

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МУХА МИКОЛА ЙОСИФОВИЧ

УДК 629.5.064.5:621.3.016.4

ДИСЕРТАЦІЯ
**ДИНАМІЧНА КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В
СУДНОВИХ АВТОНОМНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ**

05.09.03 - електротехнічні комплекси та системи

Подається на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:

_____ М.Й. Муха

Науковий консультант
доктор технічних наук, професор
Вишневський Л.В.

Львів – 2018

АНОТАЦІЯ

Муха М.Й. Динамічна компенсація реактивної потужності в суднових автономних електроенергетичних системах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, 2018. – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2018.

Констатовано, що починаючи з січня 2013 року стали обов'язковими, в тому числі і для України, вимоги доповненого Додатку VI до Протоколу 1997 р. Міжнародної конвенції щодо запобігання забрудненню із суден (МАРПОЛ) та енергетичної ефективності морських суден, які були прийняті Комітетом по захисту морського середовища (КЗМС) Міжнародної морської організації (ІМО МЕРС), Резолюція МЕРС.214 (63). В цілому Додаток VI до Протоколу 1997 р. до Конвенції присвячений питанням запобігання забруднення повітряного середовища з суден, що встановлює ряд вимог до енергоефективності морських суден і спрямований на поступове зниження обсягу викидів вуглекислого газу в атмосферу об'єктами морського транспорту.

Через встановлені механізми реалізації зазначених вимог, а саме завдяки розрахунку коефіцієнта енергоефективності конструкції судна (англ. Energy Efficiency Design Index, EEDI), що представляє собою визначену розрахунковим шляхом величину і вказує обсяг викиду судном двоокису вуглецю у відношенні до обсягу перевезеного вантажу (в грамах на тономілю), а також завдяки розробці планів управління енергоефективністю судна (англ. Ship Energy Efficiency Management Plan, SEEMP) які розробляються відповідно до вимог і рекомендацій ІМО та можуть бути частиною системи управління безпекою судноплавних компаній, передбачаються шляхи і способи підвищення енергоефективності експлуатації суден.

Вимога щодо обов'язковості отримання суднами нового міжнародного свідоцтва про енергоефективність (англ. International Energy Efficiency Certificate, IEEC), щоб судно могло здійснювати рейси в іноземні порти або до морських платформ,

що знаходяться під юрисдикцією іноземної держави, встановлює нові правила управління енергоефективністю судна і шляхи до зниження енергоспоживання на водному транспорті.

Обґрунтовано, що одним із шляхів до підвищення енергоефективності експлуатації судна та зниження енергоспоживання наряду з вдосконаленням експлуатації рушіїв суден та оптимізацією роботи суднового устаткування являється розробка раціональних методів керування електричною енергією.

Показано, що при виробництві, розподіленні, перетворенні та використанні електричної енергії у судновій автономній електроенергетичній системі виникають небажані втрати. Крім того суднові споживачі електроенергії в основному мають активно-індуктивний характер, тобто повний струм генератора, трансформаторів та кабельних ліній повинен бути збільшений по відношенню до необхідного активного струму навантаження на величину обернено пропорційну значенню коефіцієнта потужності, що пропорційно збільшує встановлену потужність електрообладнання і перетин кабельних з'єднань. Тому генеруючі установки повинні забезпечити додаткові реактивні потужності, що в свою чергу знижує їх ефективність роботи через перевитрату палива приводних двигунів.

Замість одиночної роботи генератора з повним завантаженням збільшується час паралельної роботи генеруючих агрегатів з недовантаженням для забезпечення надлишкової повної потужності електроспоживачів, що включає їх реактивну потужність. При цьому виробляється моторесурс електроагрегатів, електростанція працює з низьким ККД і відповідною перевитратою палива.

В автономній судновій електроенергетичній системі прямий пуск потужного електродвигуна ускладнений або неможливий із-за необхідності генерувати реактивний струм саме впродовж перехідного процесу, співвимірною з номінальним струмом генератора. При цьому істотно збільшується динамічний провал і час відновлення напруги генератора при включенні навантажень з низьким коефіцієнтом потужності.

Наразі існує щонайменше дві можливості вирішити указані проблеми. Перша – це удосконалення технологічного процесу шляхом зменшення часу роботи

недовантажених електроагрегатів: випрямлячів, трансформаторів, електродвигунів та ін. Інший радикальний шлях – ємнісна компенсація індуктивного струму споживачів електроенергії.

Компенсація реактивної потужності має підвищити ефективність генерування, транспортування, розподілу і споживання електроенергії. Ефективна компенсація індуктивних струмів забезпечує економію ресурсів і підвищення якості електроенергії.

З огляду на відмінні особливості суднової електроенергетичної системи в порівнянні зі стаціонарними (береговими) системами електропостачання автономні (транспортні) електроенергетичні системи мають особливості, що впливають на їх статичні характеристики та динамічні перехідні процеси, які необхідно враховувати при їх проектуванні та експлуатації. В першу чергу це пов'язано з більш швидкодіючими змінами напруги та частоти при перемиканні споживачів, при включенні на паралельну роботу та при коротких замиканнях. Зменшення сталих часу електричних кіл збільшують швидкості протікання електромагнітних перехідних процесів, менші маси дизельних, газових або парових приводних двигунів автономних генераторів призводять до більш прискорених механічних процесів в енергетичних установках. Короткі лінії електропередачі автономної мережі не обмежують максимальні значення струмів та електромагнітних моментів в перехідних процесах, що відбуваються в електроенергетичних установках.

Приблизно однакова потужність приводних двигунів і генераторних електроагрегатів, різний нахил навантажувальних характеристик приводних двигунів та швидкодія їх регуляторів, режими паралельної роботи генераторів з різнотипними приводними механізмами впливають на протікання процесів в судновій автономній багатогенераторній електростанції. Крім того співвимірність потужності генераторів і навантаження, необхідність автономної роботи генераторів на електроприводи великої потужності призводять до більш тяжких перехідних режимів з небезпекою знеструмлення електроенергетичної установки.

Режими роботи сучасних багатогенераторних суднових електроенергетичних установок характеризуються різко змінним навантаженням з частими запусками

електроприводів співвимірної потужності. Проте під час перехідних процесів комутації статичного навантаження і пуску електродвигунів наявні судові компенсатори реактивної потужності управляються та змінюють свою реактивну потужність у відповідності зі сталим коефіцієнтом потужності навантаження, тобто динамічної компенсації не здійснюється. Це пояснюється недоліком науково-технічних досліджень та розробок в області керування реактивним струмом саме в динамічних режимах роботи, тобто в продовж часу сумірного з періодом напруги живлення.

Застосування в судовій електростанції джерел реактивної потужності буде ефективним, якщо при розробці системи керування будуть враховані особливості процесів в судовій електростанції, а також сучасні технологічні можливості вимірювання, синтезу законів керування і реалізації виконавчих елементів систем автоматизації.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-технічної проблеми динамічної компенсації реактивної потужності в судовій автономній електроенергетичній системі, до складу якої входить конденсаторна установка компенсації реактивної потужності шляхом синтезу законів керування генераторними установками та завдяки розробленим алгоритмам функціонування регуляторів, що підвищує ефективність експлуатації судових електроенергетичних систем та має важливе значення для морського транспорту і суднобудівної галузі.

У дисертації *вперше запропоновано* концептуальні засади проектування, модернізації та експлуатації судових електроенергетичних систем з установками динамічної компенсації реактивної потужності для підвищення енергоефективності експлуатації морських суден, зниження енергоспоживання, які спрямовані на поступове зниження викидів вуглекислотного газу в атмосферу об'єктами морського транспорту.

До основних наукових положень роботи, отриманими *вперше*, можна віднести наступні результати.

1. Вперше запропоновано виконувати компенсацію реактивної потужності в судових електроенергетичних системах у функції зміни реактивної провідності

навантаження, що на відміну від відомого керування у функції реактивного струму чи реактивної потужності дало змогу у перехідних режимах комутацій статичного та електродвигунного навантаження підвищити швидкодію та точність процесу компенсації реактивної потужності.

2. Вперше опрацьовано закон оптимального керування процесом компенсації реактивної потужності в режимах пуску асинхронного електропривода зі співвимірною з мережею потужністю, що у порівнянні з прямим його пуском дає змогу зменшити у два рази величину струму автономного генератора та зменшити коливальність на заключному етапі процесу пуску асинхронного двигуна.

3. Вперше опрацьовано модель оперативного вимірювання та розрахунку реактивної провідності навантаження в автономних суднових електроенергетичних системах, що дало змогу на основі неперервного контролю цього параметра у замкненій системі регулювання підвищити динамічну і статичну точність компенсації реактивної потужності та стабільність напруги автономної електромережі.

4. Вперше розроблено модель оптимального інтегрального імпульсного закону компенсації реактивної провідності навантаження у кожний період змінного струму автономної суднової електроенергетичної системи у режимах комутації статичного та електродвигунного навантаження, що у порівнянні з відомим усередненим законом дає змогу скоротити час відновлення напруги автономної мережі до 3-4 періодів зміни напруги.

5. Вперше запропоновано у структуру системи компенсації реактивної потужності автономної суднової електроенергетичної системи ввести додатковий зворотний зв'язок за напругою генератора, що дало змогу підвищити швидкодію регулювання та динамічну точність стабілізації напруги генератора.

6. Одержали подальший розвиток математичні моделі та розрахунки динамічних процесів і показників енергоефективності в автономних суднових електроенергетичних установках, що містять співвимірні за встановленою потужністю синхронні та асинхронні генераторні агрегати, електроприводи і навантаження та установки з додатковою конденсаторною установкою динамічної компенсації реактивної потужності.

Практична значимість отриманих результатів підтверджується доцільністю застосування в суднових автономних електроенергетичних установках систем динамічної компенсації реактивної потужності навантаження, які зі знайденими в результаті досліджень оптимальними структурою і співвідношенням параметрів систем керування дозволяють створити більш ефективну автономну електроенергетичну систему з синхронними або асинхронними генераторами, що включає конденсаторний компенсатор реактивної потужності. Швидкодія в такій установці буде суттєво (майже в 10 разів) вищою, а встановлена потужність генераторів меншою на 25-40%. На цей спосіб керування автономною електроенергетичною системою отримано 2 патенти України на винахід.

Практичним втіленням отриманих результатів є створений повномасштабний тренажерний комплекс суднової автоматизованої електроенергетичної системи, що відповідає вимогам Міжнародної Конвенції про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 р. з поправками (розділ А/1-12) та відповідає реальній конфігурації і компонуванню суднової автоматизованої електростанції з реальними споживачами і типовим навантаженням.

Тренажер повною мірою відповідає цілям і завданням практичної підготовки та перевірки компетентності офіцерів машинної команди з питань технічної експлуатації і обслуговування суднового обладнання і засобів автоматизації.

Новизна запропонованого технічного рішення тренажера, а також методичного забезпечення тренажерної підготовки та перевірки компетентності підтверджується патентом України на корисну модель, а також свідоцтвом про реєстрацію авторського права.

