці щодо підрулюючих пристроїв суден; програмне забезпечення для моделювання та аналізу динамічних систем Matlab / Simulink / SimPowerSystem

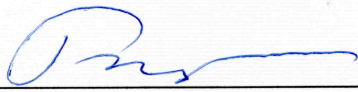
4. Зміст дипломної роботи магістра: Вступ, 1. Класифікація та параметричне керування підрулюючими пристроями. 1. Дослідження впливу пускових процесів потужного електроприводу на показники якості електроенергії у суднової електроенергетичної мережі та розробка методу їх покращення, Висновки. Список використаних джерел.

5. Перелік ілюстрацій до презентації дипломної роботи магістра: Електрична принципова схема електроприводу підрулюючого пристрою, Моделі елементів системи керування підрулюючим пристроєм, Графіки перехідних процесів в електроприводі підрулюючого пристрою

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання	Примітки
1	Аналіз режимів роботи підрулюючих пристроїв з гвинтами фіксованого кроку. Аналіз літературних джерел	20.10.2025	<i>вик.</i>
2	Аналіз елементів електромеханічної системи підрулюючого пристрою. Розробка моделі тиристорного пристрою плавного пуску. Аналіз показників якості електричної енергії при прямому та керованому пуску електроприводу.	10.11.2025	<i>вик.</i>
3	Вибір керованого компенсатора реактивної потужності. Розрахунки перехідних процесів, аналіз і вибір параметрів системи керування компенсатором	25.11.2025	<i>вик.</i>
4	Оформлення пояснювальної записки, графічних матеріалів, презентації	06.12.2025	<i>вик.</i>

Дата видачі завдання: 25.09.2025 р.

Керівник  Віктор БУШЕР

Завдання прийняв до виконання  Владислав КРАВЧЕНКО

РЕФЕРАТ

Дипломна робота магістра: 78 с., 28 рис., 4 табл., 35 джерел

Тема “Аналіз режимів роботи суднового високовольтного електропривода підрулюючого пристрою”

Актуальність теми. Актуальність даної теми визначається стрімким розвитком морських перевезень, зокрема контейнерних перевезень, які займають провідну роль у світовій логістиці. Зростання масштабів та обсягу контейнеровозів вимагає впровадження сучасних технічних рішень для забезпечення ефективності їх експлуатації. Одним із ключових аспектів є оптимізація режимів роботи підрулюючих пристроїв.

Об'єкт дослідження. Електромагнітні та електромеханічні процеси в потужному підрулюючому пристрої з урахуванням взаємодії суднової електроенергетичної системи і регульованих пускових пристроїв.

Предмет дослідження. Закономірності впливу тиристорного пристрою плавного пуску та методи компенсації негативного впливу на показники якості електричної енергії (гармонічні спотворення, коливання напруги, коефіцієнт потужності тощо).

Методи досліджень. При розв'язанні поставлених в роботі задач використано: методи теорії електропривода для розробки математичних моделей елементів електроприводу підрулюючого пристрою і суднової електроенергетичної системи; методи теоретичної електротехніки при розробці методики визначення параметрів керованого реакторного компенсатора; методи теорії автоматичного керування для синтезу замкненої системи керування вихідною напругою тиристорного регулятора напруги та керованим реакторним компенсатором; чисельні розрахунки динамічних процесів в математичних моделях виконувалися за допомогою чисельного методу Дорманда-Прінса, реалізованого в MATLAB / Simulink / SimPowerSystem.

Апробація результатів дослідження. Основні досягнення роботи, в яких є елементи наукової новизни, викладено в роботі «Удосконалення методу керування компенсатором реактивної потужності в високовольтному електроприводі підрулюючого пристрою», опублікованої в збірнику XV міжнародної науково-технічної конференції «СУДНОВА ЕЛЕКТРОІНЖЕНЕРІЯ, ЕЛЕКТРОНІКА І АВТОМАТИКА».

Метою роботи є дослідження взаємодії електромеханічної системи підрулюючого пристрою з судновою електроенергетичною системою та підвищення якості електроенергії в пускових режимах шляхом удосконалення налаштувань тиристорного пристрою плавного пуску і впровадження керованого компенсатора реактивної потужності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

- обґрунтувати використання тиристорного регулятора напруги як найпоширенішого пускового пристрою, що використовується для потужних електроприводів різних типів з вентиляторним навантаженням;
- визначити найважливіші показники якості електроенергії та визначити вплив пускових пристроїв з тиристорним регулятором напруги на ці показники;
- розробити математичні моделі розподільчої мережі суднової електроенергетичної системи з керованим пристроєм плавного пуску асинхронного двигуна;
- дослідити показники якості електроенергії при прямому та керованому пуску електропривода підрулюючого пристрою, обґрунтувати необхідність використання активних пристроїв керування показниками якості електроенергії, насамперед, керованого компенсатора реактивної потужності;

- розрахувати електромагнітних параметрів керованого компенсатора реактивної потужності за необхідним діапазоном регулювання реактивної потужності у точці підключення;
- розробити структурну схему і математичну модель системи керування реакторним компенсатором і виконати налаштування цієї системи.

Рішення цих задач дозволило обґрунтувати необхідність використання спеціалізованих пускових пристроїв для зменшення негативного впливу пускових процесів. Розглянуто існуючі методи та сучасні технічні пристрої для керування пусковими режимами потужних електроприводів з різними типами навантаження. Обґрунтовано доцільність використання пускових пристроїв потужних електроприводів з використанням тиристорних регуляторів напруги. Але негативною стороною такого рішення є значний вплив тиристорних регуляторів напруги на показники якості електроенергії. Надано аналітичні залежності для розрахунку показників якості електроенергії.

Розроблено деталізовану модель тиристорного пристрою плавного пуску з урахуванням підключення до мережі обмеженої потужності та досліджено вплив на мережу під час автотрансформаторного пуску і пуску від пристрою плавного пуску. Показано, що при використанні пристрою плавного пуску падіння напруги у вузлу розподільчої мережі склало 1400 V від напруги холостого ходу мережі і 1100 V від номінальної напруги, тобто 16%. Також зареєстровано суттєвий рівень 5, 7, 11, 13 гармонік напруги на обкладинках двигуна і в мережі.

Розроблено модель керованого LLC-компенсатора реактивної потужності, розраховано його параметри та налаштовано систему керування реактивною потужністю, що дозволило проаналізувати отримані перехідні та усталені процесів та показати, що такий керований компенсатор зменшує

падіння напруги до 3 % від номінальної напруги, майже в 1.5 рази зменшує рівень вищих гармонік напруги.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що на підставі аналізу фізичних принципів взаємодії ПІ-регулятора, асинхронного двигуна і керованого компенсатора обґрунтовано як оптимальна неповна компенсація реактивної потужності індуктивного характеру – на рівні 10 % від максимальної реактивної потужності під час пуску – що дозволяє практично повністю видалити коливання реактивної потужності в середині перехідного процесу, а також всіх гармонійних складових напруги на обкладинках двигуна і у вузлі розподільчої мережі СЕЕС на протязі всього перехідного процесу.

ANNOTATION

Master's Thesis: 78 pages, 28 figures, 4 tables, 35 references

Title: *Analysis of Operating Modes of the Ship High-Voltage Electric Drive of the Thruster*

Relevance of the Topic. The relevance of this research is determined by the rapid development of maritime transportation, particularly container shipping, which plays a leading role in global logistics. The increasing scale and capacity of container vessels necessitate the implementation of advanced technical solutions to ensure efficient operation. One of the key aspects is the optimization of thruster operating modes.

Objective of the Study. The objective of this thesis is to investigate the interaction between the electromechanical system of the thruster and the ship's power system, and to improve power quality during starting modes by enhancing the configuration of the thyristor-based soft starter and implementing a controlled reactive power compensator.

Research Tasks. To achieve the stated objective, the following tasks were addressed:

- Justify the use of a thyristor voltage regulator as the most common starting device applied to high-power electric drives with fan-type loads.
- Identify the most critical power quality indicators and determine the impact of thyristor-based starting devices on these indicators.
- Develop mathematical models of the ship's distribution network incorporating a controlled soft starter for the induction motor.
- Calculate the electromagnetic parameters of the controlled reactive power compensator within the required regulation range at the connection point.
- Design the structural diagram and mathematical model of the control system for the reactor-based compensator and perform system tuning.

Results. The solution of these tasks substantiated the necessity of specialized starting devices to mitigate the negative effects of starting processes. Existing

methods and modern technical devices for controlling the starting modes of high-power electric drives with various load types were reviewed. The feasibility of using thyristor voltage regulators for high-power drives was justified. However, a significant drawback of such devices is their adverse impact on power quality indicators. Analytical dependencies for calculating power quality parameters were provided.

A detailed model of the thyristor soft starter was developed, considering connection to a limited-capacity network. The impact on the network during autotransformer starting and soft starting was investigated. It was shown that when using the soft starter, the voltage drop at the distribution node amounted to 1400 V from the no-load voltage and 1100 V from the rated voltage, i.e., 16%. A substantial presence of 5th, 7th, 11th, and 13th voltage harmonics was also recorded at the motor terminals and within the network.

A model of a controlled LLC reactive power compensator was developed, its parameters calculated, and the reactive power control system tuned. The analysis of transient and steady-state processes demonstrated that such a compensator reduces voltage drop to 3% of the rated voltage and decreases the level of higher-order voltage harmonics by approximately 1.5 times.

Scientific Novelty. The scientific novelty of this work lies in the substantiation, based on the analysis of physical principles of interaction between the PI-controller, induction motor, and controlled compensator, of the optimal incomplete compensation of inductive reactive power—at the level of 10% of the maximum reactive power during starting. This approach practically eliminates oscillations of reactive power in the middle of the transient process, as well as all harmonic components of voltage at the motor terminals and at the distribution node of the ship's electrical power system throughout the entire transient process.

Keywords: Ship electrical power plant, high-voltage electric drive, thruster, thyristor soft starter, reactive power compensation, harmonic distortion, PI-controller, LLC compensator.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	11
ВСТУП	12
1. КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ПАРАМЕТРИЧНЕ КЕРУВАННЯ ПІДРУЛЮЮЧИМИ ПРИСТРОЯМИ	15
1.1. Налаштування системи управління та параметрів підрулюючого пристрою	17
1.2. Основні показники якості електроенергії в розподільчих мережах енергоємних промислових підприємств	28
1.2. Вплив пускових процесів потужних електроприводів на електромеханічне та технологічне обладнання.....	30
1.3. Методи і пристрої формування пускових процесів електроприводів.....	33
1.4. Вплив тиристорних регуляторів напруги на показники якості електроенергії	39
1.5. Висновки	41
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПУСКОВИХ ПРОЦЕСІВ ПОТУЖНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У СУДНОВОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ МЕРЕЖІ ТА РОЗРОБКА МЕТОДУ ЇХ ПОКРАЩЕННЯ.....	43
2.1. Математичне моделювання асинхронного двигуна	43
2.2. Моделювання тиристорного регулятора напруги	51
2.3. Підсистема вимірювання показників якості електроенергії.....	54
2.4 Керований компенсатор реактивної потужності.....	55
2.5. Дослідження показників якості електроенергії при пуску електропривода без компенсатора реактивної потужності.....	59

2.6. Налаштування системи керування компенсатором реактивної потужності та дослідження показників якості електроенергії	60
2.7. Висновки	68
ВИСНОВКИ.....	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	72

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

APF – active power filter

THD – Total Harmonic Distortion

АД – асинхронний двигун

ГРК – гвинти регульованого кроку

ГРЩ – головний розподільний щит

ГФК – гвинти фіксованого кроку

ККРП – керований компенсатор реактивної потужності

ПП – підрулюючий пристрій

САК – система автоматичного керування

САФ – силовий активний фільтр

СЕЕС – суднова електроенергетична система

СІФУ – система імпульсно-фазового управління

ТППП – тиристорний пристрій плавного пуску

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ЯЕ – якість електроенергії

ВСТУП

Актуальність роботи визначається стрімким розвитком морських перевезень, зокрема контейнерних перевезень, які займають провідну роль у світовій логістиці. Зростання масштабів та обсягу контейнеровозів вимагає впровадження сучасних технічних рішень для забезпечення ефективності їх експлуатації. Одним із ключових аспектів є оптимізація режимів роботи підрулюючих пристроїв.

При розв'язанні поставлених в роботі задач використано: методи теорії електропривода для розробки математичних моделей елементів електроприводу підрулюючого пристрою і суднової електроенергетичної системи; методи теоретичної електротехніки при розробці методики визначення параметрів керованого реакторного компенсатора; методи теорії автоматичного керування для синтезу замкненої системи керування вихідною напругою тиристорного регулятора напруги та керованим реакторним компенсатором; чисельні розрахунки динамічних процесів в математичних моделях виконувалися за допомогою чисельного методу Дорманда-Прінса, реалізованого в MATLAB / Simulink / SimPowerSystem.

Об'єкт дослідження. Електромагнітні та електромеханічні процеси в потужному підрулюючому пристрої з урахуванням взаємодії суднової електроенергетичної системи і регульованих пускових пристроїв.

Предмет дослідження. Закономірності впливу тиристорного пристрою плавного пуску та методи компенсації негативного впливу на показники якості електричної енергії (гармонічні спотворення, коливання напруги, коефіцієнт потужності тощо).

Метою роботи є дослідження взаємодії електромеханічної системи підрулюючого пристрою з судновою електроенергетичною системою та підвищення якості електроенергії в пускових режимах шляхом удосконалення налаштувань тиристорного пристрою плавного пуску і впровадження керованого компенсатора реактивної потужності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

- обґрунтувати використання тиристорного регулятора напруги як найпоширенішого пускового пристрою, що використовується для потужних електроприводів різних типів з вентиляторним навантаженням;
- визначити найважливіші показники якості електроенергії та визначити вплив пускових пристроїв з тиристорним регулятором напруги на ці показники;
- розробити математичні моделі розподільчої мережі суднової електроенергетичної системи з керованим пристроєм плавного пуску асинхронного двигуна;
- дослідити показники якості електроенергії при прямому та керованому пуску електропривода підрулюючого пристрою, обґрунтувати необхідність використання активних пристроїв керування показниками якості електроенергії, насамперед, керованого компенсатора реактивної потужності;
- розрахувати електромагнітних параметрів керованого компенсатора реактивної потужності за необхідним діапазоном регулювання реактивної потужності у точці підключення;
- розробити структурну схему і математичну модель системи керування реакторним компенсатором і виконати налаштування цієї системи.

Апробація результатів дослідження. Основні досягнення роботи, в яких є елементи наукової новизни, викладено в тезах доповіді «Удосконалення методу керування компенсатором реактивної потужності в високовольтному електроприводі підрулюючого пристрою», опублікованих в збірнику XV міжнародної науково-технічної конференції «СУДНОВА ЕЛЕКТРОІНЖЕНЕРІЯ, ЕЛЕКТРОНІКА І АВТОМАТИКА».

Наукова новизна роботи полягає в тому, що на підставі аналізу фізичних принципів взаємодії асинхронного двигуна з тиристорним пристроєм плавного пуску і керованого ПІ-регулятором ШІМ LLC-компенсатора обґрунтовано, що оптимальною є неповна компенсація реактивної потужності індуктивного характеру – на рівні 10 % від максимальної реактивної потужності під час пуску – що дозволяє практично повністю видалити коливання реактивної потужності в середині перехідного процесу, а також всіх гармонійних складових напруги на обкладинках двигуна і у вузлі розподільчої мережі СЕЕС на протязі всього перехідного процесу.

Основні результати роботи. В першому розділі обґрунтовано необхідність використання спеціалізованих тиристорних пускових пристроїв для зменшення негативного впливу пускових процесів. Показано, що негативною стороною такого рішення є значний вплив тиристорних регуляторів напруги на показники якості електроенергії.

В другому розділі розроблено деталізовану модель тиристорного пристрою плавного пуску з урахуванням підключення до мережі обмеженої потужності та досліджено вплив на мережу під час автотрансформаторного пуску і пуску від пристрою плавного пуску. Показано, що при використанні пристрою плавного пуску падіння напруги у вузлі розподільчої мережі склало 1400 V від напруги холостого ходу мережі і 1100 V від номінальної напруги, тобто 16%. Також зареєстровано суттєвий рівень 5, 7, 11, 13 гармонік напруги на обкладинках двигуна і в мережі. Розроблено модель керованого LLC-компенсатора реактивної потужності, розраховано його параметри та налаштовано систему керування реактивною потужністю, що дозволило проаналізувати отримані перехідні та усталені процесів та показати, що такий керований компенсатор зменшує падіння напруги до 3 % від номінальної напруги, майже в 1.5 рази зменшує рівень вищих гармонік напруги.

1. КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ПАРАМЕТРИЧНЕ КЕРУВАННЯ ПІДРУЛЮЮЧИМИ ПРИСТРОЯМИ

1.1. Призначення, класифікація та принцип роботи підрулюючого пристрою KAWASAKI SIDE THRUSTER KT-255B5

Керованість судна, здатність слідувати по заданій траєкторії або змінювати напрямок руху по волі судноводія, є однією з важливих морехідних якостей, що визначають не тільки експлуатаційні можливості судна, але й значною мірою безпеку плавання. З розвитком техніки з'явилися пристрої, здатні створювати необхідну тягу для керування судном на малому ході і без ходу в складних умовах плавання, котрі називаються «засобами активного керування» або ж підрулюючі пристрої.

Підрулюючі пристрої можна класифікувати за типом робочого органу, типом і кількістю каналів, місцезнаходженням пристрою на судні, за розташуванням і типом приводного двигуна.

За типом робочого органу розрізняють ПП з гребними гвинтами (водомітні), крильчатими рушіями (ротаторні) та насосами різних типів. Використовуються гвинти фіксованого кроку (ГФК) та гвинти регульованого кроку (ГРК). При використанні ГФК управління величиною та напрямом упору ПП досягається зміною частоти обертання приводного двигуна та його реверсом. При встановленні ГРК управління упором здійснюється поворотом лопатей, що призводить до зміни кроку гвинта за постійної частоти обертання.

За місцем розташування розрізняють носові та кормові ПП. Для забезпечення максимального плеча поперечної сили ПП розміщують на більшій відстані від міделя.

За місцем розташування приводу ПП поділяють на 2 групи: 1. ПП із приводом гвинта з водозанурювальним електричним або гідравлічним двигуном; 1. ПП з приводним двигуном, розташованим усередині корпусу судна, поза каналом ПП, в якому передача потужності до гребного гвинта здійснюється через редуктор за допомогою конічної зубчастої передачі.

Регулювання величини та напрямку упору ПП з ГФК проводиться зміною частоти обертання та реверсом приводного двигуна.

У деяких випадках регулювання частоти обертання та реверсування гребного гвинта виконується за допомогою спеціальних муфт та реверс-редукторів.

При встановленні ПП з ГРК величина та напрямок упору регулюються поворотом лопатей при постійній частоті обертання приводного двигуна. Поворот лопатей здійснюється за допомогою гідравлічного або електромеханічного приводу. І тут схема ПП спрощується, так як можливе використання нереверсивного приводного двигуна.

Для приводу ПП з ГФК застосовують асинхронні електродвигуни з фазним ротором і короткозамкненим ротором. Запуск електродвигуна з фазним ротором здійснюється за кількома пусковими ступенями. Пусковий струм зазвичай становить 1,2-1,4 номінального. Останні пускові ступені використовуються для ступінчастого регулювання частоти обертання електродвигуна від 50 до 100% номінальної. Привод електродвигуна із короткозамкненим ротором здійснюється за допомогою транзисторного перетворювача частоти [1, 2].

Умовам роботи з ГРК відповідають асинхронні короткозамкнені електродвигуни. У цьому випадку, пусковий струм може бути обмежений введенням у ланцюг ротора на період пуску додаткових опорів. Це можливо завдяки малому пусковому моменту ГРК при встановленні лопатей у положення нульового кроку.

1.1. Налаштування системи управління та параметрів підрулюючого пристрою

Починаючи з середини 1950-х років, гвинти з регульованим кроком набули популярності, перейшовши від незначної частки на ринку до нинішнього значного ринкового впливу. На сьогодні гвинти з регульованим кроком займають близько 35% ринку в порівнянні з системами з фіксованим кроком і найбільш популярні серед поромів, вантажних суден, буксирів і траулерів.