Ключові слова: суднова електроенергетична установка, динамічна конденсаторна компенсація реактивної потужності, реактивна провідність навантаження, пуск асинхронного електродвигуна сумірної потужності, стабілізація напруги синхронного генератора, асинхронний генератор

Список публікацій за темою дисертації

1. Муха Н.И. Управление реактивной мощностью автономных генераторных установок / Муха Н.И., Вишневский Л.В., Дудко С.А. – Монография – Одесса: НУ «ОМА». – 2016. – 144 с. – Библиогр.: с. 134-141. ISBN: 978-966-7591-68-7.

Здобувачу належить теоретичне обґрунтування і вибір енергетичних складових об'єкта дослідження та істотних процесів в них для створення єдиної дослідницької моделі, розробка законів керування пристроєм компенсації реактивної потужності з урахуванням особливостей суднової електроенергетичної установки, мінімального часу дискретності для процесу тиристорної комутації і одночасному вирішенні завдання стабілізації напруги автономної електроенергетичної установки.

2. Вишневский Л.В. Пуск асинхронных электродвигателей с компенсацией реактивной мощности / Вишневский Л.В., Муха Н.И., Павленко С.С. – Монография – Одесса: НУ «ОМА», – 2016. – 161 с. – Библиогр.: с. 150-160. ISBN: 978-966-7591-67-0.

Здобувачу належить розробка аналогових та імпульсних систем динамічної компенсації реактивної потужності в пускових режимах електродвигунів співвимірної потужності з урахуванням взаємної дії процесів у генераторах, навантаженнях і компенсуючому пристрої.

3. Вишневский Л.В. Управление напряжением автономных асинхронных генераторных установок / Вишневский Л.В., Муха Н.И., Дао Минь Куан – Монография – Одесса: НУ «ОМА», – 2016. – 196 с. – Библиогр.: с. 185-192. ISBN: 978-966-7591-71-7.

Здобувачу належить розробка методології та обґрунтування методів дослідження електроенергетичної установки з асинхронними дизель-генераторами, розробка адекватної математичної моделі суднової електроенергетичної установки як багатовимірного об'єкта автоматичного керування, що включає асинхронний генераторний комплекс, приводний дизельний двигун, системи управління частотою обертання і напруги, комутаційну апаратуру та типове суднове навантаження, теоретичне обґрунтування способу керування напругою і частотою струму в асинхронному короткозамкненому генераторі з конденсаторним збудження шляхом

зміни ємнісного струму (провідності конденсаторів збудження) і частоти обертання ротора генератора, аналітичне обґрунтування та вибір критеріїв оптимізації дискретної системи стабілізації напруги асинхронного генератора.

4. Вишне夫斯基 Л.В. Моделирование включения синхронных генераторов в судовую сеть / Вишне夫斯基 Л.В., Веретенник А.М., Муха Н.И., Козырев И.П. Електромашинобудування та електрообладнання. Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика: науч.-техн. сб. – Одесса: Видавництво «Техніка». – 2006. – № 66. – С. 201-204.

Здобувачу належить розробка методики дослідження включення синхронного генератора в судновий енергетичний потік та аналіз впливу налагоджувальних параметрів регулятора напруги на стійкість процесу синхронізації, висновки щодо проведених досліджень.

5. Муха Н.И. Идентификация параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя на основе экспертных оценок / Муха Н.И., Кувшинов А.И., Онищенко О.А. – Автоматизация судовых технических средств: Науч.-техн. сб. – Вып. 12. – Одесса: ОНМА. – 2007. – С.78-85.

Здобувачу належить ідея використання експертних оцінок для ідентифікації параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна та розробка методики експертних оцінок.

6. Муха Н.И. Диагностика дизель-генераторов автономных рефрижераторных установок / Муха Н.И., Глазева О.В., Дранкова А.О. – Холодильна техніка і технологія: Науково-технічний журнал. – Одеса: ОДАХ. – 2008. – Вип. 4. – С.86-88.

Здобувачу належить розробка математичної моделі дизель-генератора з врахуванням рівня деталізації процесів в приводному двигуні та залежності від задачі дослідження.

7. Муха Н.И. Судовые системы отбора и передачи мощности / Муха Н.И., Дудко С.А. // «АВТОМАТИКА-2008» Доклады XV международной конференции по автоматическому управлению, 23-26 сентября 2008г. Том 4. – Одесса: ОНМА. – С.6-9.

Здобувачу належить систематизація та аналітичний опис різних структур судових систем відбору потужності головного двигуна та валогенераторів, висновки щодо їх енергетичної та економічної ефективності.

8. Муха Н.И. Информационный подход к мониторингу технического состояния судовых дизель-генераторных установок / Муха Н.И., Миська А.Р., Дранкова А.О. Авиационно-космическая техника и технология: науч.-техн. жур. – Харьков: ХАИ. – 2010. – № 8(75). – С.136-139.

Здобувачу належить ідея інформаційного підходу до моніторингу технічного стану судових дизель-генераторів та розробка системи управління за технічним станом.

9. Муха Н.И. Аналитическое определение коэффициентов передачи асинхронного дизель-генератора / Муха Н.И., Дудко С.А., Дао Минь Куан – Электромашинобудування та електрообладнання: міжвідомчий науково-технічний журнал – Одеса: Видавництво «Техніка». – 2010. – № 76. – С.94-97.

Здобувачу належить розробка математичної моделі процесу збудження і встановлення гармонійних коливань асинхронного генератора та аналіз коренів характеристичного рівняння з комплексними коефіцієнтами, що дозволило отримати аналітичні вирази передавальних функцій і сталих часу для різних типів навантаження та вирази для коефіцієнтів передачі по каналам збудження, навантаження.

10. Муха Н.И. Анализ алгоритмов управления судовыми установками компенсации реактивной энергии / Муха Н.И., Дудко С.А.//Науково-виробничий журнал «Електромеханічні і енергозберігаючі системи». – Кременчук: КНУ, 2011. – Вип. 3 (15). – С. 83-86.

Здобувачу належить розробка алгоритмів управління судовими установками компенсації реактивної потужності.

11. Муха Н.И. Тренажер судовой автоматизированной электроэнергетической системы / Муха Н.И., Дранкова А.О., Волошин В.Н., Миська А.Р., Дудко С.А. - Авиационно-космическая техника и технология: науч.-тех. журнал. – Харьков: ХАИ. – 2011. – № 9(86). – С.207-211.

Здобувачу належить розробка концепції, структурної та принципіальної схем повномасштабного тренажерного комплексу суднової автоматизованої електроенергетичної системи на базі реального обладнання і сучасних засобів автоматизації.

12. Вишнеvский Л.В. Управление судовыми конденсаторными установками компенсации реактивной энергии / Вишнеvский Л.В., Муха Н.И., Дудко С.А. - Електротехнічні та комп'ютерні системи: наук.-техн. сб. – Київ: Видавництво «Техніка». – 2011. – №3(79). – С.330-333.

Здобувачу належить ідея та розробка функціональної схеми суднової синхронної електроустановки з компенсацією реактивної потужності як двох взаємопов'язаних систем: стабілізації напруги синхронного генератора та компенсації реактивної потужності навантаження. Теоретичне обґрунтування введення додаткового зворотного зв'язку по напрузі синхронного генератора в закон компенсації реактивної потужності та аналітичне дослідження змішаних законів компенсації реактивної потужності.

13. Муха Н.И. Практическая подготовка судовых электромехаников на полномасштабном тренажерном комплексе / Електромеханічні та енергозберігаючі системи: тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. №3(19). – С.589-593.

14. Муха Н.И. Компенсация реактивной энергии в судовой электроэнергетической системе при пусках асинхронных двигателей / Муха Н.И., Павленко С.С., Дудко С.А. - Електромеханічні та енергозберігаючі системи: тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. №3/ 2012(19). – С.283-287.

Здобувачу належить розробка способу керування реактивною потужністю в режимі пуску асинхронного електродвигуна.

15. Муха Н.И. Реализация дискретно-импульсных законов управления компенсацией реактивной энергии в судовых электроустановках / Муха Н.И., Дудко С.А. – Вісник СевНТУ. Збірник наукових праць. Серія: Механіка, енергетика, екологія. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – Вип. 132/2012. – С.86-92.

Здобувачу належить розробка імпульсних законів управління компенсацією реактивної потужності суднових електроустановок.

16. Муха Н.И. Динамические свойства системы стабилизации напряжения в режиме пуска асинхронного двигателя от судовой электростанции / Муха Н.И., Павленко С.С. - Электротехнические и компьютерные системы. Электротехнические комплексы и системы. Научно-технический журнал. Киев «Техника» – 2013. – Вып. 09(85). – С. 50-56.

Здобувачу належить розробка комп'ютерної моделі синхронного дизель-генератора і асинхронного електропривода, що включає системи автоматичного регулювання напруги синхронного генератора та частоти обертання приводного дизеля, висновки щодо проведених досліджень.

17. Муха Н.И., Павленко С.С. Дискретное управление конденсаторным компенсатором реактивной мощности в пусковых режимах мощных асинхронных двигателей /Муха Н.И., Павленко С.С. – Вісник Національного технічного університету «ХПІ», Збірник наукових праць. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу, Теорія і практика, - Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 36 (1009), – С. 412-416.

Здобувачу належить ідея цифрового керування конденсаторним компенсатором реактивної потужності, розробка та використання імпульсного інтегрального закону керування реактивною потужністю в пускових режимах потужних асинхронних двигунів, порівняльний аналіз лінійно-імпульсних законів регулювання реактивної провідності двигуна, що запускається від дизель-генератора співвимірної потужності, висновки щодо проведених досліджень.

18. Дранкова А.О. Использование нейронных сетей прямого распространения для прогнозирования технического состояния судовых дизель-генераторов /Дранкова А.О., Муха Н.И. – Вісник Національного технічного університету «ХПІ», Збірник наукових праць. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу, Теорія і практика, – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 36 (1009). – С. 505-506.

Здобувачу належить розробка математичної моделі дизель-генераторної установки та аналітичне обґрунтування використання нейронних мереж прямого розповсюдження для прогнозування її технічного стану.

19. Муха Н.И. О технико-эксплуатационных требованиях к полномасштабному тренажеру судовой автоматизированной электроэнергетической системы Одесской национальной морской академии / Муха Н.И., Дранкова А.О. – Проблемы підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах: Матеріали наук.-техн. конф., м. Севастополь, 23-27 вересня 2013 / М-во освіти і науки України, Севастоп. нац. тех. ун-т; наук. ред. А.М. Дегтярьов. – Севастополь: СевНТУ, 2013. – С. 161-166.

Здобувачу належить розробка структури, техніко-експлуатаційних вимог до повномасштабних тренажерів для підготовки та перевірки компетентності інженерів машинної команди судна.

20. Муха Н.И. О практической подготовке судовых электромехаников и механиков / Муха Н.И., Дранкова А.О. – Электротехнические и компьютерные системы. Научно-технический журнал. – К. Техніка. – 2014. – № 15 (91). – С. 416-422, ISSN 2221-3805 (Print).

Здобувачу належить розробка концепції практичної підготовки та перевірки компетентності офіцерів машинної команди судна, відповідного методичного забезпечення, розробка методу та принципів схем технічної реалізації SCADA управління та моніторингу тренажерним комплексом.

21. Дранкова А.О. Лаборатория микроконтроллерного управления и моделирования электромеханических систем / Дранкова А.О., Муха Н.И., Шестака А.И. Электротехнические и компьютерные системы. Научно-технический журнал. – К. Техніка. – 2014. – № 15 (91). – С. 435-440, ISSN 2221-3805 (Print).

Здобувачу належить розробка концепції та структури лабораторії, способу її технічної реалізації.

22. Муха М.Й. Тренажер суднової електроенергетичної системи / Муха М.Й., Дранкова А.О. // Патент на корисну модель UA99959 Україна, МПК (2015.01),

G09B 09/00, заявка № u201501660 від 25.02.2015, опубл. 25.06.2015, Бюл. № 12. – 6 с.

Здобувачу належить ідея та концепція створення тренажерного комплексу автоматизованої суднової електроенергетичної системи для практичної підготовки та перевірки компетентності суднових фахівців машинної команди, а також для наукової і науково-технічної підготовки магістрів, аспірантів і докторантів, проведення фундаментальних і прикладних досліджень в галузі експлуатації та автоматизації морських транспортних засобів.

23. Муха М.Й., Дранкова А.О. Твір навчального характеру «Полномасштабный тренажер судовой автоматизированной электроэнергетической системы для подготовки и проверки компетентности морских инженеров» Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 60895 від 28.07.2015 р., заявка від 14.04.2015 № 60510. – 57 с.

Здобувачу належить розробка методичного та програмного супроводу практичною підготовкою морських фахівців машинної команди судна.

24. Бушер В. В. Метод демпфирования колебаний груза с динамической коррекцией длины подвеса для контейнерных перегружателей [Електронний ресурс]/В. В. Бушер, Н. И. Муха, А. И. Шестака // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Энергосберегающие технологии. – науч. журнал. – 2015. – С. 58 – 63.

Режим доступу к ресурсу: journals.uran.ua/eejet/article/download/43405/41485.

Здобувачу належить ідея та метод енергоефективного управління електроприводом контейнерного перевантажувача, технічна реалізація експериментальної установки в складі тренажерного комплексу.

25. Патент на винахід UA112396 Україна, МПК (2006.01), G05F 1/70, H02J 3/18, H02J 3/38, H02P9/46. Спосіб управління автономною електроенергетичною системою / Вишневський Л.В., Муха М.Й., Тумольський О.П., Дудко С.А.; заявник і патентовласник автори патенту. – № a2015 09542; заявл. 05.10.2015; опубл. 25.08.2016, Бюл. №16. – 4с.

Здобувачу належить ідея способу управління автономною електроенергетичною установкою з конденсаторним компенсатором реактивного навантаження.

26. Патент на винахід UA 116656 Україна, МПК (2006.01), G05F 1/70, H02J 3/18, H02J 3/38, H02P 9/46. Спосіб управління автономною електроенергетичною системою та пристрій для його здійснення /Вишневський Л.В., Муха М.Й., Тумольський О.П., заявка № а 2015 11808 від 30.11.2015, опубл.25.04.2018, Бюл. № 8, кн. 1. – 5 с.

Здобувачу належить розробка конденсаторної імпульсної системи компенсації реактивної провідності у пусковому режимі електродвигуна.

27. Муха Н.И., Дранкова А.О. Тренажерная подготовка – важная часть практической подготовки судовых электромехаников и механиков // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINNTT-2016) [Збірка матеріалів VIII Міжнародної науково-практичної конференції (24-26 травня 2016 р., м. Херсон)]. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2016. – С. 64-69.

Здобувачу належить ідея та методи практичної тренажерної підготовки на повномасштабних тренажерних комплексах.

28. Моніторинг, діагностика та управління процесами та обладнанням судових енергетичних установок. Рукопис. Заключний звіт по НДР Інв. № 0716U002367, ОНМА, керівник роботи Муха М.Й., № ДР 0113U000637. - Одеса, 2015. – 178 с.

Здобувачу належить підготовка розділів 2,4,5, а також висновки та загальна редакція звіту.

29. Вишневский Л.В. Повышение технико-экономических показателей автономных электроустановок путем применения асинхронных генераторов/ Вишневский Л.В., Веретенник А.М., Муха Н.И. // Sciences of Europe (Global science center LP). – Praha (Czech Republic), vol.2, No 5 (5), 2016. Technical science. – pp. 67-72.

Здобувачу належить обґрунтування перспективного компонування судової електроенергетичної установки з асинхронними генераторними агрегатами.

30. M. Mukha “About practical preparation on the full mission simulator complex of the ship’s automated electric power plant”. *Proceedings of the 13–th International*

Conference on the Engine Room Simulators, September 20–21. – Odessa, Ukraine: National University “Odessa Maritime Academy”, 2017. – pp. 57-64, ISBN 978-966-7591-72-4.

31. PLC-based ship’s electromechanical systems laboratory / M. Mukha, A. Drankova, V. Bousher, A. Shestaka // *Proceedings of the 13–th International Conference on the Engine Room Simulators, September 20-21.* – Odessa, Ukraine: National University “Odessa Maritime Academy”, 2017. – pp. 183-190, ISBN 978-966-7591-72-4.

Здобувачу належить ідея створення лабораторії та розробка лабораторних стандартів.

32. Муха Н. И. Перспективная компоновка судовых автономных электроэнергетических систем / Н. И. Муха. // *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".* Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – №27(1249). – С. 285–288. ISSN 2079-8024,

33. M. Mukha “A Full Mission Simulator of the Ship’s Automated Electric Power System for Training and Competence Testing of Marine Engineers”. *David Publishing Company. Journal of Shipping and Ocean Engineering*, vol. 7, No 4 (2017) – pp. 153-160. doi 10.17265/2159-5879/2017.04.002; ISSN: 2159-5887.

34. M. Mukha “Comparative analysis of technical and economic characteristics of generator sets on the basis of synchronous and asynchronous generator”, *Computational problems of electrical engineering*, vol. 7, No 1, 2017. – pp. 57-61. ISSN 2224-0977.

Abstract

Mukha M. Dynamic compensation of reactive power in ship-based autonomous electric power systems. - Qualification scientific research as a manuscript.

The thesis of the doctor degree of technical sciences, specialty 05.09.03 - electro-technical complexes and systems. – National University “Odessa Maritime Academy”, Odesa, 2018. - Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2018.

It was stated that since January 2013 mandatory, including for Ukraine, requirements of the Supplementary Annex VI to the 1997 Protocol to the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL) and the energy efficiency of sea-going

vessels adopted by the Marine Environment Protection Committee of the International Maritime Organization (IMO MEPC), Resolution MEPC.203 (62). On the whole, Annex VI to the 1997 Protocol to the Convention is devoted to the prevention of air pollution from ships, which sets a number of requirements for the energy efficiency of marine vessels and aims at the gradual reduction of carbon dioxide emissions into the atmosphere by sea transport objects.

Due to the established mechanisms for the implementation of this objective, namely by calculating the Energy Efficiency Design Index (EEDI), which is an estimated calculated value and indicates the amount of carbon dioxide emissions from the vessel in relation to the volume of cargo carried (in grams per ton-mile), as well as by developing a Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) developed in accordance with the requirements and recommendations of the IMO and may be part of the security management system, there are ways and means of increasing energy efficiency of ship operation.

The requirement for ships to obtain a new International Energy Efficiency Certificate (IEEC) for the vessel to operate flights to foreign ports or offshore platforms under the jurisdiction of a foreign state establishes new rules for the management of energy efficiency of the vessel and ways to reduce energy consumption by water transport.

It is substantiated that one of the ways to increase energy efficiency of ship operation and energy consumption along with improving the operation of propulsion engines and optimizing the operation of ship equipment is to develop rational methods of electric energy management.

It is shown that undesirable losses arise in the production, distribution, transformation and use of electric energy in the ship's autonomous electric power system. In addition, ship electric consumers are mostly active-inductive, that is, the total current of the generator, transformers and cable lines should be increased in relation to the required active load current by the amount inversely proportional to the power factor, which increases the installed power of the electrical equipment and the cable section unions. Therefore, generating installations should provide additional reactive power, which in turn reduces their efficiency due to excessive fuel consumption of drive motors.

Instead of a single operation of a fully loaded generator, the time of parallel operation of generating sets with under loading increases to provide superfluous full power of electric consumers, including their reactive power. In this case, the motorcycle of electric aggregates are produced, the power plant works with low efficiency and corresponding fuel overcurrent.

In an autonomous ship power system, direct starting of a powerful electric motor is complicated or impossible due to the need to generate reactive current precisely during the transition process, which is commensurate with the rated current of the generator. At the same time, the dynamic failure and time of restoration of generator voltage increases significantly with the inclusion of loads with low power factor.

The compensation of reactive power should increase the efficiency of generation, transportation, distribution and consumption of electricity. Effective compensation of inductive currents provides saving of resources and improving the quality of electricity.

Given the distinctive features of the ship's power system compared to stationary (coastal) electricity supply systems, autonomous (transport) power systems have features that affect their static characteristics and dynamic transients that need to be taken into account when designing and operating them. First of all, this is due to more rapid changes in voltage and frequency when switching consumers, when switched on for parallel operation and with short circuits. Reducing the time constant of electric circuits increases the speed of electromagnetic transients, smaller masses of diesel, gas or steam driven engines of autonomous generators lead to more accelerated mechanical processes in power plants. Short-circuit power lines of an autonomous network do not limit the maximum values of currents and electromagnetic moments in the transient processes occurring in power plants.

Approximately the same power of drive motors and generator electric units, different inclination of loading characteristics of drive motors and the speed of their controllers, the modes of parallel operation of generators with different types of drive mechanisms affect the processes in the ship's autonomous many generating power plants. In addition, the equivalence of generator power and load, the need for autonomous operation of

generators for electric drives of high power lead to more severe transients with the risk of electricity from the power supply.

The operating modes of modern many generating marine electric power plants are characterized by a sharply variable load with frequent launches of electric drives of proportional power. However, during the transient processes of switching static load and starting up of electric motors, the available jet capacitors are controlled and change their reactive power in accordance with a constant load factor, ie, no dynamic compensation is made. This is due to the disadvantage of scientific and technical research and developments in the field of direct current control precisely in dynamic operating modes, that is, in the continuation of time proportional to the period of supply voltage.

The use of reactive power sources in a ship's power plant will be effective if, in developing the control system, the peculiarities of the processes in the ship's power plant are taken into account, as well as modern technological capabilities for measuring, synthesizing the laws of management and implementation of the executive elements of automation systems.

The dissertation is devoted to the solution of the scientific and technical problem of dynamic compensation of reactive power in a ship's autonomous electric power system, which includes a condenser unit for compensation of reactive power.