Хоча гвинт із регульованим кроком має більшу механічну складність порівняно з фіксованим варіантом, він має кілька важливих переваг. Одна з таких переваг — це керованість, де точне управління тягою можна забезпечити через зміну кроку лопатей, особливо коли використовується обладнання з постійною швидкістю, що дозволяє змінювати робочі режими без необхідності прискорювати чи сповільнювати двигун. Крім того, точне управління тягою є особливо важливим у певних експлуатаційних ситуаціях, наприклад, під час динамічного позиціонування або при частих швартувальних маневрах, як на поромах коротких маршрутів.

Ще одна додаткова особливість основного принципу керованого кроку полягає в тому, що в деяких випадках конструкцію втулки гвинта можна модифікувати для пристосування до флюгування лопатей гвинта. У цьому контексті флюгування означає таке положення лопатей, коли вони вирівняні вздовж корпусу судна, що зменшує опір руху при вимкненому обертанні. Такі рішення застосовуються на двобічних поромах або на невеликих військових кораблях, особливо тих, що працюють на широкому діапазоні швидкостей і можуть використовувати гібридні силові установки. Наприклад, судно може мати три гвинти, де два бічні гвинти використовуються при крейсерському режимі, а центральний не обертається і флюгується для мінімального опору. Коли потрібен швидкісний режим, всі

три гвинти працюють з налаштованим кроком для досягнення максимальної швидкості.

Далі детально розглянуто аспекти інтеграції системи керування підрулюючою установкою і налаштування параметрів її функціонування. Для забезпечення надійності роботи та стабільності маневрування необхідно забезпечити інтеграцію елементів системи керування та оптимізувати алгоритми її роботи. Представлено опис системи керування установкою, а також аналіз режимів її роботи, які дозволяють адаптувати функціонування підрулюючої системи до різних умов експлуатації.

Розглянута система являє собою контролер для управління підрулюючим пристроєм під час швартування чи відходу судна від причалу. Його основна функція полягає в забезпеченні точного управління кутом лопатей підрулювача шляхом обробки команд керування та даних зворотного зв'язку. Контролер підтримує автоматизоване управління підрулюючим пристроєм, оптимізоване завдяки застосуванню сучасних алгоритмів управління [3].

Таблиця 1.1 – Специфікація головної панелі керування (КТЕ – TMU).

Напруга	24 V DC	
Струм	1 A	
Температура	0 C – 70 C	
Контролер	16 бітний мікро-контролер	
Дисплей	LED індикатор стану	
Метод комунікації	Внутрішній	2 канали CAN
	Зовнішній	2 канали CAN 1 послідовний канал (RS-422 чи RS-485 вибірково)

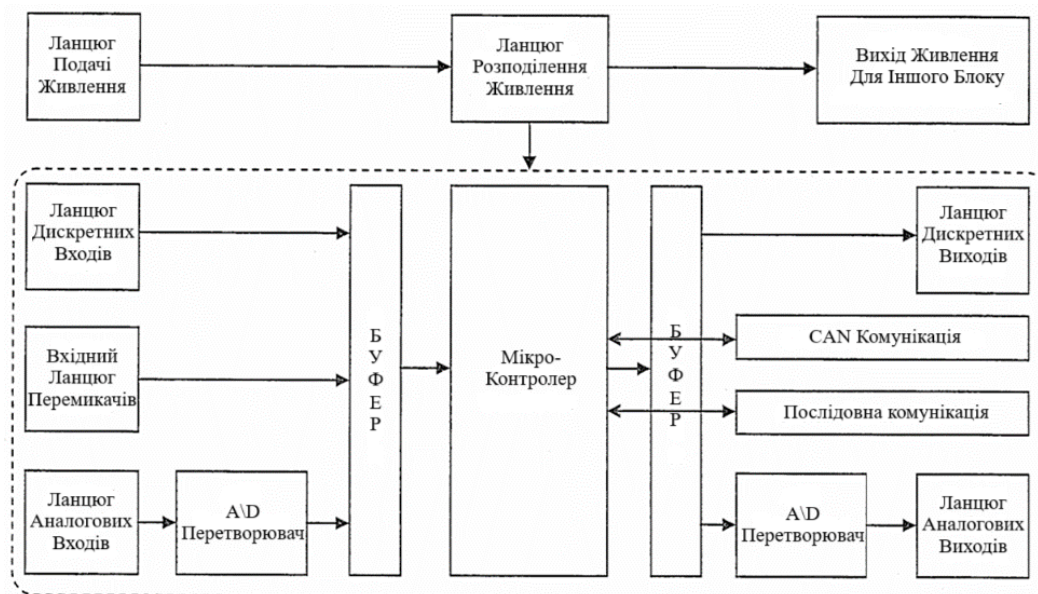


Рисунок 1.2 – Функціональна блок схема головної панелі керування (КТЕ – ТМУ)

- 1) Ланцюг подачі живлення: Цей компонент забезпечує енергопостачання для всіх функціональних модулів системи з ГРЩ.
- 2) Ланцюг розподілення живлення: Розподіляє подане живлення між різними елементами системи. Він також передає живлення на інші станції управління через вихід.
- 3) Ланцюг дискретних входів: Приймає цифрові сигнали (включення/вимкнення) від зовнішніх пристроїв.
- 4) Вхідний ланцюг перемикачів: Приймає сигнали від перемикачів керування.
- 5) Ланцюг аналогових входів: Використовується для обробки аналогових сигналів (наприклад, сигналів, що поступають від датчиків).
- 6) A/D перетворювач (аналого-цифровий перетворювач): Перетворює аналогові сигнали в цифровий формат для подальшої обробки мікроконтролером.
- 7) Буфер: Служить проміжною ланкою між вхідними ланцюгами та мікроконтролером для тимчасового зберігання і передачі даних.

- 8) Мікроконтролер: Центральний процесорний елемент системи, що керує всіма компонентами, обробляє вхідні сигнали, виконує алгоритми управління та генерує вихідні сигнали.
- 9) Ланцюг дискретних виходів: Передає цифрові сигнали керування на виконавчі пристрої.
- 10) Ланцюг аналогових виходів: Забезпечує передачу аналогових сигналів керування на виконавчі пристрої.
- 11) CAN-комунікація: Взаємодіє з іншими блоками системи через шину CAN, що є стандартом для передачі даних у системах автоматики.
- 12) Послідовна комунікація: Використовується для обміну даними з іншими пристроями через послідовні інтерфейси.

Таблиця 1.2 – Специфікація вхідних сигналів.

Аналогові входи (3)	1 сигнал зворотного зв'язку для кута лопатей
	1 сигнал струму навантаження електродвигуна
	1 командний сигнал зовнішньої системи (наприклад ДП)
Дискретні входи (30)	6 сигналів стану
	12 аварійних сигналів
	6 сигналів контролю
	6 запасних входів

Таблиця 1.3 – Специфікація вихідних сигналів.

Аналогові виходи (2)	2 командні сигнали (вибірково мА або Вольти)
	2 сигнали зворотного зв'язку (вибірково мА або Вольти)
Дискретні виходи (20)	2 сигнали для керування СК, free contact, 10A \ 250V AC
	7 командних сигналів, free contact, 2A \ 30V DC
	5 сигналів стану, free contact, 2A \ 30V DC

	2 запасні виходи, free contact, 2A \ 30V DC
	2 сигнали збою джерела живлення AC чи DC, free contact, 2A \ 30V DC
	2 сигнали несправності установки чи живлення, збій джерела free contact, 2A \ 30V DC

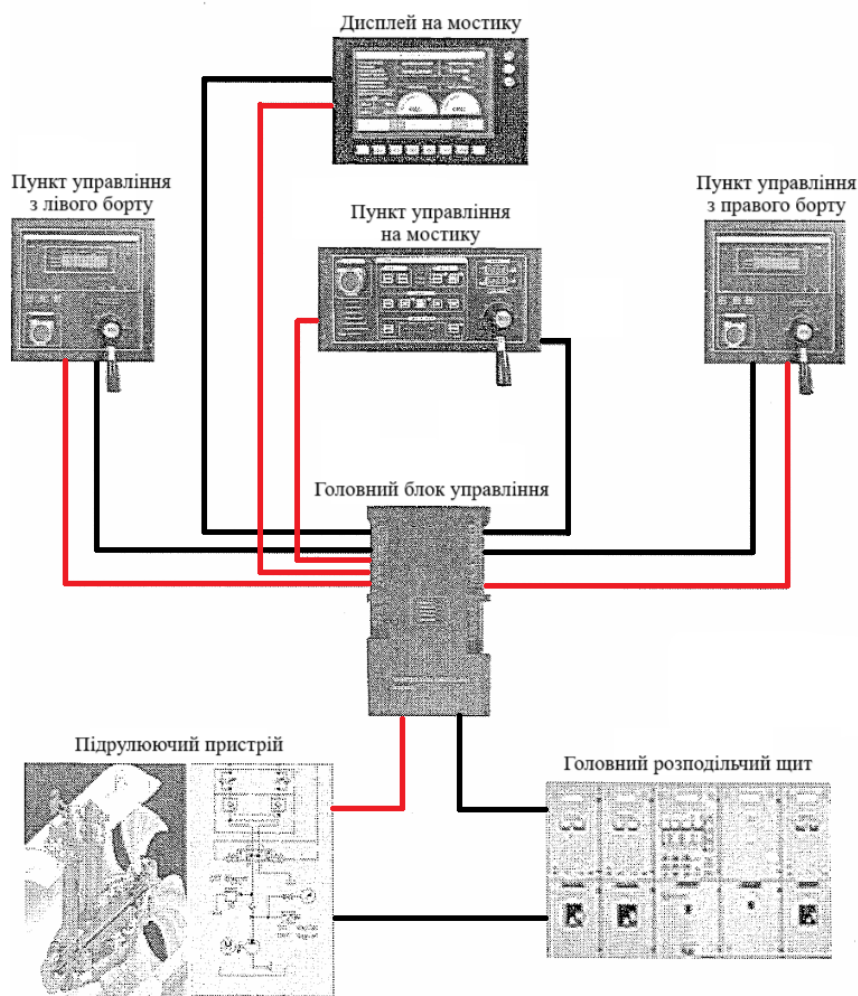


Рисунок 1.3 – Структура системи керування кутом атаки підрулюючого пристрою

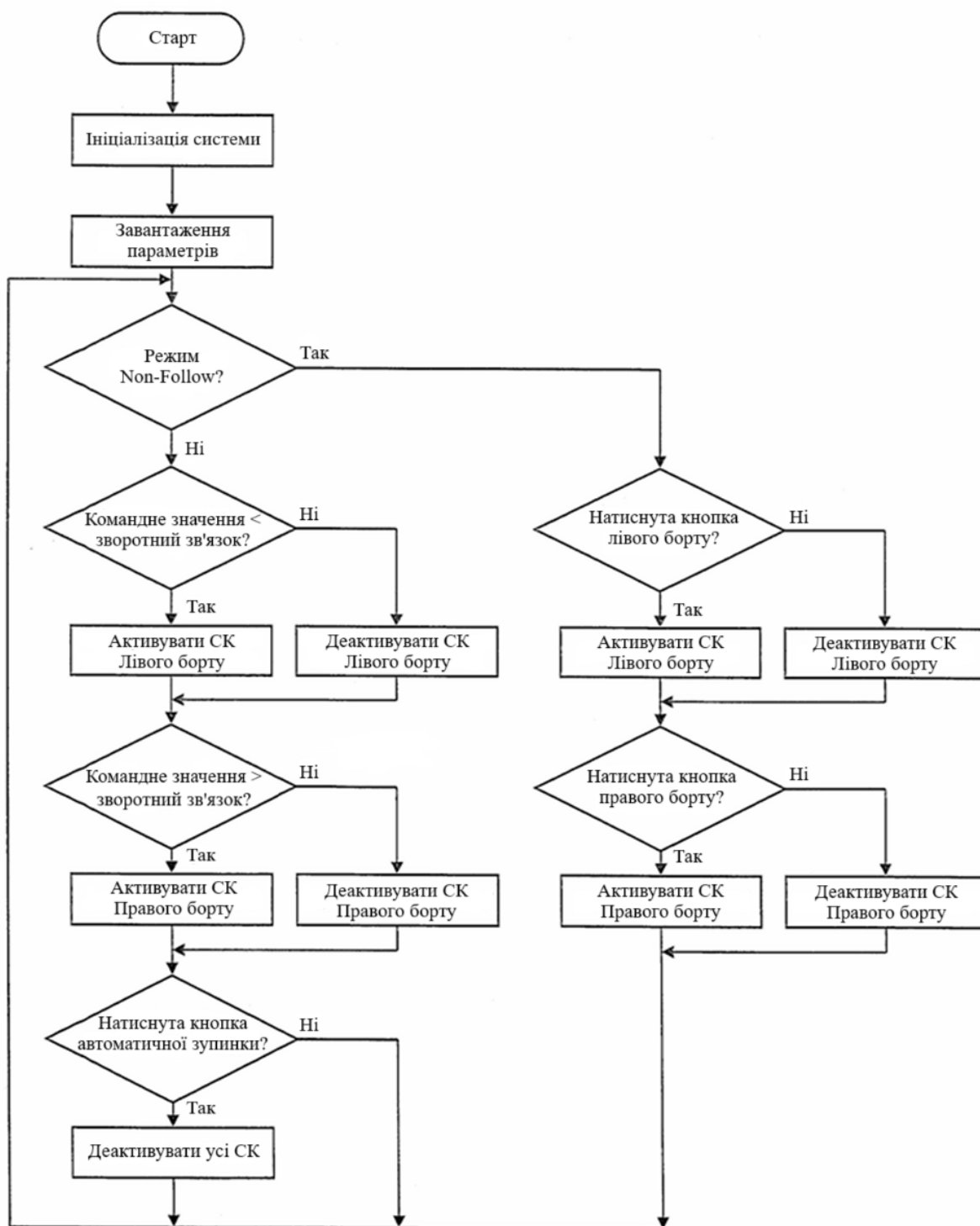


Рисунок 1.4 – Блок схема алгоритму керування системою регулювання кроку гвинта

Блок-схема ілюструє алгоритм роботи системи керування кутом лопатей гвинта підрулюючого пристрою на судні. Опис її функціонування можна розбити на такі кроки:

- 1) Ініціалізація системи

Першим етапом є запуск системи, під час якого вона ініціалізується та завантажує початкові параметри для роботи.

2) Перевірка режиму роботи "Non-Follow"

Визначається, чи працює система у режимі "Non-Follow".

- Якщо так, система переходить до подальших умов для керування.
- Якщо ні, то система працює в режимі "Follow up".

3) Експлуатація в режимі "Non-Follow"

В цьому режимі штурман вручну керує підрулюючим пристроєм, за допомогою панелі керування, обираючи кут та напрямок нагнітання (лівий чи правий борт) лопатей гвинта, а також активуючи відповідний сервопривід кутового регулювання соленоїдним клапаном.

4) Експлуатація в режимі "Follow up"

В цьому режимі керування відбувається автоматично, шляхом порівняння командного значення, виставленого сигналу зворотного зв'язку, котрий залежить безпосередньо від кута лопатей.

- 5) Якщо натиснута кнопка автоматичної зупинки, соленоїдний клапан деактивуються.

6) Завершення циклу

Після виконання усіх перевірок система повертається до початку алгоритму.

Вибір схеми пуску електродвигуна

Для вибору схеми підключення електродвигуна в умовах використання гвинта регульованого кроку необхідно враховувати специфіку системи. Оскільки регульований крок гвинта забезпечує оптимальне навантаження на двигун під час його роботи, головною вимогою в цьому випадку є

забезпечення плавного пуску електродвигуна. Це дозволить уникнути різких механічних навантажень, знизити знос компонентів і забезпечити стабільну роботу системи в цілому. Таким чином, ми зосередимо увагу на методах, які гарантують м'який запуск, зберігаючи ефективність і надійність усього механізму.

Коли індукційний двигун підключається безпосередньо до трифазної мережі змінного струму, спостерігається дуже великий пусковий струм статора, який у 5-7 разів перевищує номінальний струм. Це відбувається через максимальну швидкість перетинання магнітного потоку ($s = 100\%$) в роторі, що призводить до виникнення великих індукованих струмів ротора.

Відповідний коефіцієнт потужності мережі під час пуску дуже низький, зазвичай з відставанням 0,2, який зростає приблизно до 0,5 при холостому ході і близько 0,85 при повному навантаженні.

Цей пусковий струм зменшується зі збільшенням швидкості обертання двигуна до номінальної.

Робота двигуна при малих навантаженнях і низькому коефіцієнті потужності є неефективною, оскільки струм мережі відносно високий, що призводить до значних втрат в міді. Єдиний спосіб підвищити коефіцієнт потужності двигуна при малих навантаженнях – зменшити напругу живлення. Це можна досягти за допомогою електронного регулятора напруги, який називається пристроєм плавного пуску, який може підлаштовувати напругу живлення під умови пуску і навантаження. Такий регулятор спрямований на підтримання максимально високого коефіцієнта потужності для зменшення струму мережі та пускових струмів.

Два методи зменшення пускової напруги шляхом перемикання називаються пуском зі з'єднанням обмоток статора "зірка-трикутник" та

пуском за допомогою автотрансформатора. Однак також використовується електронний варіант "плавного" пуску.

Стартери за схемою "зірка-трикутник"

Зірка і трикутник є найпоширенішими і застосовуваними на практиці схемами підключення трифазних електродвигунів. При підключенні трифазного електродвигуна "зіркою" кінці обмоток статора з'єднуються разом, з'єднання відбувається в одній точці, яка називається нульовою точкою або нейтраллю. Трифазна напруга подається на початок обмоток.

При з'єднанні обмоток статора "зіркою", співвідношення між лінійною і фазною напругами виражається формулою:

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}} \cdot \sqrt{3} \quad (1.1)$$

де

$U_{\text{л}}$ – напруга між двома фазами;

$U_{\text{ф}}$ – напруга між фазою та нейтральним проводом;

Значення лінійного та фазного струмів співпадають, тобто $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$.

Виходить, що з'єднуючи обмотки "зіркою", зменшується лінійний струм, чого спочатку і добивалися. Але є і зворотний бік цієї схеми: з (2.1) видно, що пусковий момент двигуна прямо пропорційний квадрату фазної напруги:

$$M_n = \frac{m \cdot U^2 \cdot r_2 \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f ((r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2)} \quad (1.1)$$

Де

U – фазна напруга обмотки статора;

r_1 – активний опір фази обмотки статора

r_2 – наведене значення активного опору фази обмотки ротора;

x_1 – індуктивний опір фази обмотки статора;

x_2 – наведене значення індуктивного опору фази обмотки нерухомого ротора;

m – кількість фаз;

p – число пар полюсів.

Відповідно, при пуску двигуна за схемою «зірка», фазна напруга у $\sqrt{3}$ разів менша за лінійну. Звідси випливає, що момент при пуску за схемою "зірка" в 3 рази менше, а значить, запускаючи двигун за цією схемою, неможливо досягти виходу двигуна на номінальну потужність.

Стартери на основі автотрансформатора

Автотрансформатор – це тип трансформатора, в якому первинна і вторинна обмотки мають спільні витки. Його основною особливістю є те, що він дозволяє регулювати напругу, що подається на електродвигун, поступово збільшуючи її до номінальної. Цей процес значно зменшує пусковий струм. Така схема дешевша та менша за вагою, ніж еквівалентний трансформатор з повною обмоткою, і працює тільки під час початкового пускового інтервалу.

У морській галузі автотрансформаторний пуск застосовується для керування судновими двигунами і підрулюючими пристроями, де необхідно знизити навантаження на електромережу під час запуску великих агрегатів.

Переваги автотрансформаторного пуску двигуна:

- 1) Зниження пускового струму: Завдяки поступовому збільшенню напруги, зменшується струмове навантаження на двигун та мережу. Це

особливо важливо для великих двигунів, де пусковий струм може викликати значні коливання напруги в мережі.