In the thesis for the first time the conceptual principles of designing, modernizing and exploiting ship power systems with dynamic compensation of reactive power for increasing energy efficiency of operation of sea vessels, reduction of energy consumption, aimed at the gradual reduction of carbon dioxide emissions into the atmosphere by objects of sea transport are proposed.

The main scientific findings of the work received for the first time include the following results.

1. It was proposed for the first time to perform compensation of reactive power in marine electric power systems in the function of changing the reactive conductivity of the load, in contrast to the known control in the function of reactive current or reactive power, which enabled the speed and accuracy of the reactive power compensation to be increased in the transitional modes of static and electric drive load commutation.

2. For the first time, the law of optimal control of the reactive power compensation process in the modes of starting an asynchronous electric drive with a commensurate power of network has been worked out, which, in comparison with its direct online start-up, makes it possible to reduce the current of an autonomous generator by two times and reduce the oscillation in the final stage of the starting process of an induction motor.

3. For the first time, a model of operational measurement and calculation of reactive load conductivity in autonomous ship electric power systems was developed, which allowed based on continuous monitoring of this parameter in a closed control system to increase dynamic and static accuracy of reactive power compensation and voltage stability of an autonomous power network.

4. For the first time, a model of an optimal integral discrete pulse law for compensation of reactive load conductivity in each alternating current period of an autonomous ship electric power system in the modes of switching of static and electric drive load is developed, which, in comparison with the known averaged law, allows reducing the time to restore of the voltage of autonomous network voltage to 3-4 periods of voltage changes.

5. For the first time, it was proposed to introduce an additional feedback on the voltage of the generator into the structure of the reactive power compensation system of the autonomous ship electric power system, which allowed to increase the speed of regulation and the dynamic accuracy of stabilizing the generator voltage.

6. Mathematical models and calculations of dynamic processes and energy efficiency indicators of ship electric power system have been further developed, which contain synchronous and asynchronous generator sets, electric drives and loads commensurate in terms of installed capacity, installations with an additional capacitor installation of dynamic reactive power compensation.

The practical significance of the results obtained is confirmed by the expediency of using in the ship's autonomous electric power systems of dynamic compensation of reactive load power, which, with the optimum structure and correlation of control system parameters found in the research, can be found to create a more efficient autonomous electric power system with synchronous or asynchronous generators, which includes a capacitor compensator for reactive power. The speed at such an installation will be

substantially (approximately 10 times) higher, and the installed generator power is lower by 25-40%. In this way, the management of the autonomous power system, as well as the method and device of the preventive management of the autonomous electric power system, received two patents of Ukraine.

The practical implementation of the results is the creation of a full mission simulation complex of the ship's automated electric power system, which complies with the requirements of the International Convention on the Training and Certification of Seafarers and the Watchkeeping 1978 with amendments (section A / 1-12) and corresponds to the actual configuration and layout of the ship's automated power plant real consumers and typical load.

The simulator fully meets the goals and objectives of the practical training and the competence testing of the machine team officers for the technical operation and maintenance of marine equipment and automation equipment.

The novelty of the proposed technical solution of the simulator, as well as the methodical provision of training and competence testing, is confirmed by the Ukrainian patent, as well as the certificate of registration of copyright.

Key words: ship electric power plant, dynamic capacitor compensation of reactive power, reactive load conductivity, start of asynchronous electric motor, voltage stabilization of synchronous generator, asynchronous generator

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ЗМІСТ	22
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	26
ВСТУП	28

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СИСТЕМ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

1.1. Реактивна потужність в автономних електроустановках	38
1.2. Компенсація реактивної потужності в автономних електроустановках	43
1.3. Установки статичної та динамічної компенсації реактивної потужності.....	52
1.4. Керування динамічними характеристиками системи стабілізації напруги синхронного генератора	60
1.5. Підвищення техніко-економічних показників автономних генераторних установок шляхом застосування асинхронних генераторів	65
1.6. Технічна реалізація динамічних конденсаторних систем компенсації реактивної потужності	73
1.7. Висновки до розділу 1	80

РОЗДІЛ 2. ПРОБЛЕМА ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Науково-технічні задачі дисертації	81
2.2. Особливості проектування та експлуатації суднових автономних електроенергетичних систем	83
2.3. Фізичне моделювання режимів роботи генераторних установок з конденсаторними джерелами реактивної потужності	85
2.4. Повномасштабний тренажерний комплекс суднової автоматизованої електроенергетичної системи	94
2.5. Математичні моделі автономної електроенергетичної системи з динамічною компенсацією реактивної потужності	104
2.5.1. Моделювання приводного двигуна електроенергетичної установки з регулятором частоти обертання	105
2.5.2. Моделювання суднових генераторів змінного струму	107
2.5.3. Моделювання електричного навантаження суднової генераторної установки	113
2.5.4. Моделювання систем збудження суднових синхронних і асинхронних генераторів	115
2.6. Висновки до розділу 2	117

РОЗДІЛ 3. ВИМІРЮВАННЯ ВЕЛИЧИН, ЩО ХАРАКТЕРИЗУЮТЬ РЕАКТИВНУ ПОТУЖНІСТЬ В НАВАНТАЖЕННІ

3.1. Динамічна зміна величин, що характеризують реактивну потужність при комутації навантаження	118
3.2. Зміна фізичних величин реактивної потужності при пуску асинхронного двигуна від суднової електростанції	123
3.3. Вимірювання реактивної провідності навантаження в колах трифазного змінного струму	129
3.4. Фільтрація регульованої координати в системі керування реактивною потужністю	134
3.5. Аналогове вимірювання параметрів трифазного змінного струму в системі компенсації реактивної потужності	137
3.6 Давач реактивної провідності навантаження	145
3.6. Висновки до розділу 3	148

РОЗДІЛ 4. ЗАКОНИ КЕРУВАННЯ СИНХРОННОЮ ГЕНЕРАТОРНОЮ УСТАНОВКОЮ З КОМПЕНСАЦІЄЮ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

4.1. Аналогові закони керування синхронною генераторною установкою	150
4.2. Використання додаткового зворотного зв'язку між регулятором напруги та компенсатором реактивної потужності	159
4.3. Аналіз імпульсних систем керування компенсацією реактивної потужності	166
4.3.1. Вибір періоду комутації компенсуючих конденсаторів	166
4.3.2. Реалізація імпульсних законів керування компенсацією реактивної потужності	169
4.3.3. Аналіз та оптимізація лінійних імпульсних законів керування компенсацією реактивної потужності	173
4.3.4. Аналіз оптимальних імпульсних законів компенсації реактивної потужності з різним періодом комутації конденсаторів	179
4.4. Висновки до розділу 4	184

РОЗДІЛ 5. КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

ПІД ЧАС ПУСКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

5.1. Моделювання і аналіз пускового режиму асинхронного двигуна з компенсацією реактивної потужності	187
5.2. Лінійні аналогові закони автоматичної компенсації реактивної потужності при пуску електродвигуна.....	196
5.3. Амплітудно-імпульсна система керування конденсаторним компенсатором реактивної потужності	204
5.4. Процеси лінійної імпульсної системи компенсації реактивної потужності при пуску електродвигуна	212
5.5. Реакція імпульсної системи компенсації реактивної потужності на гармонійний вплив	217
5.6. Висновки до розділу 5	220

РОЗДІЛ 6. РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ШЛЯХОМ КЕРУВАННЯ РЕАКТИВНОЮ ПОТУЖНІСТЮ СТАТОРНОГО КОЛА

6.1. Проблеми керування напруги генераторних установок з асинхронними генераторами	222
6.2. Асинхронний генератор як об'єкт автоматичного керування	224
6.3. Коефіцієнти передачі асинхронного генератора	236
6.4. Імпульсні системи керування реактивної потужності генераторних установок	240
6.5. Визначення умов стійкості в імпульсних системах стабілізації напруги генераторної установки	245
6.6. Визначення швидкодії та коливальних властивостей системи регулювання напруги асинхронної генераторної установки	248
6.7. Побудова перехідних процесів в імпульсних системах регулювання напруги генератора	260
6.8. Висновки до розділу 6	269

РОЗДІЛ 7. ОПТИМІЗАЦІЯ ТА ПОРІВНЯННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СУДНОВИХ ГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВОК

7.1. Вибір критерію оптимізації дискретної системи стабілізації напруги

асинхронного генератора	271
7.2. Оптимізація дискретної системи стабілізації напруги асинхронного генератора	274
7.3. Порівняння процесів комутації навантаження дизель-генераторних установок з синхронними та асинхронними генераторами	281
7.4. Порівняльний аналіз режимів включення на паралельну роботу генераторних установок з синхронними та асинхронними генераторами	292
7.5. Висновки до розділу 7	300
ВИСНОВКИ	302
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	308
ДОДАТКИ	332
Додаток А: Узагальнений алгоритм моделювання СЕЕС	332
Додаток Б: Акти використання результатів дисертаційної роботи	335
Додаток В: Патенти України	342
Додаток Г: Полномасштабний тренажер судової автоматизированной електроенергетической системы для подготовки и проверки компетентности морских инженеров	346
Додаток Д: Список публікацій за темою дисертації	401

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АРЩ - аварійний розподільний щит;

АГ – асинхронний генератор;

АГУ – асинхронна генераторна установка;

АД – асинхронний двигун;

БК – блок конденсаторів;
ВГ – валогенератор;
ГД – головний двигун;
ГРЩ – головний розподільний щит;
ДГ – дизель-генератор;
ДН – давач напруги;
ДК – допоміжний котел;
ДРП – давач реактивної потужності;
ДШ – давач швидкості;
ЕЕС – електроенергетична система;
ЕМС – електромеханічна система;
ЕП – електропривод;
ЕРС – електрорушійна сила;
КБ – конденсаторна батарея;
ПЛК – програмований логічний контролер;
ПЧ – перетворювач частоти;
РКЄ – регулятор компенсуючої ємності;
РН – регулятор напруги;
РП – реактивна потужність;
РС – регулятор струму;
РШ – регулятор швидкості;
РЩЖБ – розподільний щит живлення з берега;
САК – система автоматичного керування;
СГ – синхронний генератор;
СГУ – синхронна генераторна установка;
СЕЕС – суднова електроенергетична система;
СЕЕУ – суднова електроенергетична установка;
СІФК – система імпульсно-фазового керування;
СК – синхронний компенсатор;
СТК – статичний тиристорний компенсатор;

ТП – тиристорний перетворювач;

ТПН – тиристорний перетворювач напруги;

ТКРП – тиристорний компенсатор реактивної потужності;

ТГ – турбогенератор;

УКРП – установка компенсації реактивної потужності;

УК – утилізаційний котел.