- 2) Механічна надійність: Плавний пуск допомагає уникнути різких механічних ударів на обмотки двигуна, підшипники та інші частини обладнання. Це продовжує термін служби двигуна та зменшує ризик поломок.
- 3) Економічність: Автотрансформатор є відносно простим і доступним пристроєм. У порівнянні з іншими методами плавного пуску, автотрансформатор є дешевшим і не потребує складного обслуговування.
- 4) Універсальність застосування: Автотрансформатори можуть бути використані для двигунів різної потужності, від малих до великих, і підходять для різних промислових застосувань.

Недоліки автотрансформаторного пуску двигуна:

- 1) Розміри і вага: Автотрансформатор для потужних двигунів має потужність, більшу за встановлену потужність двигуна, що робить його менш зручним для монтажу в обмежених просторах.
- 2) Перехідні процеси: При відключенні автотрансформатора і підключенні двигуна безпосередньо до мережі можуть виникати короточасні стрибки струму, хоча вони й значно менші, ніж при прямому пуску.
- 3) Обмежена гнучкість: Автотрансформатор пропонує лише фіксовані рівні зниження напруги (зазвичай 50%, 65% і 80%). Це може бути недоліком у випадках, де потрібна більш точна регуляція.

1.2. Основні показники якості електроенергії в розподільчих мережах енергоємних промислових підприємств

Забезпечення високої якості електроенергії є ключовою умовою стабільної роботи енергоємних промислових підприємств. В умовах активного розвитку сучасного виробництва, що характеризується високою часткою автоматизованого обладнання, якість електропостачання визначає надійність та ефективність технологічних процесів. Якість електроенергії регламентується стандартами EN 50160:2014 [4] та ДСТУ 13109-97 [5], що визначають низку нормованих показників, серед яких найважливішими є наступні [6]:

- відхилення напруги;
- коливання напруги;
- коефіцієнт несинусоїдальності напруги;
- коефіцієнт несиметрії напруги;
- частота напруги.

Відхилення напруги

Відхилення напруги (ΔU) є одним з основних параметрів, що характеризує якість електропостачання, і визначається співвідношенням:

$$\Delta U = \frac{U_{\text{ФАКТ}} - U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100\%$$

де: $U_{\text{ФАКТ}}$ – фактична напруга в точці приєднання споживача, В; $U_{\text{НОМ}}$ – номінальна напруга, В.

Допустимі значення відхилень напруги для промислових підприємств становлять $\pm 5\%$ відповідно до ДСТУ EN 50160.

Коливання напруги (флікер)

Коливання напруги (флікер) є наслідком різких змін навантаження, які характерні для підприємств із потужним електромеханічним обладнанням, таким як електроплавильні печі, зварювальні агрегати тощо. Показник

флікера оцінюється через короткочасний (P_{st}) і довготривалий (P_{lt}) показники, що визначаються за формулами:

Короткочасний показник

$$P_{ST} = \sqrt[3]{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^3}$$

Довготривалий показник

$$P_{LT} = \sqrt[3]{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M S_{ST,j}^3}$$

де: S_i – миттєве значення відчуття флікера; N – кількість миттєвих вимірювань за 10 хвилин; M – кількість інтервалів вимірювання P_{st} за 2 години.

Допустимі значення: $P_{ST} \leq 1, P_{LT} \leq 0,8$

Коефіцієнт несинусоїдальності напруги

Коефіцієнт несинусоїдальності (THD) визначає ступінь спотворення форми напруги та розраховується за виразом:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n U_h^2}}{U_1}$$

де: U_h – середньоквадратичне значення гармоніки h -го порядку, В; U_1 – середньоквадратичне значення першої (основної) гармоніки, В.

За стандартом ГОСТ 13109-97 допустимі значення THD_U не повинні перевищувати 8% для напруги 0,4 кВ і 5% для мереж понад 1 кВ.

Частота напруги

Частота електричної напруги є визначальним параметром для роботи багатьох типів обладнання, особливо електродвигунів. Частота вимірюється в герцах (Гц), і відхилення її значень визначається формулою:

$$\Delta f = f_{\text{ФАКТ}} - f_{\text{НОМ}}$$

де: $f_{\text{ФАКТ}}$ – фактичне значення частоти, Гц; $f_{\text{НОМ}}$ – номінальне значення частоти, Гц.

Допустимі межі зміни частоти визначені стандартом $\pm 0,2$ Гц.

Отже, для енергоємних промислових підприємств забезпечення високої якості електроенергії є надзвичайно важливим для надійної роботи технологічних процесів та обладнання. Контроль і дотримання зазначених нормованих показників якості електроенергії дозволяє знизити ризики аварійних ситуацій, підвищити енергоефективність підприємств, збільшити термін служби обладнання та забезпечити його безаварійну експлуатацію. Подальші дослідження варто спрямовувати на вдосконалення методів автоматичного регулювання якості електроенергії з урахуванням особливостей роботи енергоємного обладнання та перспективних технологій.

1.2. Вплив пускових процесів потужних електроприводів на електромеханічне та технологічне обладнання

Періодичні пускові процеси потужних електроприводів створюють значний вплив на різноманітні аспекти функціонування технологічного та електромеханічного обладнання. Процеси пуску електроприводів зумовлюють збільшений рівень енергоспоживання, зменшують надійність і технічний ресурс обладнання, призводять до підвищення аварійності електромеханічного обладнання та технологічного обладнання, збільшують витрати на обслуговування устаткування.

Аналіз аварійних ситуацій на підприємствах гірничорудного та хімічного виробництва, виконаний у роботах [1, 8, 9], дозволяє констатувати

значний негативний вплив прямих пусків нерегульованих електроприводів на працездатність електромеханічного обладнання та технологічних механізмів.

Основною причиною відмов АД і СД є пошкодження обмотки статора унаслідок пробоя ізоляції обмотки [9]. Процес руйнування ізоляції суттєво прискорюється з концентрацією навантажень під час пускових процесів: підвищенні механічних зусиль, значного термічного впливу пускових струмів, підвищенні рівня вібрації та ін.

Другою за важливістю причиною аварійності потужних електроприводів є механічні ушкодження підшипникових вузлів [9]. Вихід з ладу підшипникових вузлів безпосередньо пов'язаний з дією знакозмінних складових рушійного моменту, що виникає під час пуску електроприводу.

Інтенсивне зношування вузлів і елементів електроприводу відбувається саме під час пуску електроприводу. Процеси вібраційного і теплового старіння найбільше проявляються в умовах важкого пуску.

Інтенсифікація теплового старіння зумовлена значною тепловою енергією, що виділяється під час пуску та максимальним погіршенням умов охолодження, навіть за наявності примусової вентиляції. У результаті додаткового нагрівання обмоток під час пуску відбувається розм'якшення, плавлення, зміна міцності до розтягнення, розтріскування ізоляції, що призводить до зміни її фізичних і електричних властивостей та інтенсивнішого старіння.

Під час пуску двигуна в початковий момент в електроприводі виникають вібраційні складові електромагнітного моменту [10] унаслідок:

- збільшення навантаження, при якому часова характеристика моменту опору має експоненціальний фронт з малою постійною часу;

- ударних знакозмінних моментів, що мають синусоїдальну форму з частотою, яка на самому початку процесу пуску може бути прийнята рівною частоті мережі;
- імпульсного електромагнітного моменту.

Неідеальність мереж електропостачання, а саме – відхилення фактичних параметрів напруги живлення від номінальних значень, наявність несиметрії фазних напруг, складний гармонійний склад напруги – усе це різною мірою знижує створюваний електродвигуном рушійний момент, збільшує тривалість процесу пуску, погіршує умови роботи ізоляційної конструкції електродвигуна, а, отже, впливає на його надійність і технічний ресурс.

Режим роботи електроприводу в умовах несиметричного живлення якісно відрізняється від режиму симетричного живлення, оскільки електромагнітний момент, який створюється струмами зворотної послідовності, є гальмівним. Отже, несиметрія напруг джерела живлення призводитиме до збільшення часу процесу пуску, додаткового нагрівання електродвигуна. Несиметрія напруги живлення не тільки погіршує пускові характеристики електроприводу, а й суттєво впливає на його надійність і технічний ресурс. Так, термін служби повністю завантаженого асинхронного двигуна, що працює з несиметрією напруги 4%, скорочується в 2 рази [11].

Несинусоїдальність напруг джерела живлення також істотно впливає на режими роботи електродвигунів. Струми деяких вищих гармонік створюють магнітні поля зворотної послідовності та зменшують сумарний рушійний момент електродвигуна. За наявності в кривій напруги вищих гармонік процес старіння ізоляції також відбувається інтенсивніше, ніж у разі роботи електроустаткування із синусоїдальною напругою [12, 13].

Аналіз науково-технічної літератури показує, що процеси пуску також призводять до суттєвого зменшення надійності технологічного обладнання.

Отже, аналіз сучасної науково-технічної літератури дозволяє зробити висновок, що процеси пуску значно впливають на надійність і залишковий технічний ресурс електромеханічного та технологічного обладнання. Причому незначні за своєю тривалістю пускові процеси супроводжуються непропорційно значним впливом на надійність і технічний ресурс обладнання.

Виконаний аналіз наукової літератури показав, що процеси пуску потужних електроприводів створюють суттєвий негативний вплив на технічний стан електромеханічного й технологічного обладнання та його залишковий технічний ресурс, пов'язаний як з особливими тепловими режимами роботи ізоляційних конструкцій електродвигуна, так і з механічним впливом змінних складових пускового моменту на елементи механічної трансмісії.

Саме це й зумовлює значний інтерес дослідників до розробки та удосконалення пристроїв керування пуском, створює умови до подальшого розвитку ринку пристроїв керованого пуску для електроприводів різноманітних типів.

1.3. Методи і пристрої формування пускових процесів електроприводів

До процесів пуску електродвигунів висувають суперечливі вимоги: з одного боку, забезпечення необхідної величини пускового моменту, а з іншого – зменшення пускового струму до допустимої величини. Для обмеження пускового струму використовують різноманітні схеми з додатковими елементами у статорному колі електродвигуна.

Найбільш суттєвий прогрес у розвитку систем формування пускових процесів електроприводів нерозривно пов'язаний з розробкою силових напівпровідникових елементів і перетворювальних пристроїв на їх базі, що суттєво розширило сферу використання пристроїв керування пуском електроприводів. Для систем електроприводів розроблені комплексні та

багатофункціональні системи пуску потужних високовольтних електродвигунів.

Найбільш поширеним схемним рішенням для пристроїв плавного пуску потужних електроприводів змінного струму є використання тиристорних регуляторів напруги для плавного збільшення діючого значення напруги живлення двигуна в процесі пуску. Основи проектування та роботи пускових пристроїв на базі тиристорних регуляторів напруги викладені в роботах Герасимяка Р.П., Петрова Л.П., Шубенко В.А., Браславського І.Я., Мейстеля А.М. Вітчизняні системи тиристорного плавного пуску, розроблені проф. Барським В.А., для підвищення пускового моменту двигуна забезпечують максимальну напругу на початку руху з подальшим переходом на звичайний плавний пуск з експоненціальним характером підвищення напруги живлення. Сучасні пускові пристрої відомих фірм Schneider Electric, ABB, Siemens та ін., забезпечують формування пускових характеристик і плавний пуск електроприводу за умови, якщо момент рушання перевищує вказане значення, пусковий пристрій автоматично переходить у режим «повновольтажного байпасного старту».

Подальший розвиток схемотехніки перетворювальних пристроїв щодо створення багаторівневих інверторів струму і напруги, дозволяє формувати найскладніші закони зміни напруги і частоти на виході пускового пристрою.

Пристрій плавного пуску «Soft-Starter WEG 7000» – це високоефективний продукт, який дозволяє запускати та зупиняти, здійснювати керування і захист трифазних асинхронних двигунів середньої напруги [14], запобігає механічним ударам навантаження, знижує пікові значення струму в лінії живлення і пошкодження двигуна.

Контроль напруги двигуна виконується з регулюванням кута керування тиристорів з антипаралельним з'єднанням.

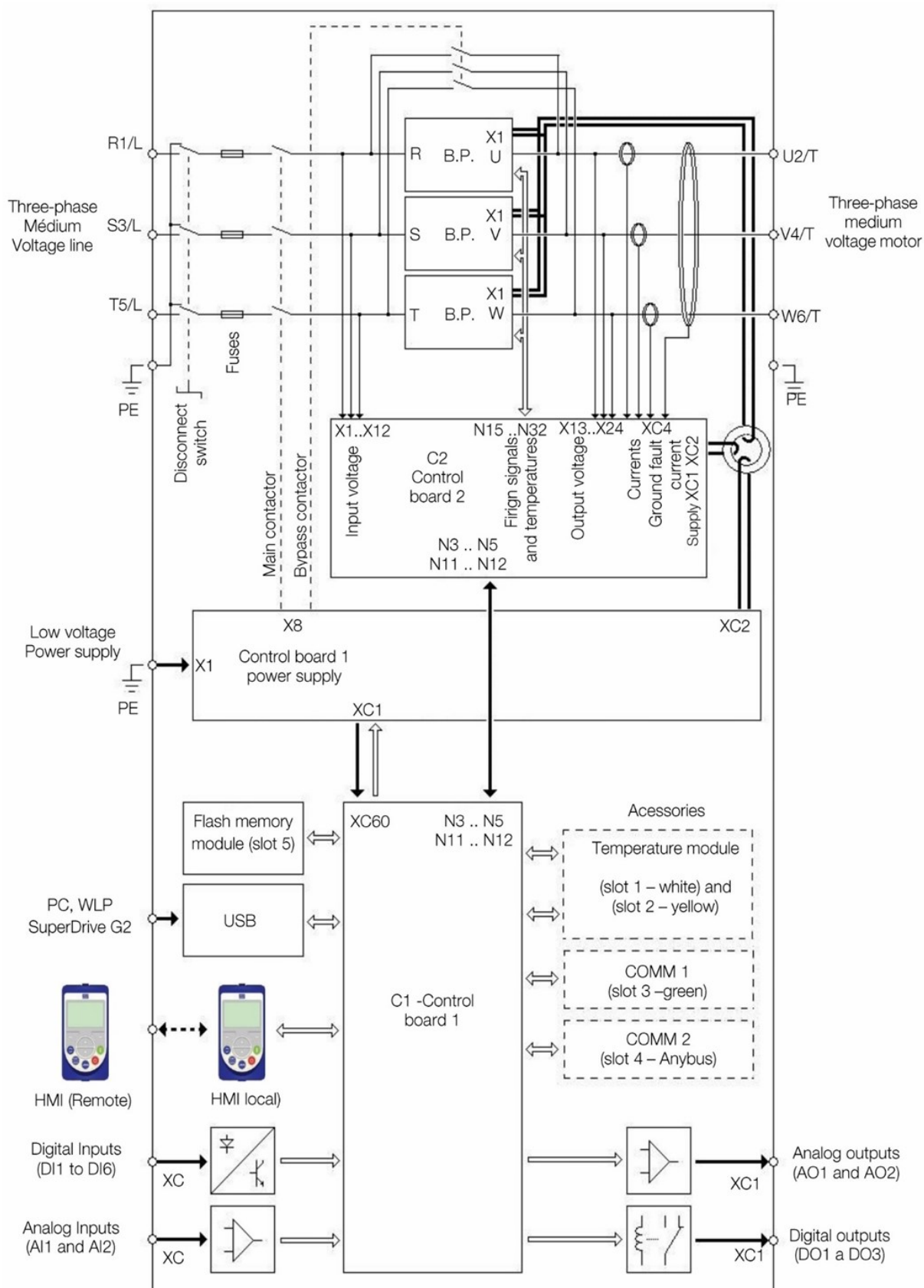


Рисунок 1.5 – Спрощена функціональна схема пускового пристрою серії
Soft-Starter WEG 7000

Основні конструктивні особливості:

- комплексний байпас;
- автоматичні вимикачі не потрібні, тому що є лінійний контактор;
- захист двигуна, убудований у стандартний корпус;
- зручна конфігурація та експлуатація;
- волоконно-оптичне з'єднання;
- повна ізоляція між відсіками високої та низької напруг.

Використання пускового пристрою SSW7000 надає такі переваги перед прямим пуском електродвигунів:

- механічні переваги – зменшення механічних зусиль у приводі, мінімізує витрати на ремонт; збільшується термін служби двигуна; забезпечує плавне збільшення швидкості двигуна;
- електричні переваги – поліпшення якості електроенергії; зменшення впливу на трансформатори, лінії електропередачі та двигун; зменшення падіння напруги; збільшує термін служби двигуна; повна ізоляція між відсіками середньої та низької напруги;
- переваги технологічного процесу – продуктивність і час безвідмовної роботи можуть бути значно збільшені; зменшення витрат, пов'язаних з обслуговуванням, простоями та заміною деталей; збільшений термін служби обладнання; запобігає стрибкам тиску від насосів і трубопроводів; запобігає ривкам і прослизанням конвеєрних стрічок.

Принципову схему силової частини пускового пристрою SSW7000 зображено на рис. 1.6.

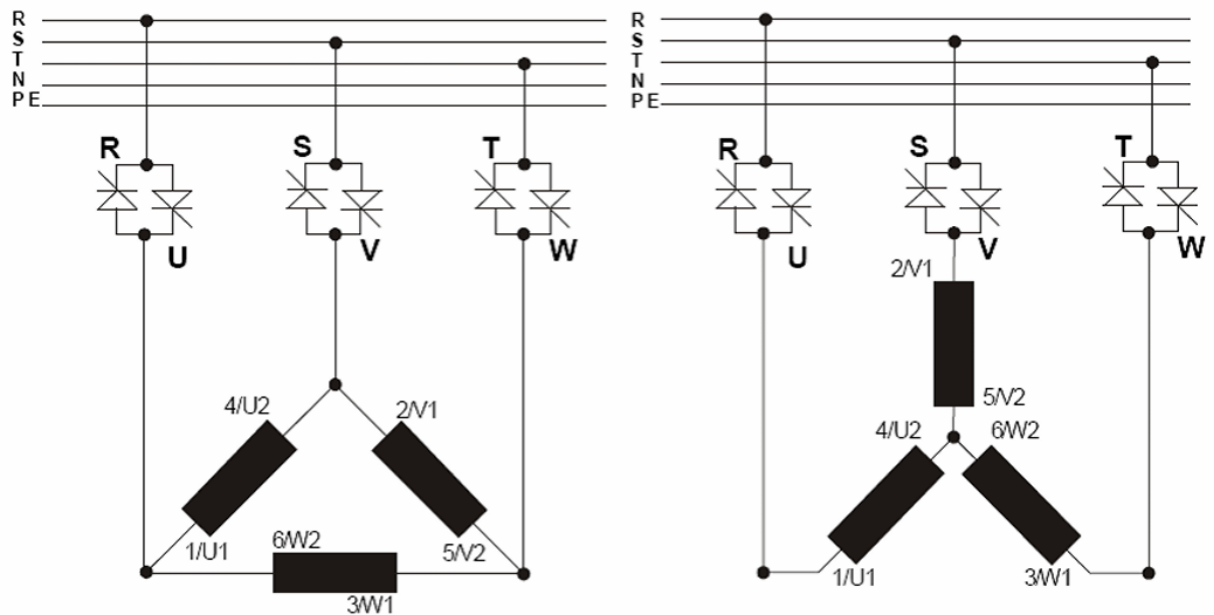


Рисунок 1.6 – Принципова схема силової частини пускового пристрою SSW7000, WEG і варіанти підключення до двигуна

Таким чином, сучасні пристрої плавного пуску надають широкі можливості налаштування пускової діаграми. Загальноприйнятим принципом керування процесом пуску з використанням напівпровідникових перетворювачів є плавне збільшення напруги на затискачах електродвигуна, щоб плавно зрушити і розігнати електродвигун до його номінальних обертів. Складніші пристрої цього типу дозволяють, за необхідності, сформувати під час включення пристрою короткочасний (до 0,1 с) «поштовх» – імпульс номінальної напруги тривалістю t_T секунд, щоб забезпечити гарантоване рушення електродвигуна (рис.1. 15).

Основні параметри пускової діаграми – початкова напруга U_0 і час пуску t_S . Пристрої з такою силовою схемою використовують для пуску електроприводів з невеликим навантаженням, оскільки рушійний момент двигуна змінюється пропорційно квадрату прикладеної до статора напруги.

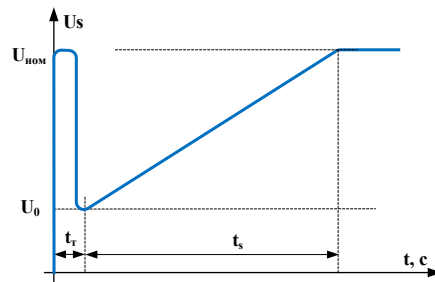
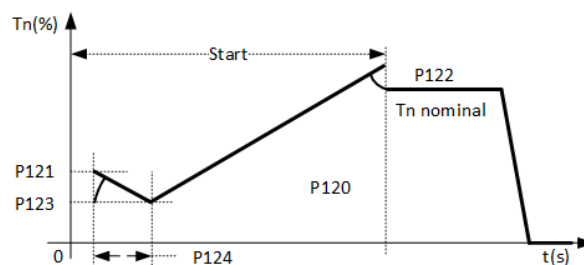
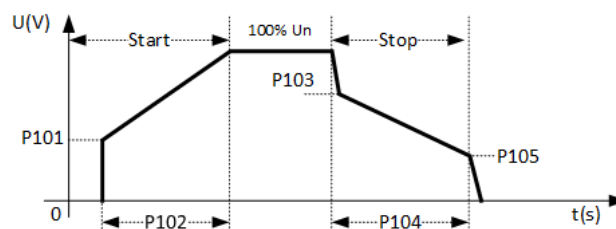


Рисунок 1.7 – Діаграма регулювання напруги тиристорного регулятора для плавного пуску електродвигуна

Для пуску електроприводів механізмів з важкими умовами пуску використовують пускові пристрої, які використовують силові схеми з перетворювачами частоти та системи скалярного або векторного керування рушійним моментом. Такі пристрої дозволяють створювати складніші діаграми керування пуском. На рис. 1.8 наведено варіанти пускових діаграм, які можуть бути реалізовані у пусковому пристрої SSW7000, WEG [14]. Складніший та функціональніший пусковий пристрій SSW7000 вимагає задання значно більшої кількості параметрів пускової діаграми.



а) Налаштування пускової діаграми крутного моменту для механізмів з квадратичним крутним моментом



б) налаштування пускової діаграми напруги статора для пуску та гальмування електродвигуна насоса

Рисунок 1.8 – Варіанти налаштування діаграм керування пуском за допомогою пристрою SSW7000, WEG

На теперішній час найбільш розповсюдженим підходом до конструювання пускових пристроїв потужних електроприводів є використання тиристорних регуляторів напруги і високовольтних перетворювачів частоти [9, 15, 16]. Але простота конструкції тиристорних регуляторів напруги, відносно невелика вартість, особливо у порівнянні з пусковими пристроями, що реалізують частотне керування пуском, зумовлюють їх широке використання, насамперед у підрулюючих пристроях з гвинтами керованого кроку. Такі пристрої мають певні недоліки відносно характеристик пускового моменту і використовуються в основному для запуску електроприводів турбомеханізмів та механізмів з незначним пусковим навантаженням [2, 9].

Використання сучасних напівпровідникових пускових пристроїв створює додатковий вплив на живлячу мережу потужних електроприводів шляхом генерування у мережу вищих гармонійних струму та напруги, спотворює процеси споживання реактивної потужності [10, 11].

Потенціал подальшого розвитку систем керованого пуску та покращення їх характеристик, пов'язаний з удосконаленням конструкції їхньої силової частини, що дозволить зменшити вплив пускових пристроїв на судову електроенергетичну мережу.

1.4. Вплив тиристорних регуляторів напруги на показники якості електроенергії

Вплив тиристорних регуляторів напруги на показники якості електроенергії у розподільчих мережах є актуальною темою сучасної електроенергетики. Тиристорні регулятори, завдяки своїй здатності оперативно та плавно керувати пусковими процесами потужних електроприводів, широко застосовуються на енергоємних підприємствах, об'єктах комунального господарства та у побутових споживачів. Основна функція цих пристроїв полягає у регулюванні вихідної напруги шляхом зміни

кута відкривання тиристорів, що забезпечує необхідну потужність навантаження з мінімальними втратами енергії [1, 7, 17].

Використання пускових пристроїв на базі тиристорних регуляторів напруги надає наступні переваги:

1. Універсальність. Тиристорні регулятори напруги можна використовувати для керування пуском як асинхронних, так і синхронних електроприводів, що є особливо важливим для потужних електроприводів енергоємних виробництв.

2. Обмеження пускових струмів. Тиристорні регулятори напруги дозволяють знизити пускові струми електродвигунів шляхом поступового збільшення напруги під час запуску, що зменшує навантаження на електричну мережу та продовжує термін експлуатації обладнання.

3. Підвищення енергоефективності. Завдяки точному регулюванню напруги можна уникнути надлишкового споживання електроенергії, зменшуючи таким чином витрати на енергоресурси.

4. Відносно менша вартість у порівнянні з пусковими пристроями на базі частотних методів регулювання пусковими процесами.

Однак, використання тиристорних регуляторів напруги також має певні недоліки, призводить до низки негативних впливів на якість електроенергії, які потрібно враховувати при проектуванні та експлуатації електричних мереж:

1. Гармонічні спотворення: Однією з найбільш суттєвих проблем є поява вищих гармонік у напрузі та струмі через несиметричне включення тиристорів у мережу. Вищі гармоніки створюють додаткові втрати в трансформаторах, лініях електропередачі, а також призводять до перегріву обладнання, скорочуючи його ресурс. Крім того, гармоніки негативно впливають на роботу чутливих до якості електроенергії приладів і систем автоматики.

2. Флікер напруги. Фазове регулювання тиристорними пристроями викликає флуктуації напруги, відомі як флікер, що негативно впливають на якість освітлення та призводять до дискомфорту користувачів. Особливо гостро ця проблема проявляється в освітлювальних мережах, де зміна яскравості світла помітна неозброєним оком, [70].

3. Несиметрія напруг та струмів. Внаслідок неоднакового керування тиристорами в трифазних системах виникає несиметрія, що веде до нерівномірного розподілу струмів по фазах, додаткових втрат енергії та погіршення роботи електричних машин і трансформаторів.

4. Зниження коефіцієнта потужності. Використання тиристорних регуляторів часто супроводжується збільшенням реактивної потужності в мережі, що спричиняє зниження загального коефіцієнта потужності. Для компенсації цього явища необхідно встановлювати додаткові пристрої компенсації реактивної потужності, що призводить до підвищення вартості та складності розподільчих систем електропостачання.

Для мінімізації негативного впливу тиристорних регуляторів напруги необхідно впроваджувати комплекс заходів, серед яких використання фільтрів вищих гармонік, симетруючих пристроїв та засобів компенсації реактивної потужності. Також актуальним є перехід до більш сучасних схем тиристорних пристроїв із використанням спеціальних алгоритмів керування, що дозволяють зменшити негативний вплив на якість електроенергії.

Отже, тиристорні регулятори напруги, незважаючи на очевидні техніко-економічні переваги, потребують подальшого удосконалення при проектуванні, налаштуванні та експлуатації з метою покращення показників якості електроенергії.

1.5. Висновки

Проаналізовано різноманітні аспекти впливу пускових режимів потужного електроприводу підрулюючого пристрою на суднову електроенергетичну мережу. Обґрунтовано необхідність використання

спеціалізованих пускових пристроїв для зменшення негативного впливу пускових процесів. Розглянуто існуючі методи та сучасні технічні пристрої для керування пусковими режимами потужних електроприводів з різними типами навантаження. Обґрунтовано доцільність використання пускових пристроїв потужних електроприводів з використанням тиристорних регуляторів напруги.

Негативною стороною такого рішення є значний вплив тиристорних регуляторів напруги на показники якості електроенергії. Розглянуто показники якості електроенергії, які регламентується стандартами EN 50160:2014 та ДСТУ 13109-97. Виконано аналіз основних шляхів негативного впливу на показники якості електроенергії при використанні тиристорних регуляторів напруги, а саме гармонічні спотворення струмів та напруги, а також зниження коефіцієнту потужності.

Уведемо додаткові позначення:

$$\rho_S = 2\pi/M; \rho_R = 2\pi/N \quad (2.3)$$

Тоді напругу живлення статора в загальному вигляді запишемо як:

$$U_k = \sqrt{2} \cdot U_f \cdot \sin(\omega_c \cdot t - \rho_S \cdot (k-1)), \quad (2.4)$$

де $\omega_c = 2\pi \cdot f \cdot p$ – кутова швидкість обертання поля статора з частотою живильної мережі f при числі пар полюсів p .

Вектор-стовпець живильних напруг для короткозамкненого ротора являє собою нульовий вектор розмірністю N .

$$[U_R] = [0 \ 0 \ \dots] \quad (2.5)$$

Тоді вектор-стовпець живильних напруг у клітинно-матричній формі дорівнює

$$U = \begin{bmatrix} U_S \\ \vdots \\ U_R \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

і має розмірність $M+N$.

Аналогічно, вектор-стовпець струмів обмоток статора має розмірність M :

$$[I_S] = [I_1 \ I_2 \ \dots] \quad (2.7)$$

Вектор-стовпець струмів обмоток ротора розмірності N :

$$I_R = [I_{R1} \ I_{R2} \ \dots]^T \quad (2.8)$$

Вектор-стовпець струмів у клітинно-матричній формі дорівнює

$$I = \begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Квадратна діагональна матриця активних опорів $[R]$ має розмірність $(M+N) \times (M+N)$. Елементи головної діагоналі цієї матриці дорівнюють активним опорам відповідних обмоток, що дає змогу моделювати режими роботи АД із несиметричними активними опорами.

Аналогічно до струмів, вектор-стовпець потокозчеплень обмоток статора має розмірність M :

$$[\Psi_S] = [\Psi_1 \ \Psi_2 \ \dots]^T \quad (2.10)$$

Вектор-стовпець потокозчеплень обмоток ротора розмірності N :

$$\Psi_R = [\Psi_{R1} \ \Psi_{R2} \ \dots]^T \quad (2.11)$$

Вектор-стовпець потокозчеплень у клітинно-матричній формі дорівнює

$$\Psi = \begin{bmatrix} \Psi_S \\ \Psi_R \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Рівняння потокозчеплення для кожної обмотки може бути записано у формі:

$$\Psi_k = I_k \cdot L_k + \sum_{j=1}^{j=N, j \neq k} I_j \cdot M_{kj} \quad (2.13)$$

де Ψ_k , I_k , L_k - потокозчеплення, струм та індуктивність обмотки з індексом k ;

I_j , M_{kj} струм j -го контура і взаємна індуктивність обмоток з індексами k і j .

Потокозчеплення кожної з обмоток умовно можна розділити на дві складові: утворені струмами обмоток нерухомими одна відносно одної та обмоток, що обертаються одна відносно одної зі швидкістю ротора.

Матриця власних індуктивностей статорних обмоток може бути записана в такому вигляді:

$$[L_{SS}] = [L_{\delta S}] + [M_{SS}] \quad (2.14)$$

де $\mathbf{L}_{\delta S}$ – квадратна діагональна матриця власних індуктивностей розсіювання розмірністю $M \times M$; елементи головної діагоналі цієї матриці дорівнюють індуктивностям розсіювання статорних обмоток; $\mathbf{M}_{SS}$ – квадратна матриця взаємних індуктивностей між статорними обмотками розмірністю $M \times M$; елементи цієї матриці дорівнюють взаємним індуктивностям між відповідними статорними обмотками. Оскільки статорні обмотки зсунуті в просторі одна відносно одної на величину ρ_S , то вираз взаємної індуктивності між статорними обмотками з індексами j і k можна записати таким чином:

$$\mathbf{M}_{SS}[j,k] = m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (k-j)); j=1 \dots \dots \dots (2.15)$$

Окремі доданки рівняння (2.14) у розгорнутій формі подано нижче.

$$\mathbf{L}_{\delta S} = \begin{bmatrix} l_{1\delta} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & l_{1\delta} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & l_{1\delta} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_{SS} = \begin{bmatrix} m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (1-1)) & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (2-1)) & \dots & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (M-1-1)) & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (M-1)) \\ m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (1-2)) & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (2-2)) & \dots & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (M-1-2)) & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (M-2)) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (1-(M-1))) & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (2-(M-1))) & \dots & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (M-1-(M-1))) & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (M-(M-1))) \\ m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (1-M)) & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (2-M)) & \dots & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (M-1-M)) & m_1 \cdot \cos(\rho_S \cdot (M-M)) \end{bmatrix}$$

Тут $l_{1\delta}$ – індуктивність розсіювання фази статора АД; m_1 – максимальне значення взаємної індуктивності між фазами статора.

Аналогічно, з урахуванням кількості фаз ротора, можуть бути подані й матриці власних індуктивностей роторних обмоток.

$$[\mathbf{L}_{RR}] = [\mathbf{L}_{\delta R}] + [\mathbf{M}_{RR}] (2.16)$$

де $\mathbf{L}_{\delta R}$ – квадратна діагональна матриця власних індуктивностей розсіювання розмірністю $N \times N$; елементи головної діагоналі цієї матриці дорівнюють індуктивностям розсіювання роторних обмоток; $\mathbf{M}_{RR}$ – квадратна матриця взаємних індуктивностей між роторними обмотками розмірністю $N \times N$;

елементи цієї матриці дорівнюють взаємним індуктивностям між відповідними роторними обмотками. Оскільки роторні обмотки зсунуті в просторі одна відносно одної на величину ρ_R , то вираз взаємної індуктивності між роторними обмотками з індексами j і k можна записати таким чином:

$$\mathbf{M}_{RR}[j, k] = m_2 \cdot \cos(\rho_R \cdot (k - j)); j = 1 \dots \dots \quad (2.17)$$

Далі необхідно скласти матрицю взаємних індуктивностей між обмотками статора й обмотками ротора, що обертаються.

Виходячи з геометричних міркувань, рис. 2.1, формулу для взаємної індуктивності між обмоткою ротора з номером n і обмоткою статора з номером m можна записати так:

$$M_{SmRn} = m_0 \cdot \cos(\gamma(t) - \rho_S(m-1) + \rho_R(n-1)) \quad (2.18)$$

де m_0 – максимальне значення взаємної індуктивності між обмотками статора і ротора при збігу їхніх осей; $\gamma(t)$ – миттєве значення кута повороту ротора.

Матриця взаємних індуктивностей між обмотками статора і ротора буде в загальному випадку прямокутною матрицею розмірності $M \times N$.

Тоді повна матриця взаємних індуктивностей багатофазного АД може бути представлена в такій клітинно-матричній формі:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{SS} & \mathbf{M}_{SR} \\ \mathbf{M}_{SR}^T & \mathbf{L}_{RR} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Ця матриця є квадратною і має розмірність $(M+N) \times (M+N)$.

Обертальний момент асинхронного двигуна може бути обчислений таким чином:

$$T_E = \frac{Z_p}{\sqrt{3}} [\Psi_A(I_B - I_C) + \Psi_B(I_C - I_A) + \Psi_C(I_A - I_B)] \quad (2.20)$$

або за більш загальним виразом

$$T_E = -\frac{3}{2}Z_p \cdot (\vec{\mathbf{r}}_1 \wedge \vec{\mathbf{I}}_1) - \frac{1}{2}Z_p \cdot (|\vec{\mathbf{r}}_1| \cdot |\vec{\mathbf{I}}_1| \cdot \sin(\alpha\Psi - \alpha\mathbf{I})) \quad (2.21)$$

Зображувальні вектори потокозчеплення і струму статора можуть бути визначені за їхніми миттєвими значеннями з урахуванням фазового зсуву величин потокозчеплення і струму окремих фаз асинхронного двигуна:

$$\vec{\mathbf{I}}_1 = \sum_{k=1}^n i_k \cdot e^{i(k-1)} \quad (2.22)$$

Рівняння руху частин АД, що обертаються, отримаємо на основі закону збереження імпульсу, яке, за сталості моменту інерції, збігається з відомим рівнянням другого закону Ньютона для обертального руху:

$$M - M_C = M_j = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.23)$$

При моделюванні АД у симетричних режимах роботи можливо використовувати математичну модель у ортогональній системі координат. У теорії моделювання електромагнітних і електромеханічних процесів в асинхронних машинах найчастіше використовують координатну систему « α , β , 0», нерухому відносно статора, що записується відносно потокозчеплень. Така система має вигляд (2.24).

$$\begin{cases} U_{s\alpha} = I_{s\alpha}R_s + \frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt}, \\ U_{s\beta} = I_{s\beta}R_s + \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt}, \\ U_{r\alpha} = I_{r\alpha}R_r + \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} + Z_p\omega\Psi_{r\beta}, \\ U_{r\beta} = I_{r\beta}R_r + \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} - Z_p\omega\Psi_{r\alpha}; \end{cases} \quad \begin{cases} I_{s\alpha} = \frac{1}{\sigma L_s}(\Psi_{s\alpha} - k_r\Psi_{r\alpha}), \\ I_{s\beta} = \frac{1}{\sigma L_s}(\Psi_{s\beta} - k_r\Psi_{r\beta}), \\ I_{r\alpha} = \frac{1}{\sigma L_s}(\Psi_{r\alpha} - k_s\Psi_{s\alpha}), \\ I_{r\beta} = \frac{1}{\sigma L_s}(\Psi_{r\beta} - k_s\Psi_{s\beta}). \end{cases} \quad (2.24)$$

де $A = \frac{I}{L_s L_r - L_\mu^2}$, R_s , R_r - активний опір фази відповідно статора і ротора; L_s , L_r - повна індуктивність обмоток відповідно статора і ротора; L_μ - взаємна індуктивність між обмотками статора і ротора.

При використанні такого математичного опису електромагнітної системи формування моменту двигуна має вигляд:

$$M = \frac{3}{2} \frac{Z_p k_r}{\sigma L_s} (\Psi_{r\alpha} \Psi_{s\beta} - \Psi_{r\beta} \Psi_{s\alpha}) \quad (2.25)$$

Саме така математична модель АД використовується у MATLAB/Simulink/Simscape Electrical [18].

Параметри Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна підрулюючого пристрою наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 Параметри математичної моделі асинхронного двигуна

№пп	Параметр	Значення
1	Активний опір статора, Ом	0,2
2	Індуктивність розсіювання статора, Гн	0,0085
3	Активний опір ротора, Ом	0,15
4	Індуктивність розсіювання ротора, Гн	0,0115
5	Індуктивність кола намагнічування, Гн	0,2455
6	Момент інерції, кгм^2	150

З використанням такої моделі та параметрів мережі змодельовано прямий пуск двигуна з автотрансформатором, який за паспортними даними під час пуску подає на двигун 65% номінальної напруги.