ВСТУП

Зростаюча вантажопідйомність і швидкість сучасних суден, високий рівень енергонасиченості об'єктів транспортного флоту призводить до зростання потужності суднових електроенергетичних систем (СЕЕС), яка за останнє десятиліття зросла в півтора-два рази. Відношення потужності встановленого

електрообладнання до дедвейту судна, що розглядається як ступінь його електрифікації, має тенденцію до зростання. В даний час на кожну тисячу тон водотоннажності судна проектують в середньому електрообладнання номінальною потужністю 160-170 кВт. На кожну тисячу кіловат потужності пропульсивної установки доводиться 170-180 кВт потужності електродвигунів і в середньому близько 300 кВт потужності встановленого електрообладнання.

Останнім часом, починаючи з січня 2013 року стали обов'язковими, в тому числі і для України, вимоги доповненого Додатку VI до Протоколу 1997 р. Міжнародної конвенції щодо запобігання забрудненню із суден (МАРПОЛ), який присвячений питанням запобігання забрудненню повітряного середовища з суден, що встановлює ряд вимог до енергоефективності морських суден і спрямований на поступове зниження обсягу викидів вуглекислого газу в атмосферу об'єктами морського транспорту.

Через встановлені механізми реалізації зазначених вимог, а саме завдяки розрахунку коефіцієнта енергоефективності конструкції судна (англ. Energy Efficiency Design Index, EEDI), що представляє собою визначену розрахунковим шляхом величину і вказує обсяг викиду судном двоокису вуглецю у відношенні до обсягу перевезеного вантажу (в грамах на тономілю), а також завдяки розробці планів управління енергоефективністю судна (англ. Ship Energy Efficiency Management Plan, SEEMP) які розробляються відповідно до вимог і рекомендацій Міжнародної морської організації (англ. International Marine Organization, IMO), передбачаються шляхи і способи підвищення енергоефективності експлуатації суден.

Вимога щодо обов'язковості отримання суднами нового міжнародного свідоцтва про енергоефективність (англ. International Energy Efficiency Certificate, IEEC), щоб судна могли здійснювати рейси в іноземні порти, встановлює нові правила управління енергоефективністю судна і шляхи до зниження енергоспоживання на водному транспорті.

Одним із шляхів до підвищення енергоефективності експлуатації судна та зниження енергоспоживання наряду з вдосконаленням експлуатації рушіїв суден та

оптимізацією роботи суднового устаткування являється розробка раціональних методів керування електричною енергією.

Передача необхідної для електроспоживачів реактивної потужності (РП) – одна з основних складових технологічних втрат електроенергії в суднових мережах електропостачання. Незважаючи на те, що на вироблення РП паливо безпосередньо не витрачається, її передача по мережі викликає втрати активної енергії, які покриваються додатковою генерацією за рахунок додаткової витрати палива. Крім того, перетікання РП завантажує електричні мережі і встановлене в них обладнання (в першу чергу, суднові генератори і силові трансформатори), віднімаючи деяку частину їх пропускної здатності.

Якщо активна потужність виробляється тільки генераторами електричних станцій, то вироблення реактивної потужності можливе як генераторами електричних станцій, так і компенсуючими пристроями, що встановлюються на головних розподільних щитах (ГРЩ), або безпосередньо в електроустановках споживачів електроенергії. За рахунок компенсуючих пристроїв зменшується величина реактивної потужності, яка передається по мережі, що дозволяє знизити втрати потужності, електроенергії та напруги.

До складу автономної СЕЕС сучасного судна входить 3-5 генераторних установок відповідної потужності з приводними, як зазвичай, дизельними двигунами, головний та аварійний розподільні щити (ГРЩ і АРЩ) і щит живлення з берега (РЩЖБ) та близько 300-600 електроприводів суднових механізмів, систем та комплексів. Біля 90 % електроенергії, що виробляється судновими (в переважній більшості синхронними) генераторами, споживається електроприводами з асинхронними двигунами. В залежності від типових режимів експлуатації судна (ходовий, маневровий, вантажних операцій, стоянки без вантажних операцій, аварійний) і використанні відповідних суднових механізмів, навігаційних та безпекових умов судноплавства працює різне число генераторних агрегатів. Близько 10 % споживачів електроенергії являються асинхронними двигунами співвимірної з генераторами потужності. Середньостатистичне значення коефіцієнта потужності СЕЕС становить близько 0,7.

Завдяки тому, що суднові споживачі електроенергії в основному мають активно-індуктивний характер, повний струм генератора, трансформаторів та кабельних ліній повинен бути збільшений по відношенню до необхідного активного струму навантаження на величину обернено пропорційну значенню коефіцієнта потужності, що пропорційно збільшує встановлену потужність електрообладнання і перетин кабельних з'єднань. Генеруючі установки повинні забезпечити додаткові реактивні потужності, що в свою чергу знижує їх ефективність роботи через перевитрату палива приводних двигунів.

Пускові струми потужних асинхронних двигунів (АД) зумовлюють різке зниження напруги суднової електростанції. Це спричиняє ряд негативних наслідків, до яких можна віднести збільшення тривалості пуску двигунів та відновлення напруги генераторів, зменшення запасу статичної та динамічної стійкості електричної мережі суднової електроенергетичної системи. Одним із ефективних заходів стабілізації напруги під час пуску двигунів є динамічна компенсація реактивної потужності. Водночас для регулювання силових елементів пристроїв динамічної компенсації реактивної потужності в перехідних режимах необхідним є визначення їх оптимальних параметрів та оцінка ефективності процесу пуску.

Задача вибору оптимальних параметрів в перехідних режимах ускладнюється, оскільки реактивна потужність АД є складною функцією моменту навантаження, напруги силової мережі, опорів мережі та двигуна, струму збудження синхронних генераторів, а також залежить від нелінійності кривої намагнічування АД.

В сучасних суднових електроенергетичних системах застосовуються установки компенсації реактивної потужності (УКРП), які управляються та змінюють свою реактивну потужність у відповідності зі сталим коефіцієнтом потужності навантаження. Ємність конденсаторних установок зазвичай не використовується для мінімізації відхилень напруги суднової мережі при комутації навантаження. Пристрої для динамічної компенсації реактивної потужності в пускових режимах електроприводів практично не використовують. Це пояснюється недостатністю науково-технічних досліджень та розробок в області керування реактивним струмом

саме в динамічних режимах роботи, тобто в продовж часу сумірного з періодом напруги живлення.

Проте, наявність в автономній електроенергетичній системі з синхронними генераторами компенсуючих конденсаторів робить технічно можливим використання їх ємності не тільки для компенсації індуктивного навантаження, але й для керування напругою електростанції. Це також сприяє більш широкому використанні асинхронних генераторів з конденсаторним збудженням в якості суднових джерел живлення, причому останнім часом такі приклади компонування СЕЕС появляються все частіше.

Застосування в судновій електростанції джерел реактивної потужності буде ефективним, якщо при розробці систем керування будуть враховані особливості процесів в судновій електростанції, а також сучасні технологічні можливості вимірювання, синтезу законів керування і реалізації виконавчих елементів систем автоматизації. Пошук законів управління реактивним струмом суднової електроенергетичної системи, що містить генератори, активно-індуктивне навантаження та конденсаторні компенсатори реактивної потужності, повинен проводитися з урахуванням їх взаємного впливу та взаємодії.

Метою даної роботи є розвиток теорії динамічної компенсації реактивної потужності в автономній судновій електроенергетичній системі (СЕЕС), до якої додатково входить конденсаторна установка компенсації реактивної потужності, аналіз і синтез систем керування СЕЕС з заданими динамічними характеристиками процесів, а також підвищення стійкості та надійності таких систем завдяки розробленим законам керування.

Об'єкт дослідження – електромагнітні та електромеханічні процеси в судових системах автоматичного керування генераторними установками при регулюванні конденсаторними компенсаторами реактивної потужності навантаження.

Предмет дослідження – суднова автономна електроенергетична система, що включає конденсаторну установку динамічної компенсації реактивної потужності.

Для вирішення науково-технічної проблеми динамічної компенсації реактивної потужності в автономній судновій електроенергетичній системі необхідно вирішити наступні науково-технічні задачі:

1. Вибір методів та інструментів для дослідження динамічних процесів перетворення електроенергії в автономній СЕЕС. Розробка адекватних математичних моделей і комп'ютерних програм їх візуалізації для конкретних досліджуваних режимів і структур суднової електростанції з вибором мінімально необхідних елементів енергетичної системи та з урахуванням особливостей суднової електростанції, таких як співвимірність по потужності приводного двигуна, генератора, навантаження і компенсуючого пристрою, а також взаємного впливу процесів в них.

2. Аналіз вимірюваних величин з метою оптимального вибору вимірюваної координати, що характеризує величину реактивної потужності в навантаженні для використання її в системі динамічної компенсації з урахуванням того, що в перехідних процесах при зміні навантаження координати реактивної потужності змінюються відповідно з динамічними властивостями енергетичної системи. Цей вибір повинен визначати технічну реалізацію чутливих елементів в давачах, які будуть використані в системі керування реактивної потужності.

3. Дослідження та вибір сучасних схемних рішень та алгоритмів керування джерелом реактивної потужності для досягнення максимально швидкого генерування необхідного ємнісного струму. Аналіз процесів включення і відключення дискретних блоків конденсаторів за допомогою різних тиристорних схем та визначення мінімального часу дискретності для процесу тиристорної комутації. За час періоду комутації конденсаторів всі процеси вимірювання, фільтрації та усереднення по фазах повинні бути завершені. Синтез дискретного закону керування комутацією трифазних блоків конденсаторів.

4. Визначення закону керування реактивною потужністю в режимі пуску асинхронного електродвигуна при виборі раціонального співвідношення компенсуючої ємності під час розгону двигуна, поки його реактивна провідність максимальна і практично не змінюється, та під час встановлення сталої частоти обертання на

завершальному етапі розгону, коли реактивна провідність двигуна швидко зменшується.

5. Дослідження можливості керування напругою синхронного генератора шляхом зміни компенсуючої ємності в його статорних колах. Визначення оптимального поєднання законів зміни керуючих впливів в обмотці збудження та пристрої компенсації реактивної потужності навантаження з метою зменшення величини форсованого впливу в обмотці збудження генератора і зменшення часу перехідного процесу при зміні навантаження.

6. Дослідження законів керування компенсаторної установки в системі стабілізації напруги асинхронних генераторів, вирішення проблеми управління ємністю збудження асинхронного генератора, в тому числі й спільного керування асинхронними генераторами при паралельній роботі багато генераторних установок.

Перелічені задачі та проблеми не вичерпують питання керування реактивною потужністю в автономних генераторних установках, однак являються важливими і економічно виправданими, вимагають нових підходів до їх вирішення.

До основних наукових положень роботи, отриманими **вперше**, можна віднести наступні результати.

1. Вперше запропоновано виконувати компенсацію реактивної потужності в суднових електроенергетичних системах у функції зміни реактивної провідності навантаження, що на відміну від відомого керування у функції реактивного струму чи реактивної потужності дало змогу у перехідних режимах комутацій статичного та електродвигунного навантаження підвищити швидкодію та точність процесу компенсації реактивної потужності.

2. Вперше опрацьовано закон оптимального керування процесом компенсації реактивної потужності в режимах пуску асинхронного електропривода зі співвимірною з мережею потужністю, що у порівнянні з прямим його пуском дає змогу зменшити у два рази величину струму автономного генератора та зменшити коливальність на заключному етапі процесу пуску асинхронного двигуна.

3. Вперше опрацьовано модель оперативного вимірювання та розрахунку реактивної провідності навантаження в автономних суднових електроенергетичних

системах, що дало змогу на основі неперервного контролю цього параметра у замкненій системі регулювання підвищити динамічну і статичну точність компенсації реактивної потужності та стабільність напруги автономної електромережі.

4. Вперше розроблено модель оптимального інтегрального імпульсного закону компенсації реактивної провідності навантаження у кожний період змінного струму автономної суднової електроенергетичної системи у режимах комутації статичного та електродвигунного навантаження, що у порівнянні з відомим усередненим законом дає змогу скоротити час відновлення напруги автономної мережі до 3-4 періодів зміни напруги.

5. Вперше запропоновано у структуру системи компенсації реактивної потужності автономної суднової електроенергетичної системи ввести додатковий зворотний зв'язок за напругою генератора, що дало змогу підвищити швидкодію регулювання та динамічну точність стабілізації напруги генератора.

6. Одержали подальший розвиток математичні моделі та розрахунки динамічних процесів і показників енергоефективності в автономних суднових електроенергетичних установках, що містять співвимірні за встановленою потужністю синхронні та асинхронні генераторні агрегати, електроприводи і навантаження та установки з додатковою конденсаторною установкою динамічної компенсації реактивної потужності.

Практичним значенням отриманих результатів являється підтвердження актуальності застосування в суднових автономних електроенергетичних установках систем динамічної компенсації реактивної потужності навантаження. Знайдені в результаті досліджень оптимальні структури та співвідношення параметрів систем керування дозволяють створити більш ефективну автономну електроенергетичну систему з синхронними або асинхронними генераторами, що включає конденсаторний компенсатор реактивної потужності. Швидкодія в такій установці буде суттєво вища, а встановлена потужність генераторів менша на 25-40 %. На цей спосіб управління автономною електроенергетичною системою отримано 2 патенти України на винахід.

Практичним втіленням отриманих результатів являється створений повномасштабний тренажерний комплекс суднової автоматизованої електроенергетичної системи, що відповідає вимогам Міжнародної Конвенції про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 р. з поправками (розділ А/1-12) та відповідає реальній конфігурації і компонуванні суднової автоматизованої електростанції з реальними споживачами і типовим навантаженням.

Тренажер повною мірою відповідає цілям і завданням практичної підготовки та перевірки компетентності офіцерів машинної команди з питань технічної експлуатації і обслуговування суднового електрообладнання та засобів автоматизації.

Новизна запропонованого технічного рішення тренажера, а також методичного забезпечення тренажерної підготовки та перевірки компетентності підтверджується трьома патентами України, а також свідоцтвом про реєстрацію авторського права.

Апробація роботи (основні конференції, кількість і якість публікацій). Результати дисертаційної роботи доповідалися на наступних науково-технічних конференціях, семінарах і симпозіумах:

- XV міжнародній конференції по автоматичному управлінню «АВТОМАТИКА-2008» 23-26 вересня, Одеса, 2008 р.

- XV Міжнародному Конгресі двигунобудівників, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Крим, п. Рибаче, 14-19 вересня 2010 р.

- XVI Міжнародному Конгресі двигунобудівників, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Крим, п. Рибаче, 14-19 вересня 2011 р.

- XVIII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика», Одеса, 2011 р.

- XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика», Кременчук, 2011 р.

- XIX Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика», Україна, Крим, смт Миколаївка, 2012 р.

- XX Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика», Україна, Крим, 2013 р.

- Науково-технічній конференції «Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах», м. Севастополь, 23-27 вересня 2013 р.

- XXI міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика», Одеса, 2014 р.

- VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINNTT-2016)», м. Херсон, 24-26 травня 2016 р.

- XXIII міжнародній об'єднаній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електропривода. Силова електроніка та енергоефективність», Харків, 2017 р.

- 13th International Conference on the Engine Room Simulators, September, 20-21. – Odessa, 2017.

- На семінарі «Проблеми динаміки автоматизованих електромеханічних систем змінного струму», секція 2 «Електромеханічне перетворення і генерування енергії» Наукової Ради з проблеми «Наукові основи електроенергетики», НАН України Інститут Електродинаміки, м. Одеса, травень, листопад 2017 р.

- На семінарі «Моделі та методи комп'ютерного аналізу електричних кіл та електромеханічних систем», секція 6 «Проблеми теорії полів і кіл в електроенергетичних установках» Наукової Ради з проблеми «Наукові основи електроенергетики», НАН України Інститут Електродинаміки, м. Львів, січень 2018 р.

Основні результати дисертаційного дослідження доповідалися на щорічних науково-методичних конференціях професорсько-викладацького складу Національного університету «Одеська морська академія», починаючи з 2006 року, а також на щорічних науково-методичних конференціях факультету електромеханіки і

радіоелектроніки НУ «ОМА» «Актуальні питання суднової електротехніки і радіотехніки», починаючи з 2011 р.

Публікації. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані у 34 друкованих наукових працях (5 без співавторів), серед яких 3 монографії, 20 статей опубліковані у наукових фахових виданнях України (з них 8 індексуються у наукометричних базах даних,), 3 у закордонних періодичних наукових виданнях (з них 1 індексуються у наукометричних базах даних, 1 – у Scopus), 2 статті – у працях міжнародних конференцій на англійській мові; 2 патенти України на винахід та 1 на корисну модель.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, семи розділів, висновків до роботи, списку використаної літератури, переліку використаних позначень та додатків. Повний обсяг становить 404 стор. Робота містить: 151 ілюстрації до тексту, 29 з них на 21 окремих сторінках; перелік умовних позначень на 2 сторінках; список використаних джерел із 226 найменувань на 23 сторінках; додатки на 73 сторінках. Обсяг основного тексту становить 285 сторінок.

1. АНАЛІЗ СИСТЕМ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

1.1 Реактивна потужність в автономних електроустановках

Процес компенсації реактивної потужності в навантаженні автономної електроустановки вимагає уточнення поняття реактивної потужності. Розглянемо спрощене коло однієї фази автономного генератора змінного струму G зі змішаним навантаженням: з активним опором R , індуктивністю L і ємністю C , рис. 1.1, а, [18].

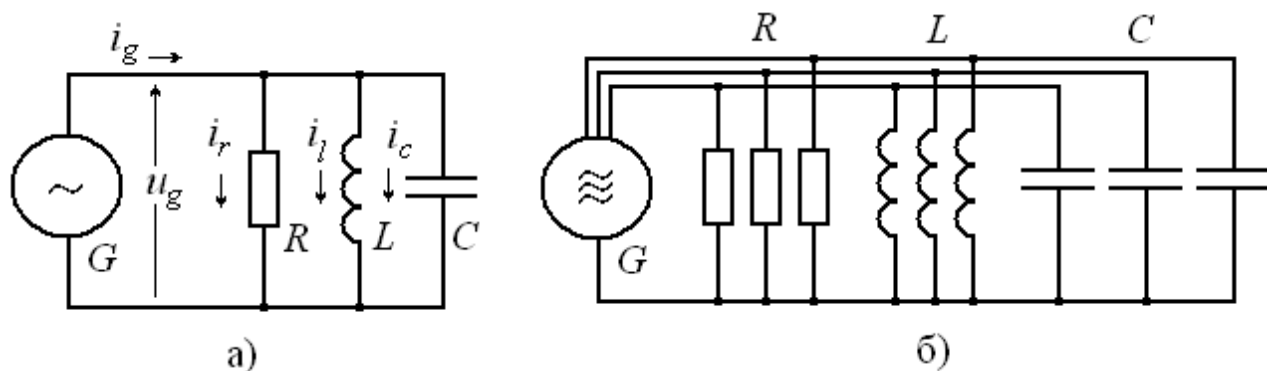


Рис. 1.1. Активно-індуктивно-ємнісне навантаження однофазного (а) і трифазного (б) генератора

При синусоїдальній напрузі генератора $u_g = U_m \cdot \sin \omega t$ в сталому режимі у колах навантаження протікають активний i_r , індуктивний i_l і ємнісний i_c струми. Вони утворюють струм генератора $i_g = i_r + i_l + i_c$:

$$i_r = I_{mr} \cdot \sin \omega t = \frac{U_m}{R} \cdot \sin \omega t; \quad i_l = -I_{ml} \cdot \cos \omega t = -\frac{U_m}{\omega L} \cdot \cos \omega t;$$

$$i_c = I_{mc} \cdot \cos \omega t = \omega C \cdot U_m \cos \omega t.$$

Струм активного навантаження i_r по фазі збігається з синусоїдальною напругою генератора u_g , індуктивний струм i_l відстає, а ємнісний струм i_c випереджає напругу на 90° , рис. 1.2, [118].

Миттєва потужність в колах навантаження дорівнює добутку миттєвих значень напруги і струму на відповідному елементі. Потужність, яка виділяється на активному опорі R , є активною, її миттєве значення дорівнює:

$$p_r = u_g \cdot i_r = U_m \sin \omega t \cdot I_{mr} \sin \omega t = \sqrt{2}U \sqrt{2}I_r \sin^2 \omega t = UI_r(1 - \cos 2\omega t),$$

де U, I_r - діючі значення напруги і струму активного опору.