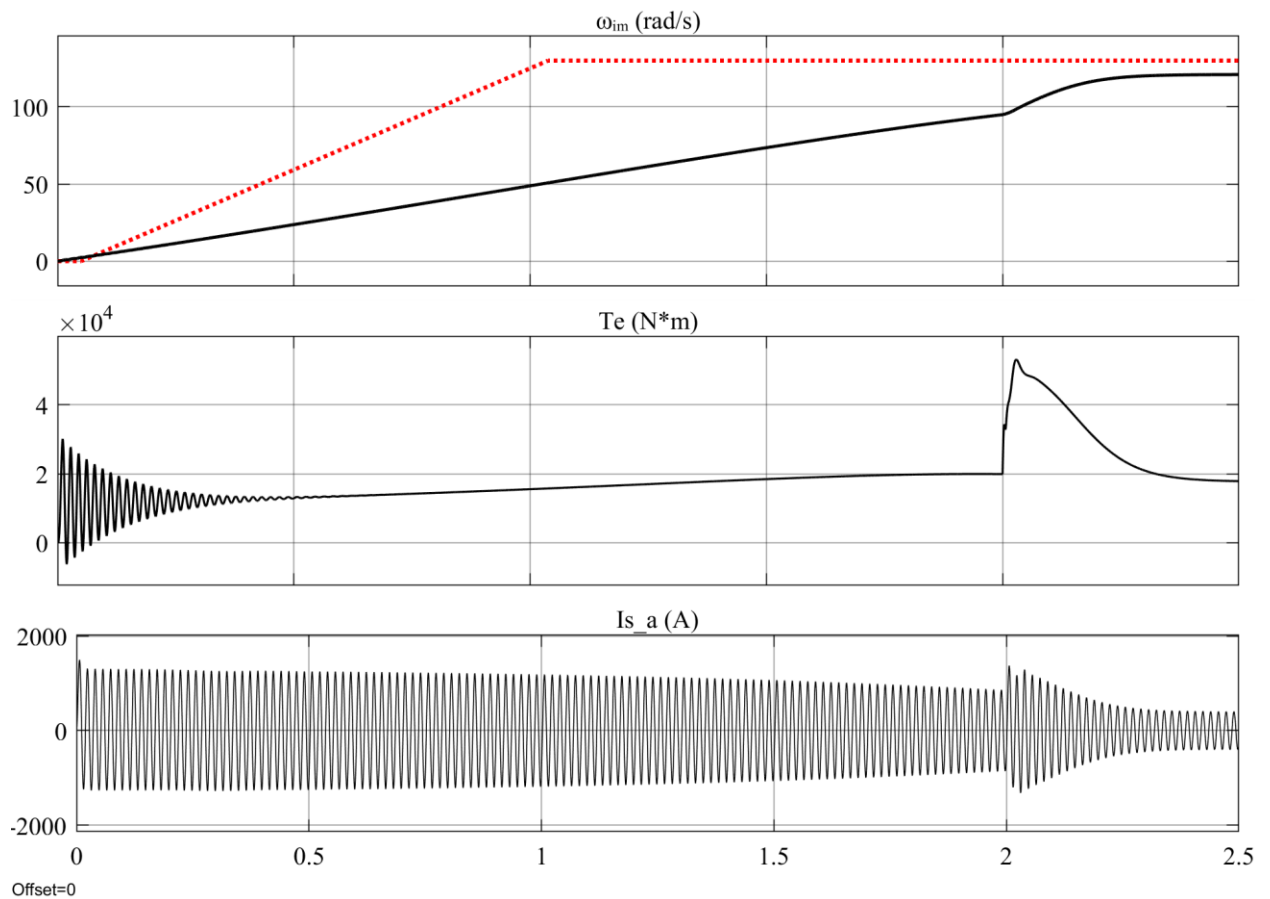


Рисунок 2.2 – Пуск підрулюючого пристрою з автотрансформатором:

0–2 s – 65% напруги, з 2 s – 100%

Аналіз отриманих перехідних процесів свідчить про те, що під час такого пуску може суттєво змінюватись його тривалість залежно від моменту опору, який в свою чергу залежить від напрямку руху судна, його швидкості. Налаштування часу перемикання на повну напругу може бути неточним, що може призводити до затягування процесу пуску, або навпаки, до передчасного перемикання при ковзанні нижче критичного, що призводить до додаткових стрибків і коливань моменту.

Також з отриманих графіків можна визначити максимальну реактивну потужність, вживану електроприводом під час пуску. Вона складає 1.4 MVAR на одну фазу при напрузі 65 % від номінальної. Відповідно, при номінальній напрузі, якщо не використовувати автотрансформатор,

реактивна

потужність

може

складати

$$Q_{\max} = Q_{0.65} \frac{1}{0.65^2} = 1.4 \frac{1}{0.65^2} = 3.3 \text{ MVAR.}$$

2.2. Моделювання тиристорного регулятора напруги

Модель електроприводу складається з основної системи і декількох функціональних підсистем (рис. 2.3).

Основні підсистеми – джерело живлення і кабелі, які представлено ідеальним джерелом та RL-навантаженням; пристрій плавного пуску; асинхронний двигун; компенсатор реактивної потужності; система вимірювання показників якості електричної енергії.

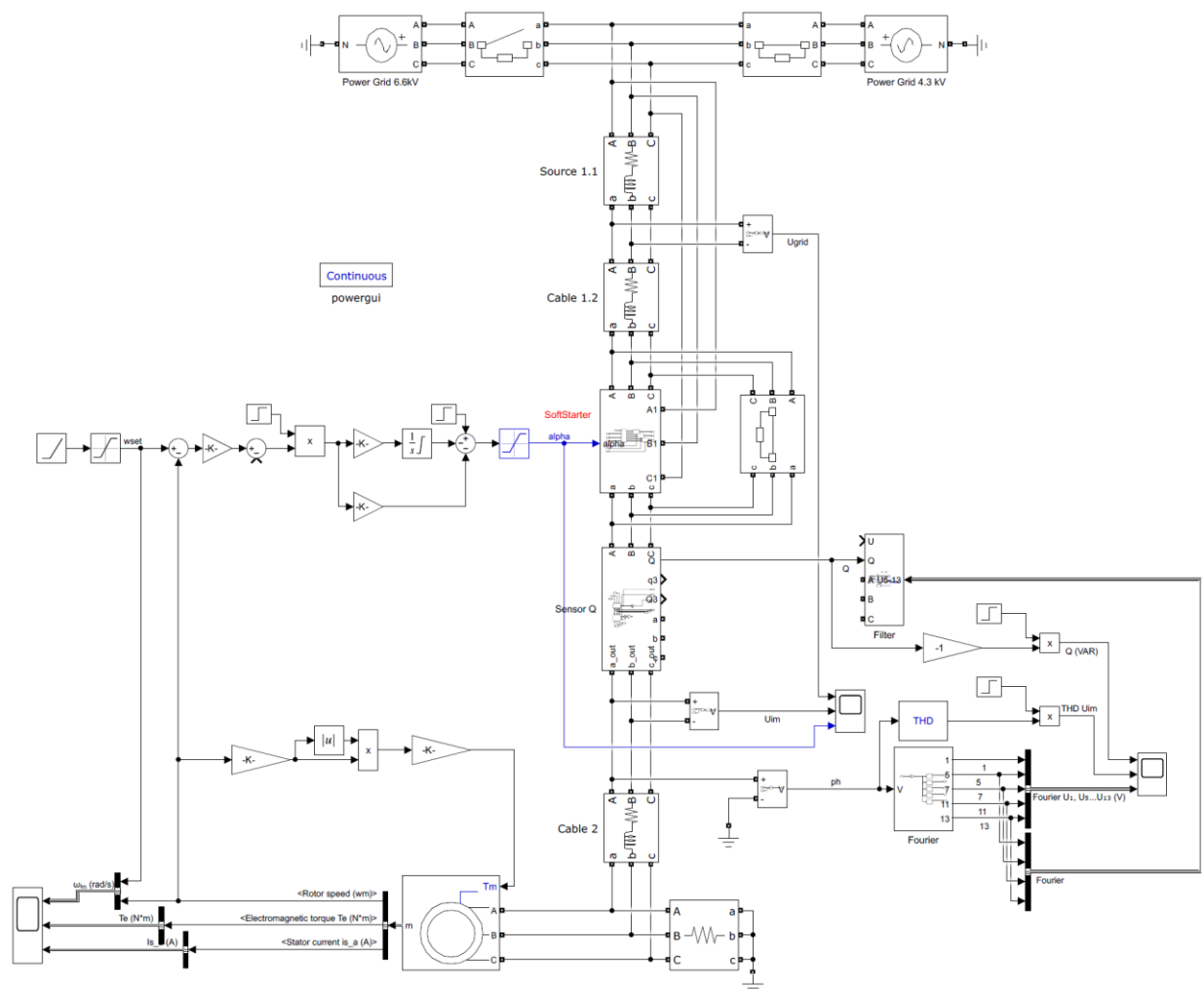


Рисунок 2.3 – Загальна модель електроприводу підрулюючого пристрою

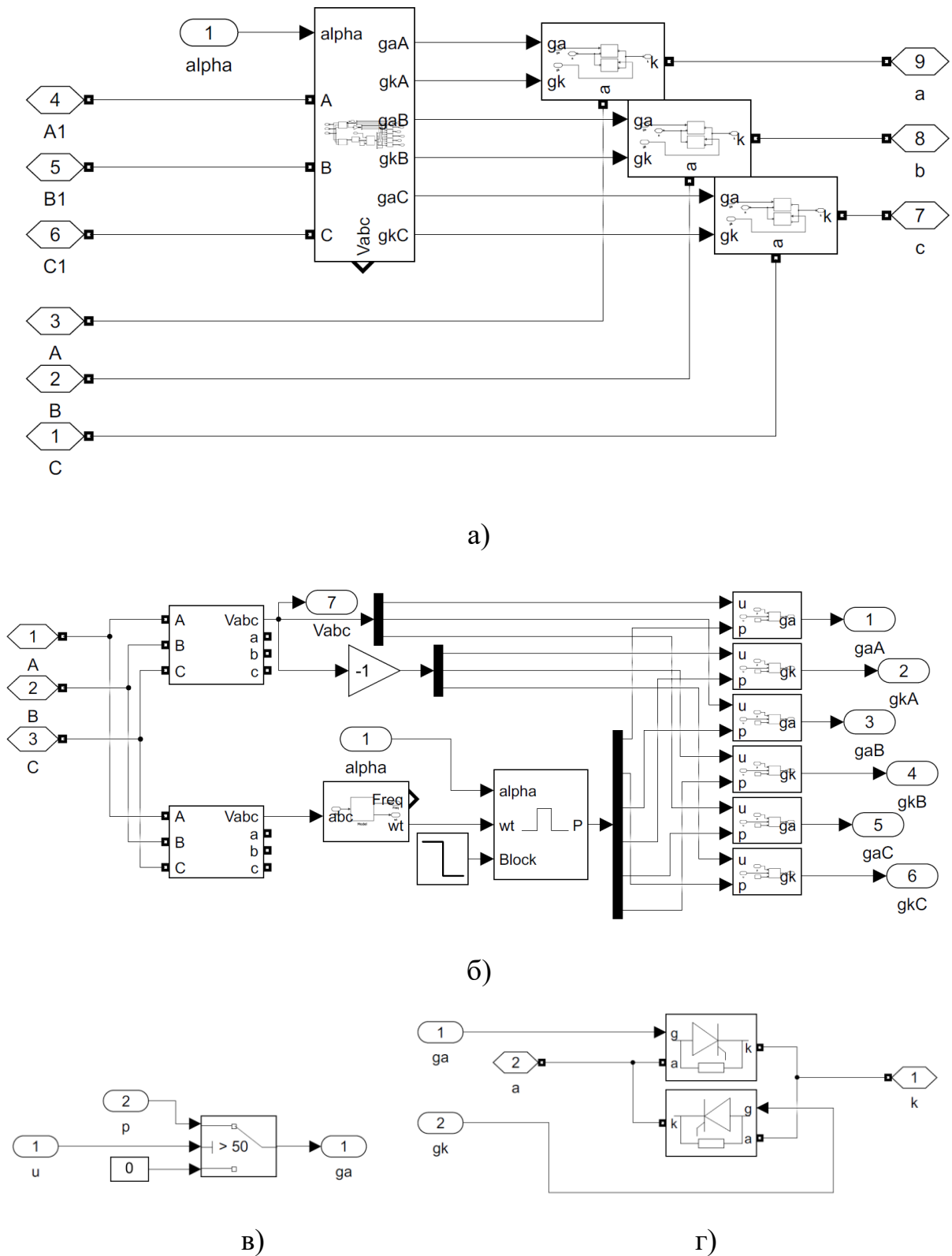


Рисунок 2.4 – Компоненти моделі тиристорного пристрою плавного пуску

Модель пристрою плавного пуску складається з силової частини і системи імпульсно-фазового керування (рис. 2.4, а), які в свою чергу

побудовано 3-х пар зустрічно паралельних тиристорів (рис. 2.4, г) та з використанням генератора зсунутих на заданий кут імпульсів керування від переходу фазової напруги через 0 до наступного переходу (рис. 2.4, б). Для гарантованого вимикання імпульсів використано логічну функцію множення з логічним сигналом, якій відповідає півперіоду фазної напруги мережі з урахуванням зони нечутливості 50 V (1.3 % від номінальної напруги або 0.75 градуса) (рис. 2.4, в). Зсув відбувається за допомогою типового з'єднання блоку “6-pulse generator” з “PLL” і трифазним датчиком лінійної напруги. Синхронізація відбувається за допомогою трифазного датчика напруги фаз та інвертора, який змінює знак напруги для генерування катодних імпульсів керування “gk”, а також компараторів з зоною нечутливості, які вмикають відповідні імпульси за умови позитивної напруги фази.

Для обґрунтування працездатності моделі змодельовано роботу тиристорного пристрою плавного пуску на активно-індуктивне навантаження при зменшенні кута керування від початкового значення 105° до 15° на протязі однієї секунди. Отримані результати наведено на рис. 2.5.

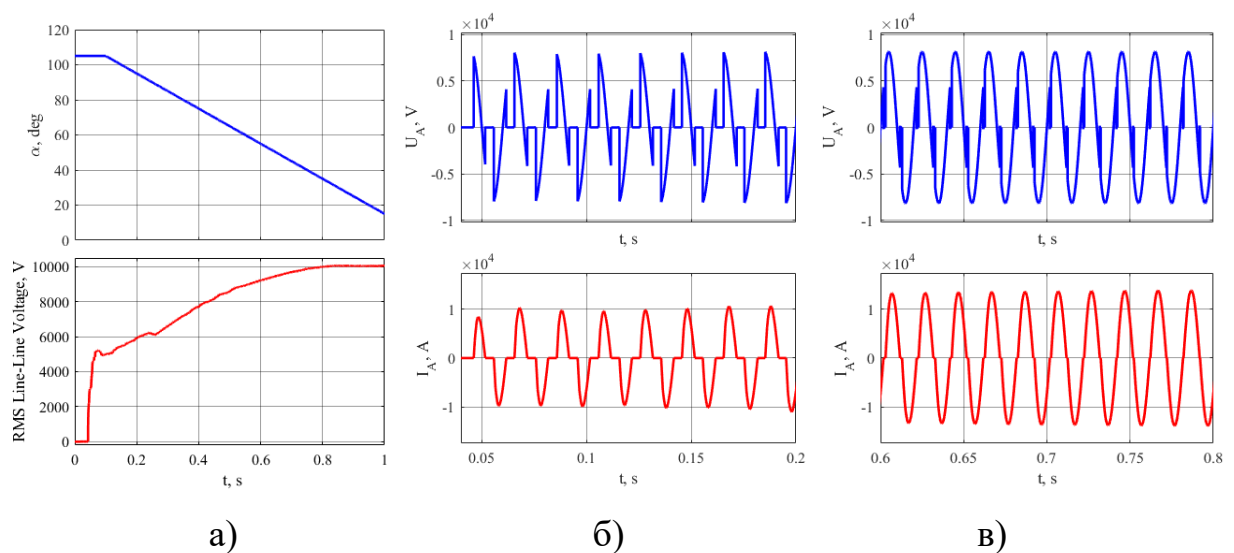


Рисунок 2.5 – Результати роботи тиристорного пристрою плавного пуску на активно-індуктивне навантаження: а) кут керування та діюче значення напруги; б) вихідна напруга та струм навантаження при кутах керування близько 90° ; в) вихідна напруга та струм навантаження при кутах керування близько 40° . Отримані результати повністю співпадають з теоретичними

уявленнями про роботу тиристорного регулятора наруги [7, 17, 19], що підтверджує адекватність розробленої моделі.

2.3. Підсистема вимірювання показників якості електроенергії

Згідно з відомостями про показники якості електроенергії, що наведені у розділі 1.2 та у відповідності до завдань дослідження, сформулюємо перелік даних, які має визначати підсистема вимірювання показників якості електроенергії: діюче значення лінійної напруги живлячої мережі для визначення відхилення напруги; показники THD для фазної напруги та фазного струму; діюче значення першої гармоніки фазної напруги та струму; діючі значення гармонік з номерами 5, 7, 11, 13 фазної напруги та струму.

Підсистема вимірювання показників якості електроенергії реалізована блоком Measurer з підсистемами, приклад яких наведено на рис. 2.6, а. Внутрішня реалізація підсистеми вимірювання показників якості електроенергії наведено на рис. 2.6, б.

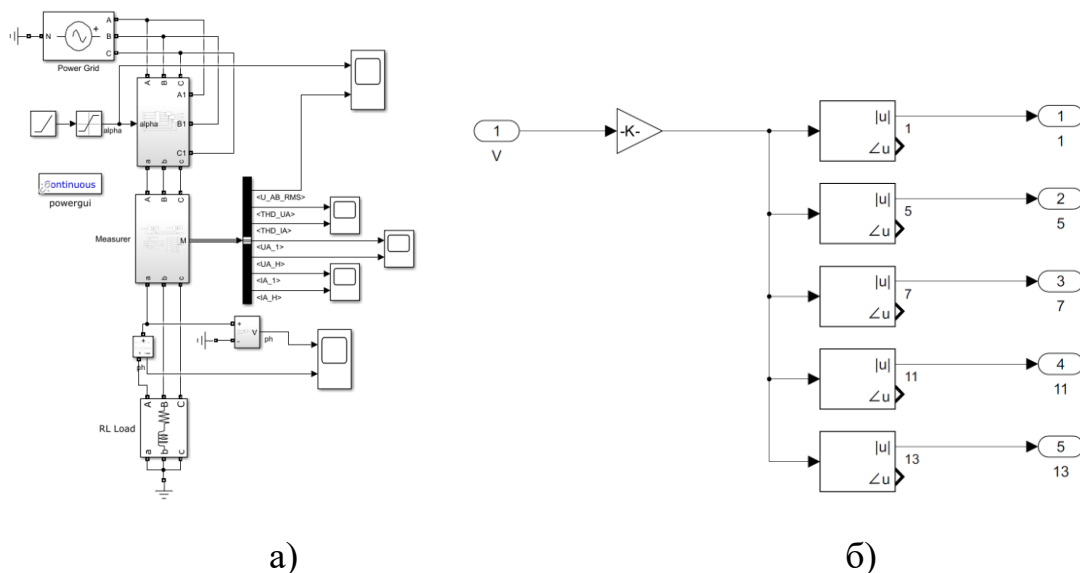


Рисунок 2.6 – Реалізація підсистеми вимірювання показників якості електроенергії у MATLAB/Simulink: а – приклад використання підсистеми Measurer; б – внутрішня структура підсистеми Measurer.

Коректність роботи розробленої підсистеми вимірювання показників якості електроенергії забезпечується за рахунок використання апробованих бібліотечних елементів бібліотеки Simscape/Electrical. Результати вимірювання показників якості електроенергії при регулюванні напруги на RL-навантаженні наведено на рис.2.7.

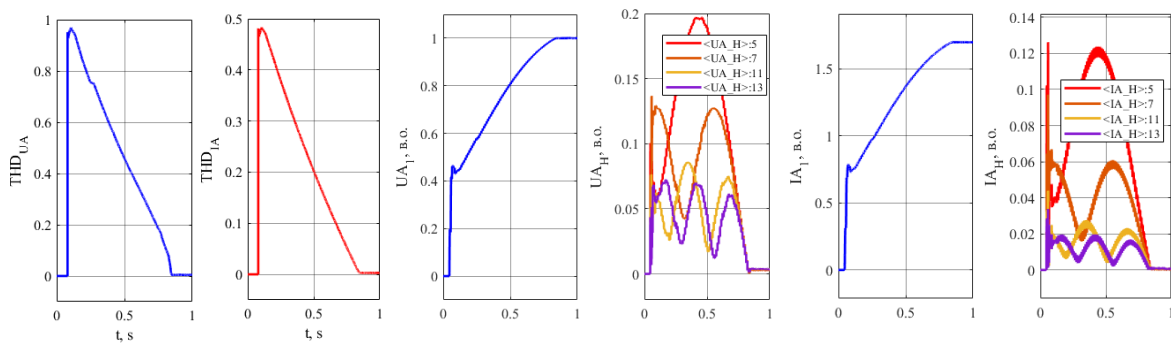


Рисунок 2.7 – Результати вимірювання показників якості електроенергії при регулюванні напруги на RL-навантаженні

Поступове зменшення кута керування супроводжується зменшенням спотворень у кривих вихідної напруги та струму, що й відображається поступовим зменшенням показників THD напруги та струму, збільшенням діючого значення першої гармоніки та зменшенням діючих значень вищих гармонік до нуля при переході в синусоїдальний режим роботи при малих кутах керування.