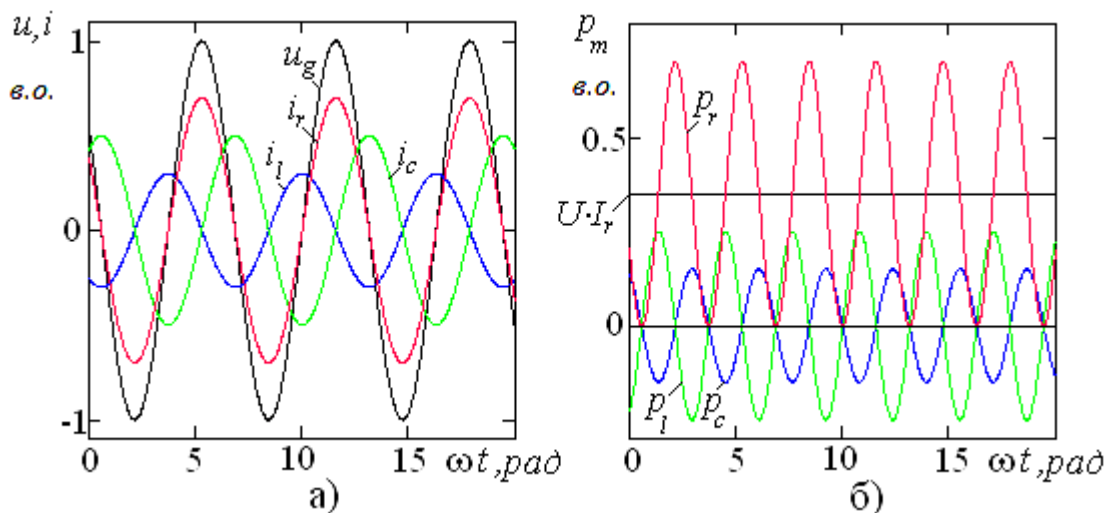


Рис. 1.2. Миттєві значення струмів (а) і потужності (б) в колах навантаження

Миттєва потужність в колі змінного струму змінюється з подвоєною частотою мережі 2ω , а середнє значення активної потужності p_r дорівнює добутку діючих значень напруги і струму $U \cdot I_r$ на активному опорі R . Середнє значення миттєвої активної потужності за період струму називається активною потужністю P , тобто:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p_r dt = \frac{1}{T} \int_0^T U \cdot I_r (1 - \cos 2\omega t) dt = U \cdot I_r = \frac{U^2}{R} = I_r^2 R$$

Миттєві потужності в колах індуктивного та ємнісного навантаження відповідно дорівнюють:

$$p_l = u_g \cdot i_l = U_m \sin \omega t \cdot (-I_{ml} \cos \omega t) = -\sqrt{2}U\sqrt{2}I_l \sin \omega t \cdot \cos \omega t = -UI_l \sin 2\omega t;$$

$$p_c = u_g \cdot i_c = U_m \sin \omega t \cdot I_{mc} \cos \omega t = \sqrt{2}U\sqrt{2}I_c \sin \omega t \cdot \cos \omega t = UI_c \sin 2\omega t.$$

Таким чином, миттєві потужності на реактивних елементах пульсують з подвійною частотою мережі з нульовим середнім значенням:

$$p_{lcp} = \frac{1}{T} \int_0^T p_l dt = -\frac{1}{T} \int_0^T U \cdot I_l \sin 2\omega t \cdot dt = 0$$

$$p_{c\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T p_c dt = \frac{1}{T} \int_0^T U \cdot I_c \sin 2\omega t \cdot dt = 0$$

Енергія, споживана реактивним елементом від генератора в першу чверть періоду струму, повертається в мережу в другу чверть періоду, тобто не йде з електричного кола і не здійснює роботи, якщо немає втрат в проводах.

Сумарне споживання потужності на реактивному елементі за період струму дорівнює нулю, причому миттєві потужності на індуктивності p_l і ємності p_c коливаються у протифазі, виконуючи обмін енергіями між реактивними елементами. У час, коли ємність запасає енергію, індуктивність її віддає. Це означає, що ємність і індуктивність обмінюються енергією.

Якщо паралельно індуктивності навантаження підключити компенсуючі конденсатори, то зникає необхідність в обміні енергією між генератором і індуктивністю, а можна забезпечити обмін енергією між реактивними елементами. У разі рівності реактивних провідностей $Y_l = Y_c$ струми i_l та i_c циркулюють у коливальному контурі, не проходять через коло генератора і не створюють додаткових втрат енергії в колі між джерелом живлення та навантаженням. В цьому і полягає суть конденсаторної компенсації для індуктивних споживачів.

Пульсації миттєвої потужності в елементах, де електрична енергія виконує механічну роботу, викликає гармонійні коливання механічних сил або моментів. Від цього недоліку вільна трифазна електрична мережа, рис. 1.1, б. Миттєві значення сумарної потужності фаз дорівнюють постійному значенню:

$$p_r = u_{ga} \cdot i_{ra} + u_{gb} \cdot i_{rb} + u_{gc} \cdot i_{rc} = U_a I_{ra} (1 - \cos 2\omega t) + U_b I_{rb} (1 - \cos 2(\omega t + 120^\circ)) + U_c I_{rc} (1 - \cos 2(\omega t + 240^\circ)) = 3U I_r;$$

$$\begin{aligned} p_l &= u_{ga} \cdot i_{la} + u_{gb} \cdot i_{lb} + u_{gc} \cdot i_{lc} = \\ &= -U_a I_{la} \cdot \sin 2\omega t - U_b I_{lb} \cdot \sin 2(\omega t + 120^\circ) - U_c I_{lc} \cdot \sin 2(\omega t + 240^\circ) \\ &= 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_c &= u_{ga} \cdot i_{ca} + u_{gb} \cdot i_{cb} + u_{gc} \cdot i_{cc} = \\ &= U_a I_{ca} \cdot \sin 2\omega t + U_b I_{cb} \cdot \sin 2(\omega t + 120^\circ) - U_c I_{cc} \cdot \sin 2(\omega t + 240^\circ) \\ &= 0; \end{aligned}$$

Миттєва активна потужність дорівнює сумі активних потужностей фаз, а миттєва реактивна потужність дорівнює нулю.

Реактивна потужність не виконує роботи, вона носить умовний характер і характеризує навантаження в електротехнічних пристроях, викликане коливаннями енергії електромагнітного поля в елементах кола змінного струму. При синусоїдальних електричному струмі і електричній напрузі реактивна потужність Q визначається як величина, що рівна добутку діючого значення напруги на діюче значення струму і на синус зсуву фаз між напругою і струмом $\sin \varphi$: $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$.

Якщо струм навантаження відстає від напруги мережі, то зсув фаз вважається позитивним, а навантаження – активно-індуктивним. Якщо струм елемента випереджає напругу, то зсув фаз буде негативний, а навантаження носить ємнісний характер.

При підключенні до електричної мережі активно-індуктивного навантаження струм відстає від напруги на кут зсуву φ . Косинус цього кута $\cos \varphi$ називається коефіцієнтом потужності

Таке навантаження споживає як активну $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$, так і реактивну потужність $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$, при цьому повна потужність у навантаженні дорівнює $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

Активна потужність перетворюється споживачем в інші види енергії: механічну, теплову, енергію стисненого газу, води і т. п. Реактивна потужність не пов'язана з корисною роботою і витрачається на створення електромагнітних полів в електродвигунах, трансформаторах, лініях електропередачі. Якщо струм відстає від напруги, то зсув фаз вважається позитивним, а навантаження – активно-індуктивним. Якщо струм випереджає напругу, то зсув фаз негативний, а навантаження носить ємнісний характер, таким чином, реактивна потужність може мати індуктивний або ємнісний характер. Умовно прийнято вважати реактивну індуктивну потужність Q_l такою, що споживається, а реактивну ємнісну потужність Q_c такою, що генерується.

Необхідність врахування реактивної потужності обумовлена тим, що при проходженні реактивного струму в колі виникають активні втрати на нагрівання провідників. Характеристикою цих втрат є показник $\tan \varphi = (Q_l - Q_c)/P$, що визначає

частину втрати потужності, спричиненої проходженням реактивного струму. Ця величина називається коефіцієнтом реактивної потужності.

В електроенергетичних системах реактивна потужність необхідна для створення електромагнітних полів трансформаторів, електродвигунів та перетворювачів, частка яких у всьому обсязі електрообладнання може бути значною. Споживачами реактивної потужності являються, наприклад, асинхронні двигуни ($\cos \varphi \approx 0.7$), недовантажені асинхронні двигуни і трансформатори ($\cos \varphi \approx 0.5$), електролізні та електродугові установки ($\cos \varphi \approx 0.6$), компресори ($\cos \varphi \approx 0.7$), станки $\cos \varphi \approx 0.5$, зварювальні трансформатори ($\cos \varphi \approx 0.4$), [61, 63, 97].

Назвемо ряд проблем, пов'язаних з необхідністю генерування реактивної потужності в автономній електроустановці, [11, 12, 14, 19, 21, 108].

1. Повний струм генератора, трансформаторів та ліній електропередачі повинен бути збільшений по відношенню до необхідного активного струму навантаження на величину $1/\cos \varphi$, що пропорційно збільшує встановлену потужність електрообладнання і перетин кабельних з'єднань. Так, якщо $\cos \varphi$ навантаження становить 0.8, то встановлена потужність обладнання зростає на 25%, а якщо $\cos \varphi = 0.7$, то на 43%, що є суттєвим.

2. Замість одиночної роботи генератора з повним завантаженням збільшується час паралельної роботи генеруючих агрегатів з недовантаженням для забезпечення надлишкової повної потужності електроспоживачів, що включає їх реактивну потужність. При цьому виробляється моторесурс електроагрегатів, електростанція працює з низьким ККД і перевитратою палива.

3. Прямий пуск потужного електродвигуна утруднений або неможливий із-за необхідності генерувати реактивний струм, сумірний з номінальним струмом генератора.

4. Істотно збільшується динамічний провал і час відновлення напруги генератора при включенні навантажень з низьким коефіцієнтом потужності.

5. Необхідність оплати за споживання реактивної потужності при роботі від стаціонарної (берегової, наземної) енергосистеми.

Існує щонайменше дві можливості вирішити ці проблеми. Перша – це удосконалення технологічного процесу шляхом зменшення часу роботи недовантажених електроагрегатів: випрямлячів, трансформаторів, електродвигунів та ін. Інший радикальний шлях – ємнісна компенсація індуктивного струму споживачів електроенергії, [26, 53, 54].

1.2 Компенсація реактивної потужності в автономних електроустановках

Компенсація реактивної потужності підвищує ефективність генерування, транспортування, розподілу і споживання електроенергії. Ефективна компенсація індуктивних струмів забезпечує економію ресурсів і підвищення якості електроенергії, [1, 25, 70, 71, 80, 102, 107]. Знижений коефіцієнт потужності споживчої мережі вимагає збільшення потужності генеруючих, трансформуючих та передавальних установок і мереж. Зростають втрати і необхідні перетини проводів кабелів.

В автономних енергосистемах споживачами являються асинхронні двигуни (70%), трансформатори (20%), реактори, люмінесцентні лампи (10%), що містять індуктивності, які і є споживачами реактивної енергії. У той же час, перезбуджені синхронні машини, конденсатори фільтрів і кабельні лінії генерують реактивний струм, [81, 84].

Компенсація реактивної потужності споживачів вирішує проблему підвищення ККД системи автономного електропостачання об'єкта, що підвищує кількість генерованої електроенергії та забезпечує її раціональне використання.

При споживанні надлишкової реактивної потужності розробники енергосистем змушені завищувати встановлену потужність електричних генераторів автономного об'єкта для покриття всіх потреб. Передача реактивної потужності на відстань значно збільшує втрати в лініях електропередачі, знижує напругу на шинах споживачів, [84, 88].

Для автономних (суднових) енергетичних систем передача реактивної потужності на відстань актуальна тільки в режимі живлення судна від стаціонарної (берегової) електричної мережі, т.я. за неї встановлюється додаткова оплата, [77, 89,

115]. Електромережі суднових енергосистем короткі і втрати енергії в них незначні, тому їх мінімізація не окупає витрат на установки компенсації реактивної потужності (УКРП).

Зниження реактивної потужності споживачів може бути досягнуто раціоналізацією технологічних процесів шляхом заміни недовантажених електроагрегатів менш потужними, вибором оптимальної конфігурації живильної мережі, [144, 145].