2.4 Керований компенсатор реактивної потужності

Для покращення якості електричної енергії зараз використовується велика кількість пасивних і керованих фільтрів, конфігурація і методи керування якими постійно удосконалюються [20–34]. В межах наступного дослідження використано керований компенсатор реактивної потужності з конфігурацією LLC та двома електронними ключами в кожній фазі компенсатора з високочастотною ШІМ (рис. 2.8) [20].

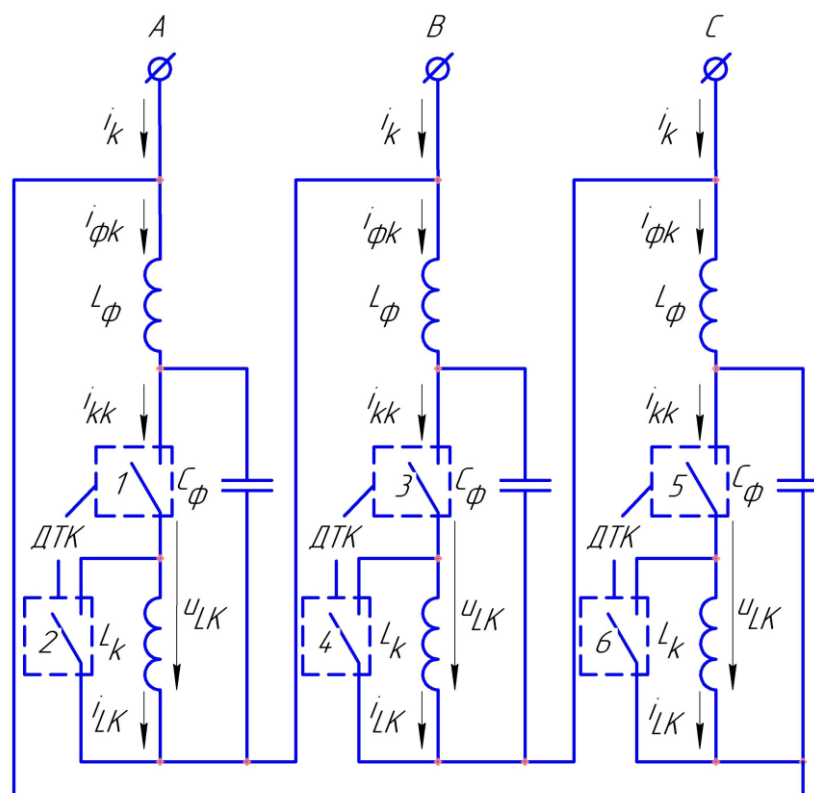


Рисунок 2.8 – Принципова схема трифазного керованого компенсатора реактивної потужності

Модель такого компенсатора складається з низки підсистем: електронного біполярного ключа (рис. 2.9, а), генератора двох взаємно-інверсних послідовностей ШІМ сигналу для керування двома ключами в кожному з трьох LLC-фільтрів (рис. 2.9, б), з'єднаних трикутником (рис. 2.9, в) та системи керування, основу якої складає ПІ-регулятор реактивної потужності (рис. 2.9, г).

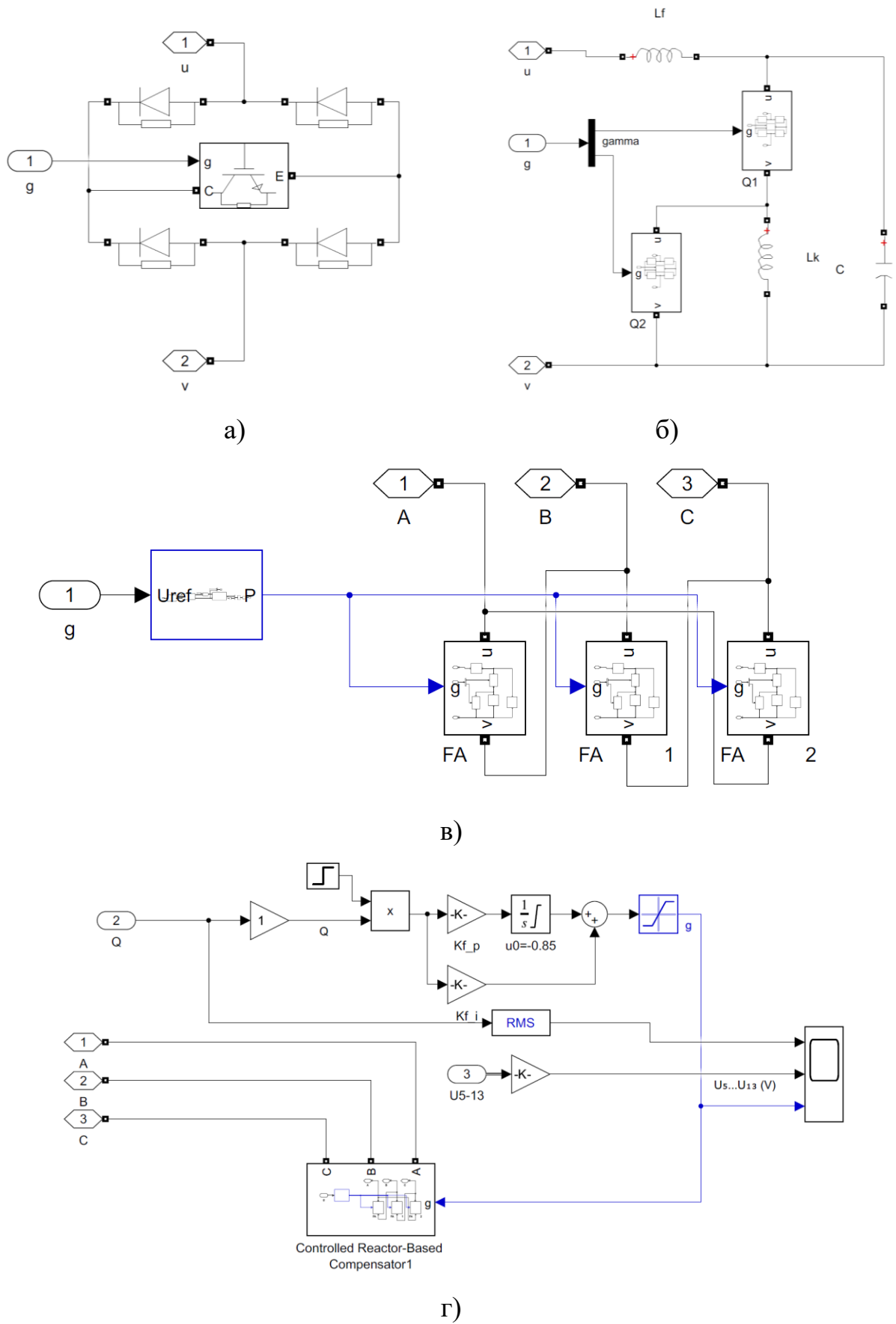


Рисунок 2.9 – Модель трифазного керованого компенсатора реактивної потужності

Вибір реактивних елементів компенсатора може бути виконаний приблизно за максимальною величиною реактивної потужності об'єкта Q_L з використанням розрахованої таблиці даних для 10 kV, 50 Hz (табл. 2.2) та формул для перерахунку для іншої напруги та частоти [35]:

$$\begin{aligned} L_{U, f} &= \frac{50}{f} \frac{U^2}{10000^2} L_{10kV, 50Hz}; \\ C_{U, f} &= \frac{50}{f} \frac{10000^2}{U^2} C_{10kV, 50Hz}. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Таблиця 2.1 – Параметри керованого компенсатора реактивної потужності (10 kV, 50 Hz)

QL, MVAR	C, μ F	Lk, H	Lf, H	QL, MVAR	C, μ F	Lk, H	Lf, H
0.5	10.9	0.2504	0.2940	5.5	119.8	0.0228	0.0267
1.0	21.8	0.1252	0.1470	6.0	130.6	0.0209	0.0245
1.5	31.7	0.0835	0.0980	6.5	141.5	0.0193	0.0226
1.0	42.5	0.0626	0.0735	7.0	151.4	0.0179	0.0210
1.5	54.4	0.0501	0.0588	7.5	162.3	0.0167	0.0196
2.0	65.3	0.0417	0.0490	8.0	174.2	0.0157	0.0184
2.5	76.2	0.0358	0.0420	8.5	185.1	0.0147	0.0173
4.0	87.1	0.0313	0.0368	9.0	196.0	0.0139	0.0163
4.5	98.0	0.0278	0.0327	9.5	206.9	0.0132	0.0155
5.0	108.9	0.0250	0.0294	10.0	217.7	0.0125	0.0147

Для електропривода підрулюючого пристрою обираємо позначені червоним параметри з табл. 2.2 та перераховуємо їх до напруги 6.6 kV і частоти 60 Hz. Отримаємо

$$\begin{aligned} Lk &= \frac{50}{60} \frac{6600^2}{10000^2} 0.0250 = 0.0091 \text{ H}; \\ Lf &= \frac{50}{60} \frac{6600^2}{10000^2} 0.0294 = 0.0107 \text{ H}; \\ C &= \frac{50}{60} \frac{10000^2}{6600^2} 108.9 = 208.1 \text{ } \mu\text{F}. \end{aligned}$$

Під час встановлення параметрів в моделі Matlab/Simulink/Simscape доцільно використовувати ланку RLC-Load, для якої необхідно розрахувати потужності елементів:

$$Q_{Lk} = \frac{U^2}{2\pi fL_k} = \frac{6600^2}{120\pi 0.0091} = 12.7 \text{ MVAR};$$

$$Q_{Lf} = \frac{U^2}{2\pi fL_f} = \frac{6600^2}{120\pi 0.0107} = 10.8 \text{ MVAR};$$

$$Q_C = -2\pi fCU^2 = -120\pi 6600^2 208.1e-6 = -3.42 \text{ MVAR}.$$

2.5. Дослідження показників якості електроенергії при пуску електропривода без компенсатора реактивної потужності

Розрахуємо перехідні процеси пуску електропривода зі зворотним зв'язком та ПІ-регулятором швидкості, налаштованим на забезпечення лінійного розгону двигуна з максимально можливим прискоренням (рис. 2.10, 2.11).

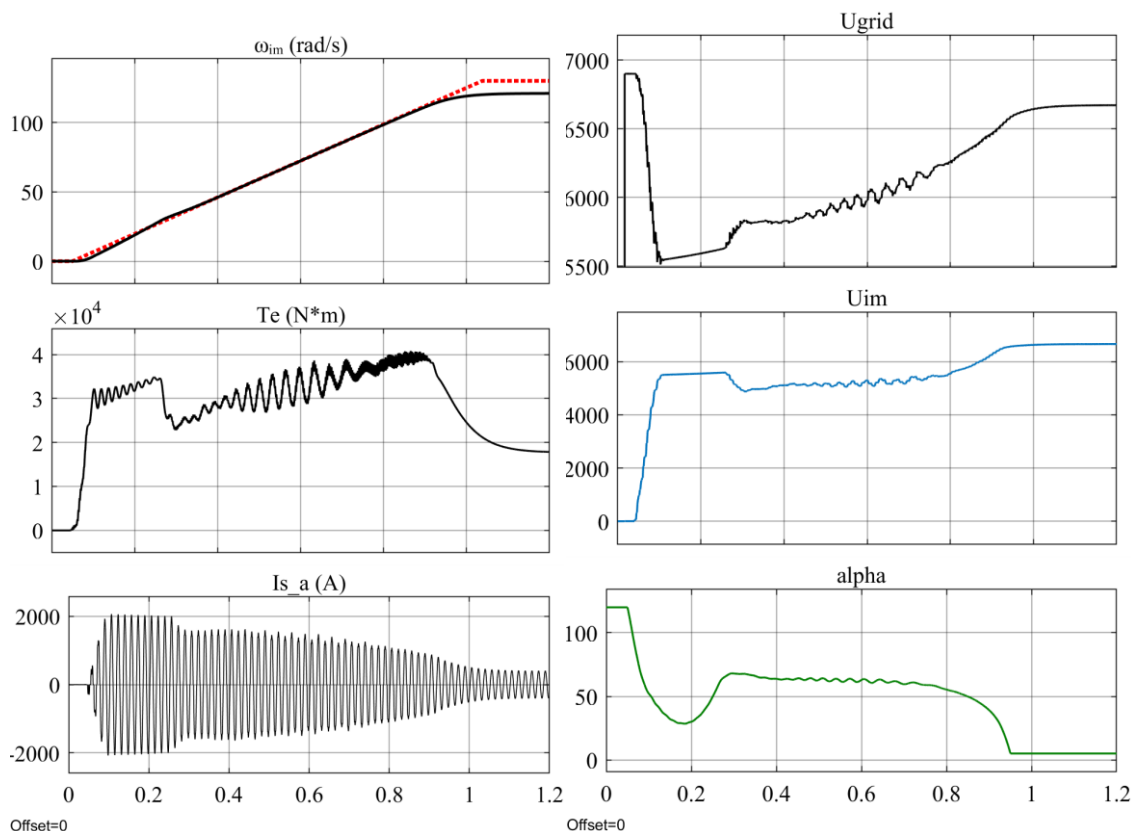


Рисунок 2.10 – Графіки перехідних процесів пуску без компенсатора

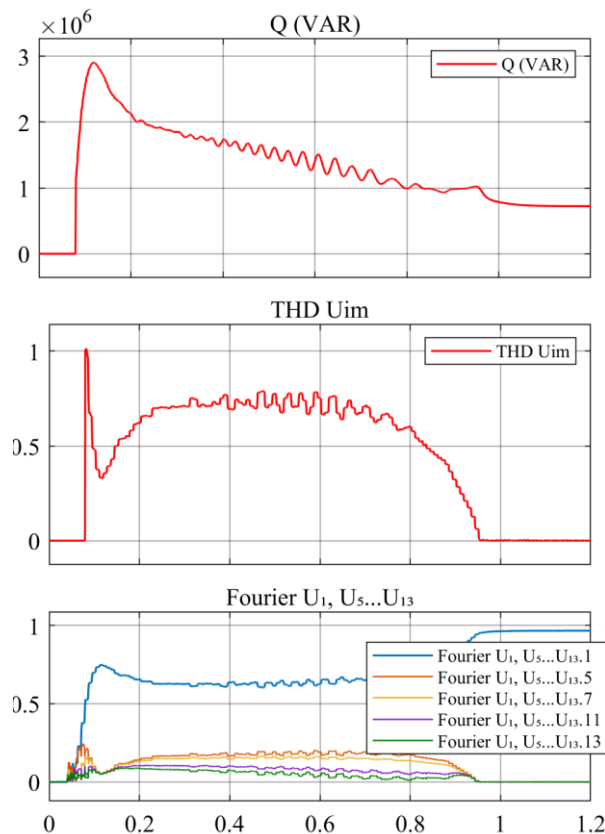


Рисунок 2.11 – Графіки показників якості під час пуску без компенсатора

Отримано очікувані результати щодо гармонійного складу напруги [20], також найважливішим показником, який може заважати нормальній роботі суднової електроенергетичній системі під час пуску є падіння напруги. Воно становить 1400 V від напруги холостого ходу і 1100 V від номінальної. Таке падіння майже на межі припустимого.

2.6. Налаштування системи керування компенсатором реактивної потужності та дослідження показників якості електроенергії

Налаштуємо систему керування компенсатором реактивної потужності.

Виконаємо моделювання прямого пуску двигуна для дослідження його реакції на накид/скид навантаження (рис. 2.12). Це дозволить в подальшому налаштувати систему керування пристроєм плавного пуску.

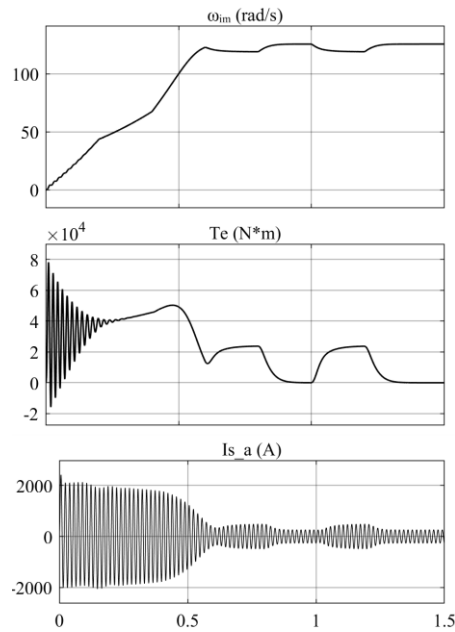


Рисунок 2.12 – Графіки перехідних процесів прямого пуску двигуна з миттєвим накидом/скиданням навантаження 3 MW

Збільшений фрагмент графіків напруги і потужності (рис. 2.13) дозволяє приблизно, з точки зору реакції на накид/скид навантаження, вважати двигун інерційною ланкою з постійною часу $T_{em}=0.05$ s.

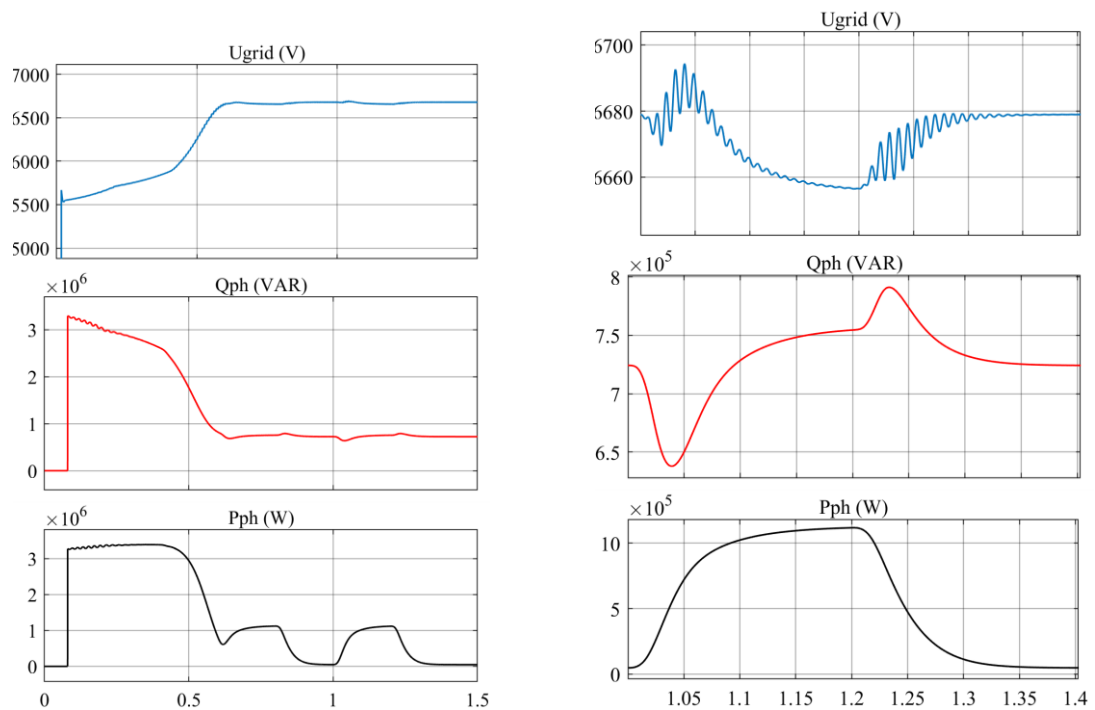


Рисунок 2.13 – Напруга мережі, споживана реактивна і активна потужність при прямому пуску двигуна (а), збільшений фрагмент при стрибках навантаження (б)

Аналогічно реакції двигуна на скид/накид навантаження дослідимо реакцію керованого компенсатора реактивної потужності на лінійно зростаючий від -1 до $+1$ та на стрибки завдання γ (рис. 2.14).

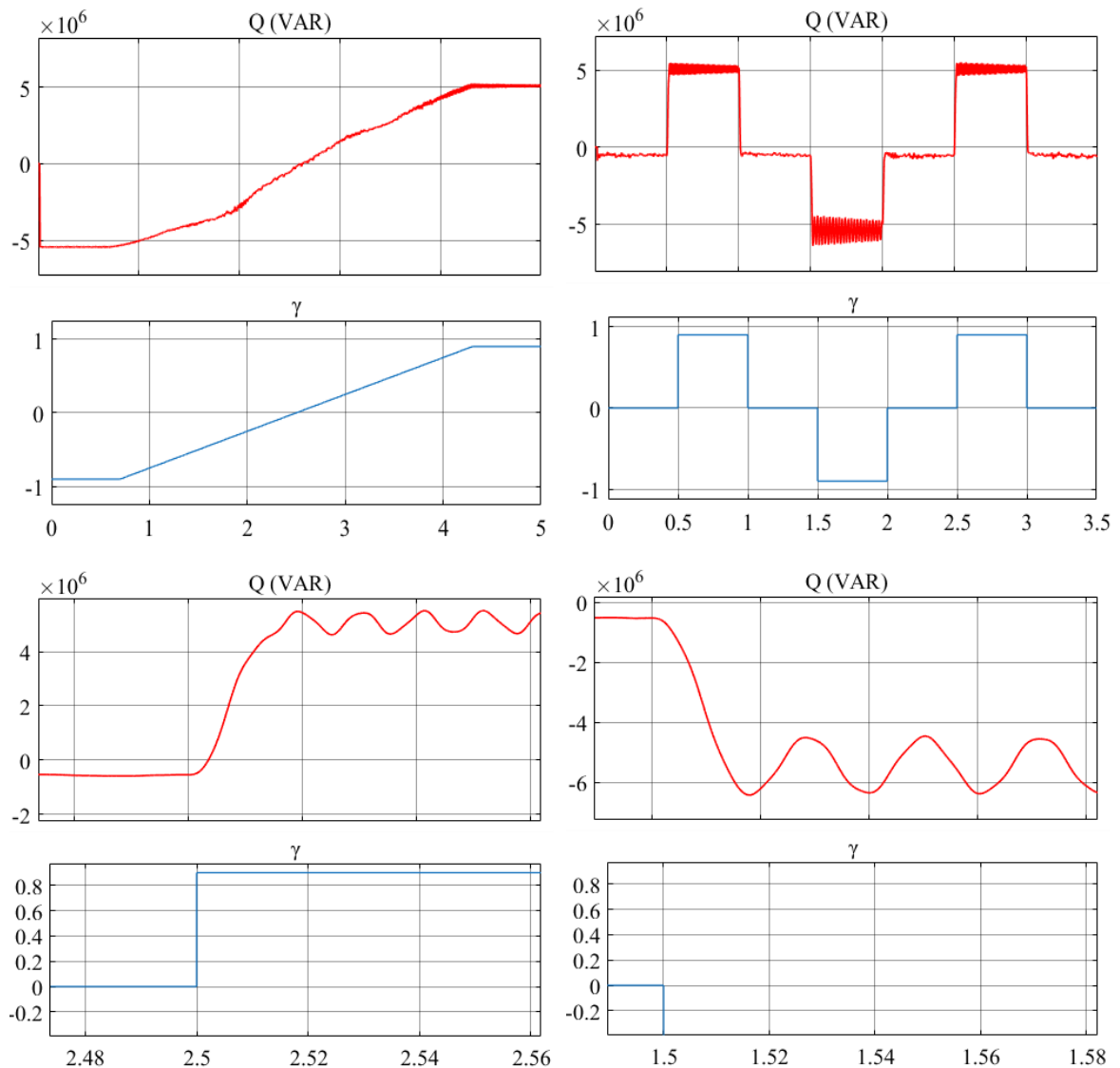


Рисунок 2.14 – Реакція керованого компенсатора реактивної потужності на стрибки керуючого сигналу γ

Слід зазначити, що додавання в фільтр незначних активних споживачів з потужністю 1 % від потужності реактивних елементів значно зменшує амплітуду і тривалість коливальних процесів в фільтрі (рис. 2.15). Це в деякій мірі відповідає фізичним властивостям реальних котушок і конденсаторів, тому залишимо ці параметри і для подальших досліджень.

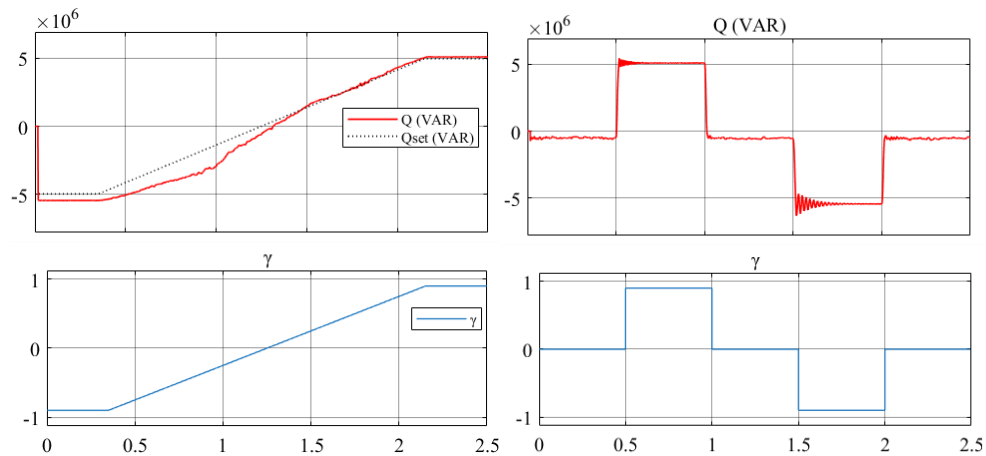


Рисунок 2.15 – Графіки тестових перехідних процесів в фільтрі з реальними елементами

На підставі отриманих характеристик керований компенсатор можна вважати підсилювачем з коефіцієнтом 5.5×10^6 , а також приблизно – інерційною ланкою з постійною часу $T_f = 0.01$ s.

Таким чином, можемо налаштувати ПІ-регулятор керованого компенсатора реактивної потужності, якщо будемо вважати постійну часу $T_f = 0.01$ s в якості некомпенсованої, а постійну часу $T_{em} = 0.05$ s в якості параметра об'єкта керування.

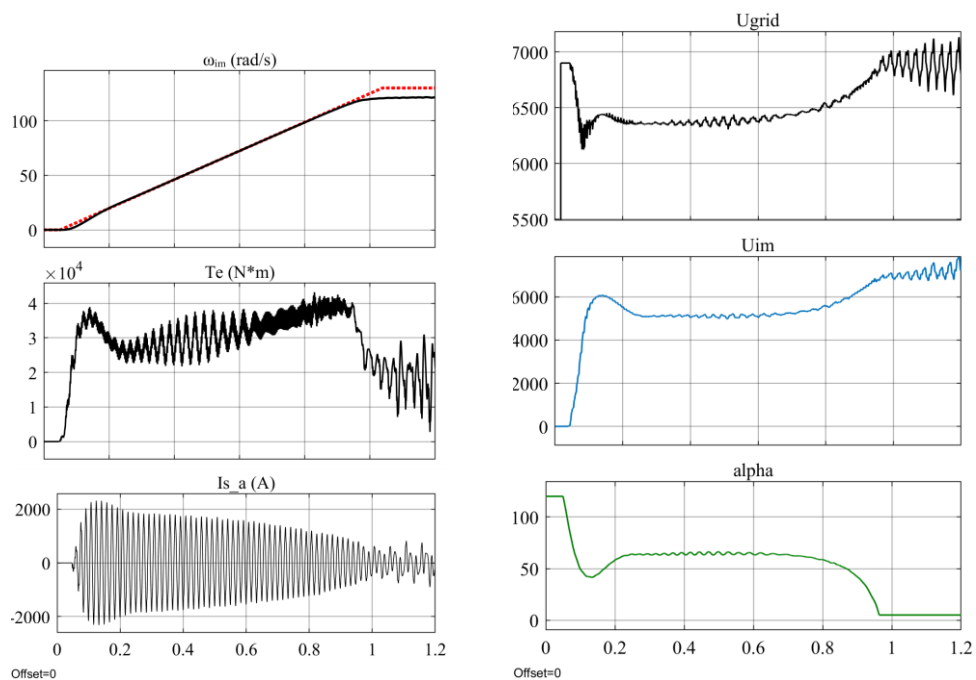


Рисунок 2.16 – Графіки перехідних процесів пуску з компенсатором

Отримані графіки перехідних процесів в замкненій за реактивною потужністю системі (рис. 2.16) з завданням 0 свідчать про доцільність її використання: падіння напруги зменшилось до 500 V від наруги холостого ходу та до 200 V (3 %) від номінальної напруги. Однак є її негативні явища – коливання моменту і швидкості в усталеному режимі.

Для подальшого аналізу звернемо увагу на фізичні принципи роботи замкненої системи. Під час пуску асинхронного двигуна реактивна потужність поступово зменшується. Тому керуючий сигнал компенсатора повинен поступово збільшуватись. При наявності інтегральної складової в регуляторі для збільшення вихідного сигналу на його вході необхідно існування деякої позитивної швидкісної похибки, що в досліджуваній системі відповідає незначній реактивній потужності ємнісного характеру. Тобто необхідною умовою роботи є деяка перекомпенсація реактивної потужності двигуна індуктивного характеру. З рис. 2.16 видно, що це призводить до виникнення коливань як реактивної потужності, так і всіх гармонійних складових напруги на двигуні, електромагнітного моменту двигуна не тільки під час перехідного процесу, а й при виході на номінальну швидкість, навіть при спрацюванні байпасного перемикача в пристрої плавного пуску.

Швидкісна похибка під час пуску приблизно складає $1e5$ VAR, а амплітуда коливань реактивної потужності $1.5e5$ VAR, що складає відносно незначну величину – 3 і 5 % відповідно – від максимальної реактивної потужності на початку пуску.

Для усунення таких негативних явищ запропоновано ввести в системі керування незначне зміщення завдання реактивної потужності замість 0: $+2.5e5$ VAR індуктивного характеру, що відповідає 10 % максимальної реактивної потужності.

На рис. 2.17, 2.18 відображено перехідні процеси в електромеханічній системі підрулюючого пристрою зі зміщенням завдання на вході ПП-регулятора компенсатора реактивної потужності.

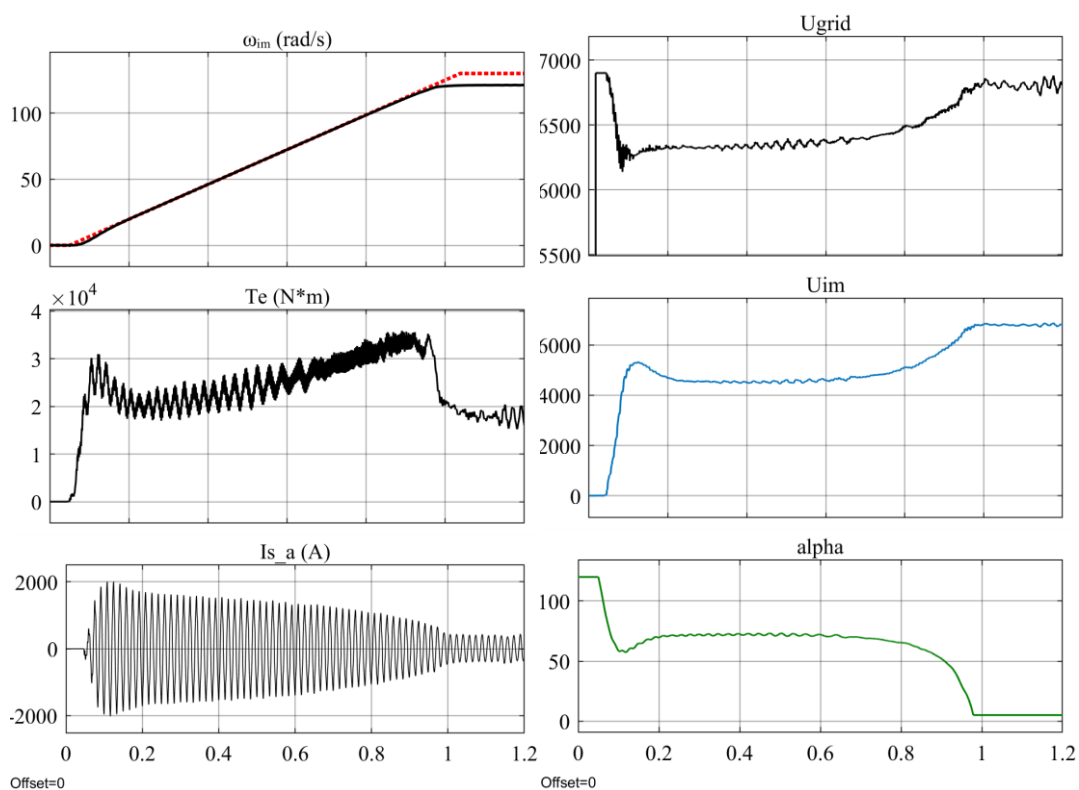


Рисунок 2.17 – Графіки перехідних процесів пуску з компенсатором та зі зміщенням $3e5$ VAR

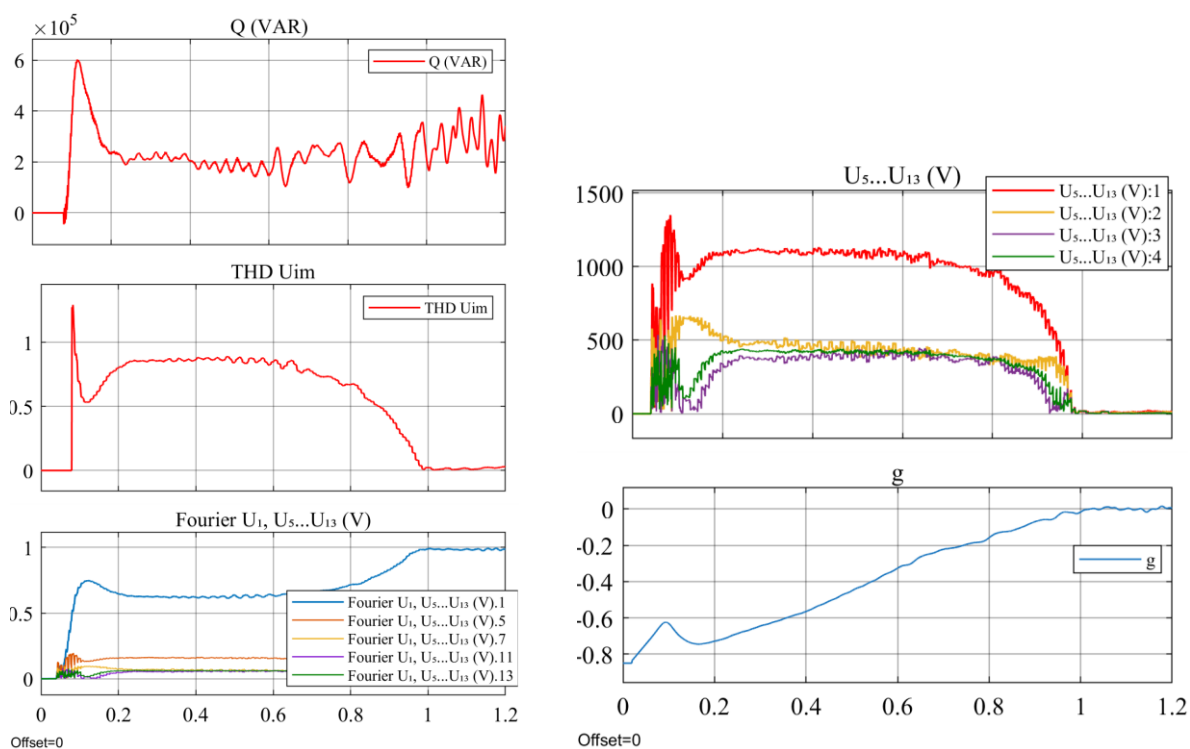


Рисунок 2.18 – Графіки перехідних процесів показників якості під час пуску з компенсатором та зі зміщенням $3e5$ VAR

Дослідимо вплив налаштувань регулятора компенсатора реактивної потужності на якісні показники системи. На рис. 2.19 наведено графіки перехідних процесів при додаванні в регулятор диференційної складової з найкращим серед випробуваних коефіцієнтом. Видно, що навіть в найкращому випадку в системі виникають коливання як в перехідних, так і в усталених режимах.

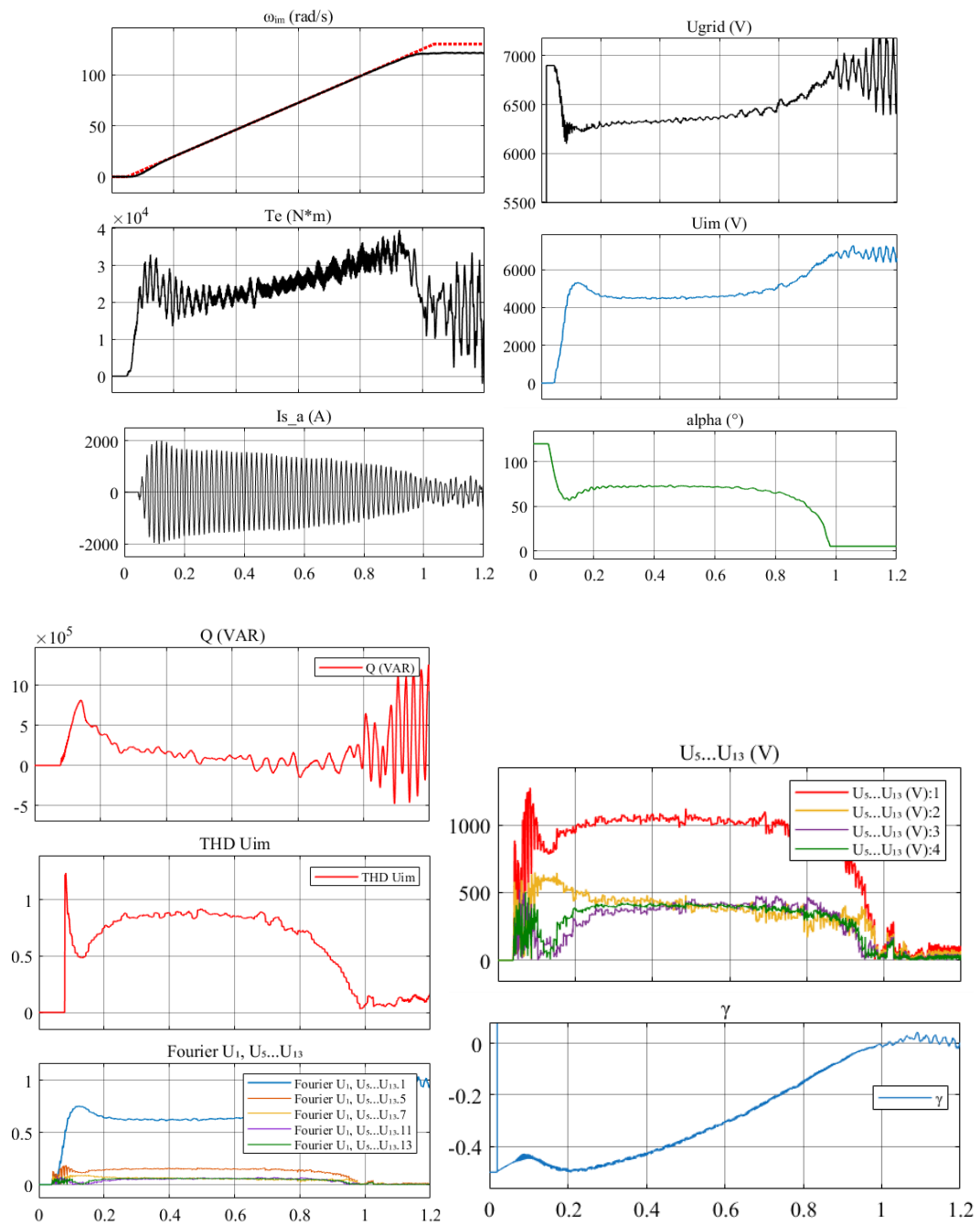
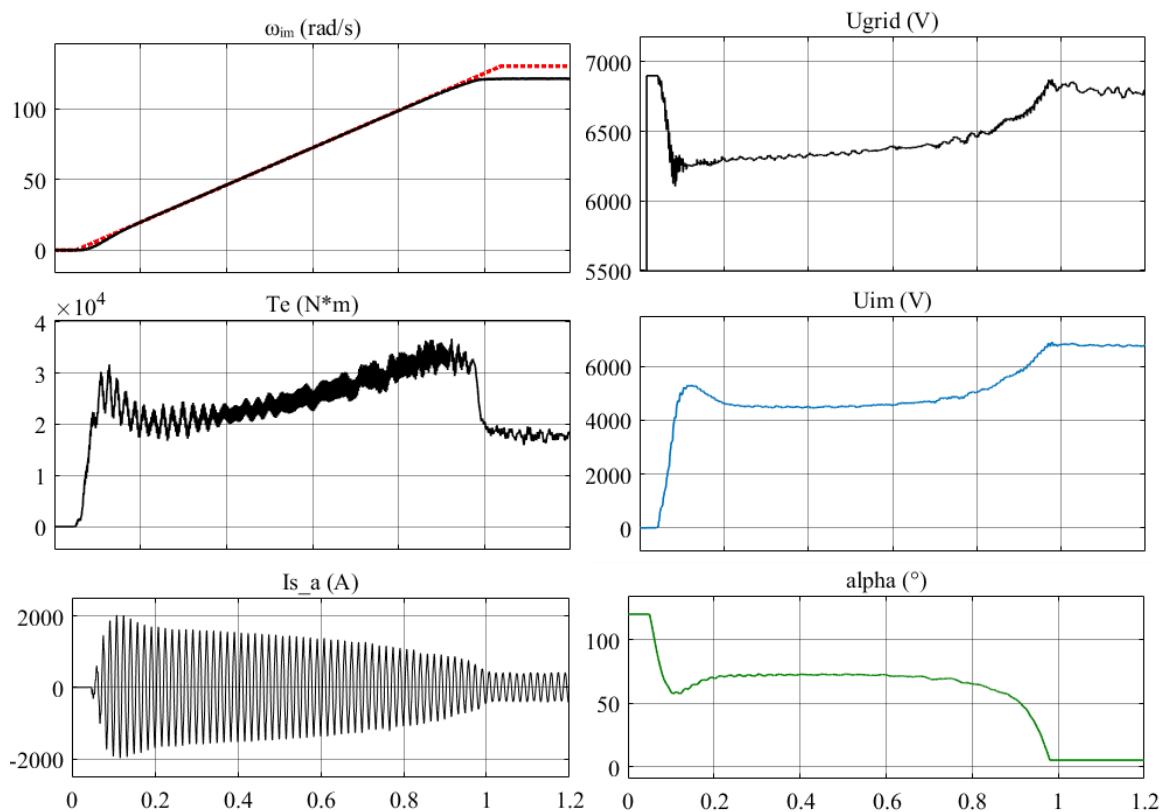


Рисунок 2.19 – Графіки перехідних процесів з компенсатором реактивної потужності та ПІД-регулятором

Таким чином, диференційна складова в регуляторі погіршує якісні показники системи в усталеному режимі, ініціює коливальні процеси всіх координат двигуна.

Подальші дослідження дозволили знайти налаштування, які відрізняються від початкових в 2...3 рази, але забезпечують кращу якість перехідних процесів (рис. 2.20). Якщо порівняти систему з цими налаштуваннями з рис. 2.17, 2.18, то досягнута менша амплітуда коливань моменту двигуна під час перехідного процесу і в усталеному режимі, амплітуда 5-ї гармоніки напруги близька до 1000 V, у інших гармонік – не перевищує 500 V, в усталеному режимі коливання практично відсутні.



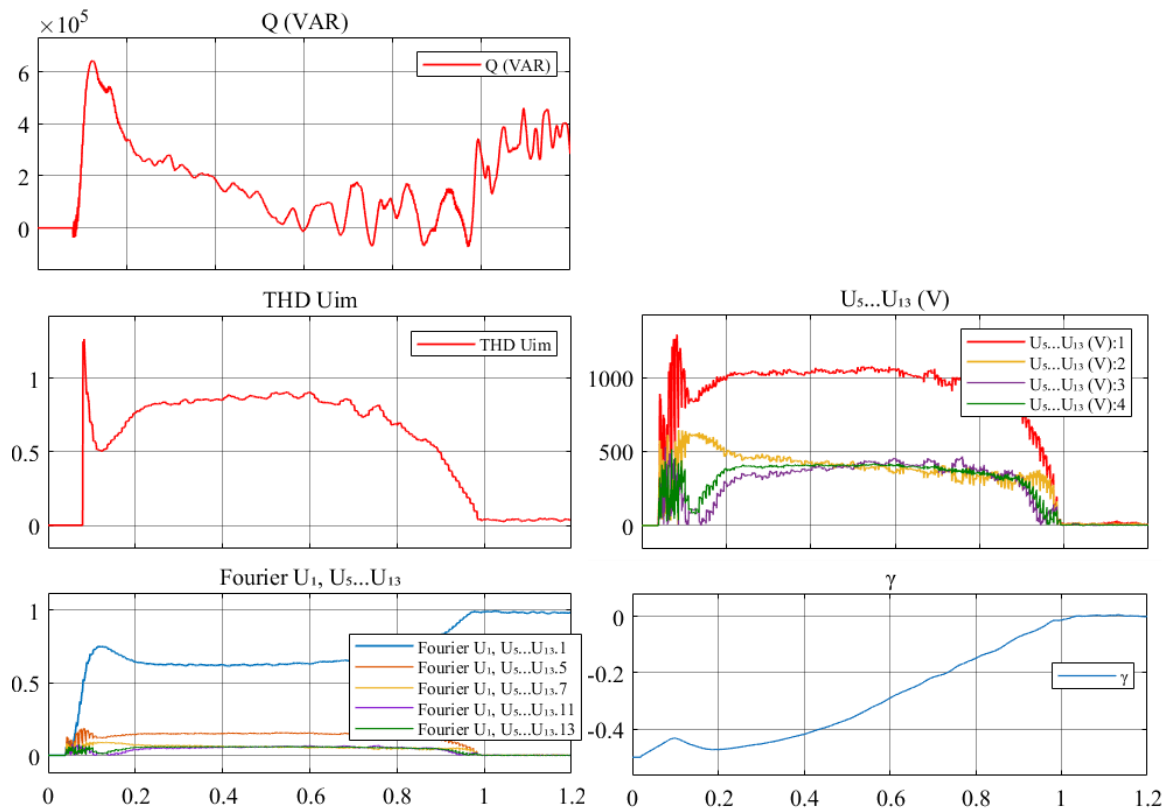


Рисунок 2.20 – Графіки перехідних процесів при найкращих налаштуваннях
ПІ-регулятора компенсатора реактивної потужності

Очевидно, що запропоноване рішення дозволило практично повністю видалити коливання реактивної потужності (не більше 0.2×10^5 VAR) в середині перехідного процесу, а також всіх гармонійних складових напруги на обкладинках двигуна і у вузлі розподільчої мережі СЕЕС на протязі всього перехідного процесу. Відповідно, суттєво зменшено коливання електромагнітного моменту двигуна та його швидкості. Саме це удосконалення методу керування компенсатором реактивної потужності складає наукову новизну проведеного дослідження.

2.7. Висновки

В другому розділі розроблено деталізовану модель тиристорного пристрою плавного пуску з урахуванням підключення до мережі обмеженої потужності.

Досліджено вплив на мережу під час автотрансформаторного пуску і пуску від пристрою плавного пуску. Показано, що при інших однакових умовах пристрій плавного пуску дозволяє зменшити час пуску і підтримувати постійне прискорення при наявності зворотного зв'язку за швидкістю.

Однак при використанні пристрою плавного пуску падіння напруги у вузлу розподільчої мережі склало 1400 V від напруги холостого ходу мережі і 1100 V від номінальної напруги, тобто 16%. Також зареєстровано суттєвий рівень 5, 7, 11, 13 гармонік напруги на обкладинках двигуна і в мережі.

Розроблено модель керованого за допомогою високочастотної ШІМ двох реверсивних транзисторних ключів в кожній фазі LLC-компенсатора реактивної потужності, розраховано його параметри та налаштовано систему керування реактивною потужністю.

Аналіз отриманих перехідних та усталених процесів показав, що такий керований компенсатор дозволяє зменшити падіння напруги до 3 % від номінальної напруги, майже в 1.5 рази зменшити рівень вищих гармонік напруги.

Також на підставі аналізу фізичних принципів взаємодії ПІ-регулятора, асинхронного двигуна і керованого компенсатора оптимальним виявляється неповна компенсація реактивної потужності індуктивного характеру – доцільно встановити завдання на рівні 10 % від максимальної реактивної потужності під час пуску. Запропоноване рішення дозволило практично повністю видалити коливання реактивної потужності (не більше $0.2e5$ VAR) в середині перехідного процесу, а також всіх гармонійних складових напруги на обкладинках двигуна і у вузлі розподільчої мережі СЕЕС на протязі всього перехідного процесу. Відповідно, суттєво зменшено коливання електромагнітного моменту двигуна та його швидкості. Саме це

удосконалення методу керування компенсатором реактивної потужності складає наукову новизну проведеного дослідження.

ВИСНОВКИ

В роботі виконано аналіз впливу пускових режимів потужного електроприводу підрулюючого пристрою на суднову електроенергетичну мережу. Обґрунтовано необхідність використання спеціалізованих пускових пристроїв для зменшення негативного впливу пускових процесів. Розглянуто існуючі методи та сучасні технічні пристрої для керування пусковими режимами потужних електроприводів з різними типами навантаження. Обґрунтовано доцільність використання пускових пристроїв потужних електроприводів з використанням тиристорних регуляторів напруги. Але негативною стороною такого рішення є значний вплив тиристорних регуляторів напруги на показники якості електроенергії. Надано аналітичні залежності для розрахунку показників якості електроенергії.

Розроблено деталізовану модель тиристорного пристрою плавного пуску з урахуванням підключення до мережі обмеженої потужності та досліджено вплив на мережу під час автотрансформаторного пуску і пуску від пристрою плавного пуску. Показано, що при використанні пристрою плавного пуску падіння напруги у вузлу розподільчої мережі склало 1400 V від напруги холостого ходу мережі і 1100 V від номінальної напруги, тобто 16%. Також зареєстровано суттєвий рівень 5, 7, 11, 13 гармонік напруги на обкладинках двигуна і в мережі.

Розроблено модель керованого LLC-компенсатора реактивної потужності, розраховано його параметри та налаштовано систему керування реактивною потужністю, що дозволило проаналізувати отримані перехідні та усталені процеси та показати, що такий керований компенсатор зменшує падіння напруги до 3 % від номінальної напруги, майже в 1.5 рази зменшує рівень вищих гармонік напруги.

Також на підставі аналізу фізичних принципів взаємодії ПІ-регулятора, асинхронного двигуна і керованого компенсатора оптимальним виявляється неповна компенсація реактивної потужності індуктивного характеру – доцільно встановити завдання на рівні 10 % від максимальної реактивної потужності під час пуску. Запропоноване рішення, яке складає наукову новизну проведеного дослідження, дозволило практично повністю видалити коливання реактивної потужності (не більше 0.2×10^5 VAR) в середині перехідного процесу, а також всіх гармонійних складових напруги на обкладинках двигуна і у вузлі розподільчої мережі СЕЕС на протязі всього перехідного процесу. Відповідно, суттєво зменшено коливання електромагнітного моменту двигуна та його швидкості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Оптимізація пускових режимів потужних електроприводів за енергетичною ефективністю: монографія / В. К. Титюк, О. П. Чорний, І. А. Луценко, Барановська М. Л. – Кременчук: ПП Щербатих О. В, 2021. – 262 с., іл.
2. Барський В. А., Курдюмов Д. С., Биканов Р. А. Пристрої плавного пуску потужних турбомеханізмів та інших механізмів, що запускаються вхолосту. Електротехніка, 2015, № 10.
3. Woud H. K. Design of propulsion and electric power generation systems / H. K. Woud, D. Stapersma // IMarEST publications: London. – 2003. – 494 p.
4. <https://www.evm.ua/image/catalog/uslugi/standart-en-50160.pdf>
[Available at 11/25/2025](#)
5. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25837 Available at 11/25/2025
6. Копилов І. П. До визначення динамічних енергетичних показників за несинусоїдальної та несиметричної напруги. Відом. АН Енергетика, № №2, 2001, с. 31-38.
7. Руденко В. С., Сенько В. І., Чиженко І. М. Основи перетворювальної техніки. М: Вища школа, 1980, с. 424.
8. Шидловський А. К., Павлов В. Б., Попов О. В., Павленко В. Є. Розробка енергозберігаючих напівпровідникових перетворювачів для підвищення ефективності використання електричної енергії. Праці Інституту електродинаміки НАН України, 2009.
9. Сокол Є. І., Бару А. Ю., Шинднес Ю. Л., Лукпанов Ж. К. Досвід розроблення та впровадження перетворювачів частоти для регульованого електроприводу насосних агрегатів магістральних нафтопроводів. Електротехніка, № 7, 2004, с. 52-57.

10. M. Steurer, P. Ribeiro, Y. Liu Re-Evaluating Electric Power System Harmonic Distortion Limits for Shipboard Systems, Center for Advanced Power Systems (CAPS) Florida State University, June 25, 2004.
11. Timothy Oluwaseun Araoye, Evans Chinemezu Ashigwuike, Adeyinka Cornelius Adeyemi, Sochima Vincent Egoigwe, Nnaemeka Genesis Ajah, Emmanuel Eronu. Reduction and control of harmonic on three-phase squirrel cage induction motors with voltage source inverter (VSI) using ANN-grasshopper optimization shunt active filters (ANN-GOSAF), Scientific African, 2023, Volume 21, e01785, <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01785>.
12. Chafai M., Refoufi L. Squirrel Cage Induction Motor Reliability Modelling. Journal of Engineering And Applied Sciences, pp. 909-914, 2007.
13. Sokol E., Goncharov Yu., Eresko A., Ivakhno V., Krivosheev S., Zamaruiev V., Lobko V., Voytovich Yu. Rectifiers with a combined filtration of primary current for high-frequency power systems. Compatibility and Power Electronics (CPE), 2013 8th International Conference, 2012.
14. <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h3c/hb5/WEG-SSW7000-users-manual-10001461783-en.pdf>. Available at 20/11/2025
15. Rodriguez J., Lai J.S., Peng F.Z. Multilevel Inverters: Survey of Topologies, Controls, and Applications. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, no. No 4, pp. 724-728, 2001.
16. Bezhenar V., Mykolaets D., Mykytiuk V., Tereshchenko T. Multilevel Inverter as VAR–compensator. Electronics and nanotechnology (ELNANO), IEEE XXXIII International Scientific Conference», 2012.
17. Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й., Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. Моделювання електромеханічних систем. Кременчук, 2001, с. 376.
18. <https://www.mathworks.com/products/simscape-electrical.html>
19. Захарченко В. М. Аналіз електромагнітної сумісності потужного пристрою плавного пуску із судновою мережею в динамічних режимах [Текст] / В. М. Захарченко, В. В. Бушер, О. В. Глазева, К. Хандакжи //

Електротехнічні та комп'ютерні системи – Київ, Техніка – Вип. 21(97). – С. 17–22. <http://dx.doi.org/10.15276/eltecs.21.97.2016.02>

20. O. Zhuk, D. Zhuk, D. Kryvoruchko and S. Stepenko, "An improvement of compensators of complete power non-active components in autonomous electric power systems," 2016 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kyiv, Ukraine, 2016, pp. 1-5.

21. Victor Busher, Oleksii Chorny, Valerii Tytiuk, Oksana Glazeva, Anatoliy Shestaka, Lubov Melnikova, "Research of Electromagnetic and Electromechanical Processes in High-Voltage Soft Start Devices with Gate Turn-Off Thyristors," 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2023, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/MEES61501.2022.10402382>

22. Asit Mohanty, Prakash K. Ray, Soumya Ranjan Das, Manzoore Elahi M. Soudagar, S. Ramesh, T.M. Yunus Khan, Naif Almakayeel, M. Mahmood Ali, Muhammad Nasir Bashir. Enhancing power quality in contemporary utility systems: A comprehensive analysis of active power filters and control strategies, Energy Reports, 2024, Volume 11, Pages 5575-5592, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.05.032>.

23. Khairul Anuar Mohd Nor, Noramalina Abdullah, Power quality improvement of three-phase electrical systems using active-passive hybrid harmonic filter, Results in Engineering, 2024, Volume 22, 102242, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102241>.

24. M. Karthikeyan, K. Sharmilee, P.M. Balasubramaniam, N.B. Prakash, M. Rajesh Babu, V. Subramaniaswamy, S. Sudhakar. Design and implementation of ANN-based SAPF approach for current harmonics mitigation in industrial power systems, Microprocessors and Microsystems, 2020, Volume 77, 103194, <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103194>.

25. Abdallah El Ghaly, Mohamad Tarnini, Zaher Al Barakeh, Khaled Chahine, Compensating voltage waveform distortions using a practical topology of

series active power filters, Results in Engineering, 2024, Volume 22, 102032, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102031>.

26. Annu Govind, Kuldeep Jayaswal, Vijay Kumar Tayal, Prakash Kumar, Simulation and real time implementation of shunt active power filter for power quality enhancement using adaptive neural network topology, Electric Power Systems Research, 2024, Volume 228, 110041. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.110041>

27. Toufik Toumi, Ahmed Allali, Abdelmalek Meftouhi, Othmane Abdelkhalek, Abdallah Benabdelkader, Mouloud Denai. Robust control of series active power filters for power quality enhancement in distribution grids: Simulation and experimental validation, ISA Transactions, 2020, Volume 107, Pages 350-359, <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.07.024>

28. Hiral Hingol, Vaidehi Deshpande, Amit V. Sant. Modified symmetrical sinusoidal integrator and instantaneous reactive power theory-based control of shunt active filter, Energy Reports, 2022, Volume 8, Supplement 13, Pages 515-523, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.151>

29. John Pérez-Ramírez, Diego Montoya-Acevedo, Walter Gil-González, Oscar Danilo Montoya, Carlos Restrepo, Shunt active power filter using model predictive control with stability guarantee, e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, Volume 12, 2025, 101029, <https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.101029>.

30. Srinivasa Acharya, D. Vijaya Kumar, Power quality enhancement in grid tied hybrid system using chicken swarm optimization algorithm optimized shunt filter, Journal of Energy Storage, 2025, Volume 128, 117112, <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.117111>.

31. Bakria D, Laouid AA, Korich B, Beladel A, Teta A, Mohammedi RD, Elsayed SK, Ali E, Aeggegn DB, Ghoneim SSM. An optimized shunt active power filter using the golden Jackal optimizer for power quality improvement. Sci Rep. 2025 May 7;15(1):15869. doi: 10.1038/s41598-025-00204-1.

32. Márton Greber, Attila Fodor, Attila Magyar, Phase current estimation based shunt active power compensation, IFAC-PapersOnLine, 2022, Volume 55, Issue 9, Pages 48-53, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.07.009>.
33. Yundi Chu, Xujun Luo, Shixi Hou, Juntao Fei. Robust hybrid intelligent control using probabilistic feature for active power filter, Control Engineering Practice, 2023, Volume 141, 105712, <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2022.105711>.
34. DIXON Juan, MORAN Luis, RODRIGUEZ José, DOMKE Ricardo. Reactive power compensation technologies: State – of – the - art review, Proceedings of the IEEE ISSN0018-9219, 2005, vol. 93, n 12, pp. 2144-2164.
35. Романець А. О. Компенсація мережевих завад і реактивної потужності при використанні високовольтного пристрою плавного пуску. / Романець А. О. // Матеріали XV міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 26.11.2025. – Одеса: НУ ОМА, 2025. – С.1–4.