Найбільш ефективним вирішенням проблеми реактивної потужності являється її компенсація у розподільних щитах або безпосередньо біля споживача, [13, 75, 77, 90, 104, 150, 157, 173].

Компенсація може бути індивідуальною та централізованою. У першому випадку паралельно до кожного споживача підключають компенсуючий пристрій відповідної ємності, у другому випадку більш потужний керований компенсуючий пристрій підключається до розподільного щита.

При індивідуальній компенсації регулювання реактивної потужності, як правило, не проводиться і вона виправдовує себе при невеликій кількості індуктивних споживачів з відносно постійним споживанням енергії. Централізована компенсація застосовується в системах з великою кількістю споживачів, що мають змінний коефіцієнт потужності, при цьому контроль за реактивною потужністю в мережі та її компенсація здійснюється автоматично.

Застосовується також змішана схема компенсації, коли реактивна потужність великих споживачів частково компенсується конденсаторами постійної ємності, а змінна частина реактивної потужності та реактивна потужність дрібних споживачів компенсується автоматичною установкою, підключеною до головного розподільного щита.

Приклад типової автономної електроенергетичної системи транспортного судна з компенсацією реактивної потужності наведено на рис. 1.3.

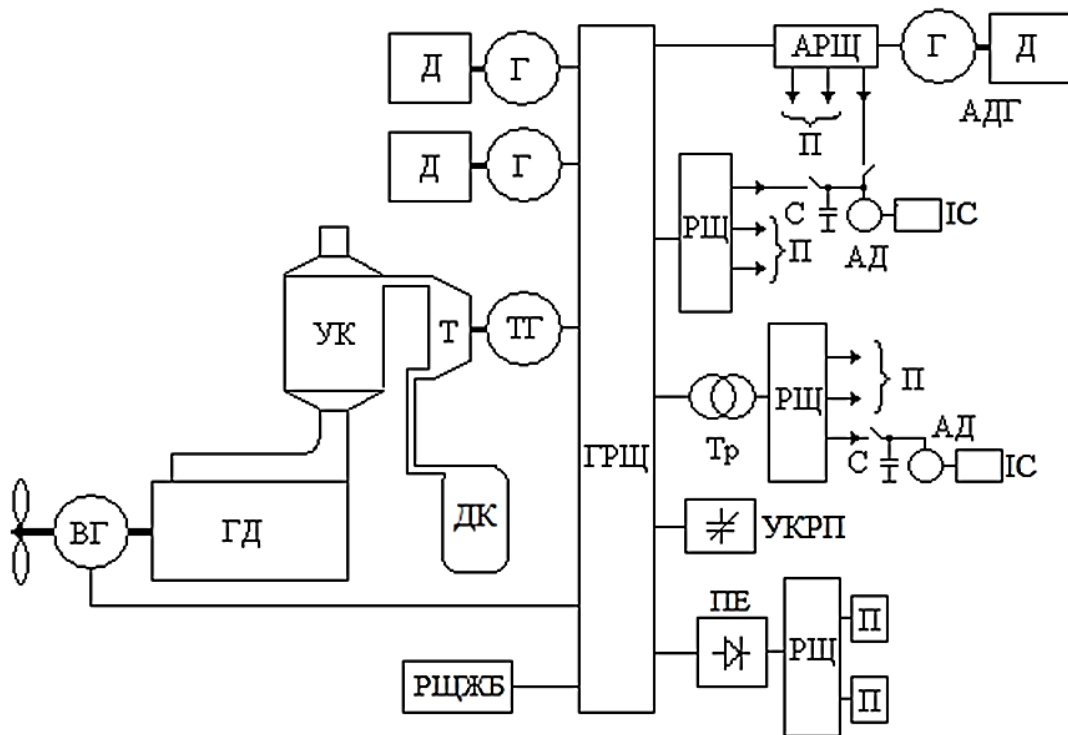


Рис. 1.3. Типова електроенергетична система транспортного судна з компенсацією реактивної потужності

Регульована УКРП підключена до головного розподільного щита (ГРЩ) судна, а конденсатори постійної ємності (С) розташовуються поблизу потужних індивідуальних споживачів електроенергії (ІС). Таким споживачем може бути, наприклад, асинхронний двигун (АД) баластного насосу або компресора.

Ця система містить такі силові елементи: приводні двигуни (Д), електричні генератори (Г), турбогенератор (ТГ) і валогенератор (ВГ), головний розподільний щит (ГРЩ), аварійний (АРЩ) і допоміжні розподільні щити (РЩ), розподільний щит живлення з берега (РЩЖБ), тиристорні перетворювачі електроенергії (ПЕ), трансформатори (Тр) і електричні споживачі (П). В якості джерел електроенергії на суднах застосовують синхронні генератори, а також акумуляторні батареї. Для приводів генераторів застосовують дизелі, парові або газові турбіни (Т). З метою більш повного використання енергії головного двигуна (ГД) в якості генераторів використовують валогенератори та утилізаційні турбогенератори. Пар для приводу турбіни може подаватися утилізаційним (УК) та допоміжним котлом (ДК).

Генера́торами реактивної потужності являються косинусні конденсатори, перезбудженні синхронні двигуни і генератори, синхронні компенсатори, тиристорні перетворювачі з штучною комутацією, [29, 75, 79, 103, 151, 163, 172]. Компенсувати індуктивний струм можна синхронними компенсаторами або генераторами, а також косинусними конденсаторами, [72, 78, 87].

Найпоширенішими пристроями статичної компенсації реактивної потужності розподільних мереж промислового електропостачання являються автоматизовані конденсаторні установки з управлінням ступенями конденсаторних батарей за допомогою спеціальних електромеханічних контакторів, [13, 161, 162], рис. 1.4, а.

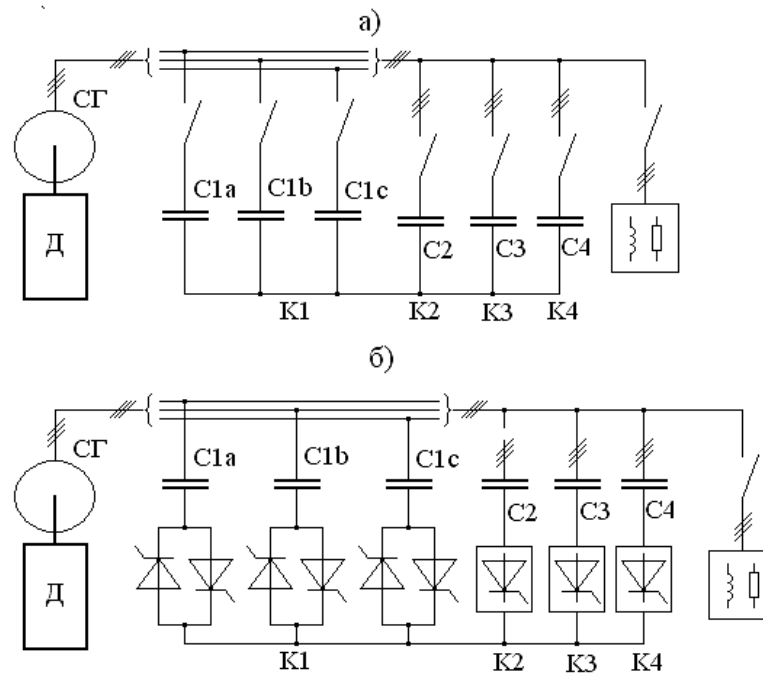


Рис. 1.4. Застосування контакторних (а) і тиристорних (б) установок компенсації реактивної потужності в автономних електростанціях

Широке застосування конденсаторів для компенсації реактивної потужності пояснюється їх значними перевагами в порівнянні з іншими видами компенсуючих установок: незначні питомі втрати активної потужності до 0,005 кВт/кВАр, відсутність обертових частин, простота монтажу й експлуатації, відносно невисока вартість, мала маса (0.1 кг/кВА), відсутність шуму під час роботи, можливість установки близько окремих груп споживачів. Недоліки конденсаторних батарей: пожежо-небезпека, наявність залишкового заряду, що підвищує небезпеку при

обслуговуванні; чутливість до перенапруги і кидків струму; можливість тільки ступеневого, а не плавного регулювання потужності.

Конденсаторні установки складаються з кількох трифазних секцій косинусних конденсаторів, комутованих до мережі ключовими елементами. В якості ключів в конденсаторних установках можуть застосовуватись контактори, рис. 1.4, а чи тиристори, рис. 1.4, б. Контактторні установки отримали найбільш широке поширення із-за простої реалізації та низької вартості в порівнянні з тиристорними конденсаторними установками, [145].

Якщо навантаження має змінний характер, то для комутації конденсаторів застосовуються тиристори, так як вони мають найбільш високу швидкодію. Комутація конденсаторів в тиристорних конденсаторних установках відбувається при нульовому значенні струму, що значно збільшує термін служби конденсаторів, а також усуває іскріння та електромагнітні перешкоди.

Істотним недоліком конденсаторних установок є вплив вищих гармонік на термін служби конденсаторних установок. У мережах електропостачання з нелінійними навантаженнями виникають 5, 7, 11 гармоніки струму, які за своєю величиною бувають сумірними з першою гармонікою. Конденсатори установок компенсації реактивної потужності паралельно з індуктивністю навантаження можуть утворювати коливальні контури, близькі по частоті резонансу до частот вищих гармонік, що призводить до значного збільшення струму конденсаторів. Виникаючі перенапруги можуть привести до пробою ізоляції. Для усунення подібних явищ застосовуються індуктивні фільтри, налаштовані на частоту найбільш значних гармонік, [144].

Складність плавної зміни ємності силових конденсаторних батарей викликала до життя компромісний підхід, пов'язаний з використанням регульованих індуктивних реакторних пристроїв у поєднанні з нерегульованими секціями конденсаторів. Такі пристрої отримали назву статичні тиристорні компенсуючі пристрої.

Індуктивний або статичний тиристорний компенсатор (СТК) представляє собою пристрій для плавного регулювання реактивної потужності та утримання її значення в заданих межах. Принцип роботи компенсатора заснований на включенні

в мережу конденсаторних фільтрів вищих гармонік і паралельно їм комутованих тиристорами реакторів. При цьому конденсатори включені в мережу постійно, рис. 1.5. Плавне регулювання реактивної потужності досягається шляхом зміни часу комутації реакторів за рахунок зміни кута вмикання тиристорів.

Фазовий зсув включення тиристорів змінюється регулятором таким чином, щоб струм у реакторі компенсував реактивний струм навантаження або реактивну потужність в енергосистемі. Система управління забезпечує швидку компенсацію реактивної потужності навантаження і підтримання регульованого параметра відповідно до заданого уставкою, виконує захист обладнання, контроль і сигналізацію відмов.

Час реакції системи на зміни регульованого параметра становить 20-100 мс для загальнопромислових навантажень та мережевих підстанцій. Компенсатор має рівень автоматизації, що забезпечує його роботу без постійної присутності персоналу. Управління здійснюється від пульта дистанційного керування або від АСУ ТП через зовнішній інтерфейс.

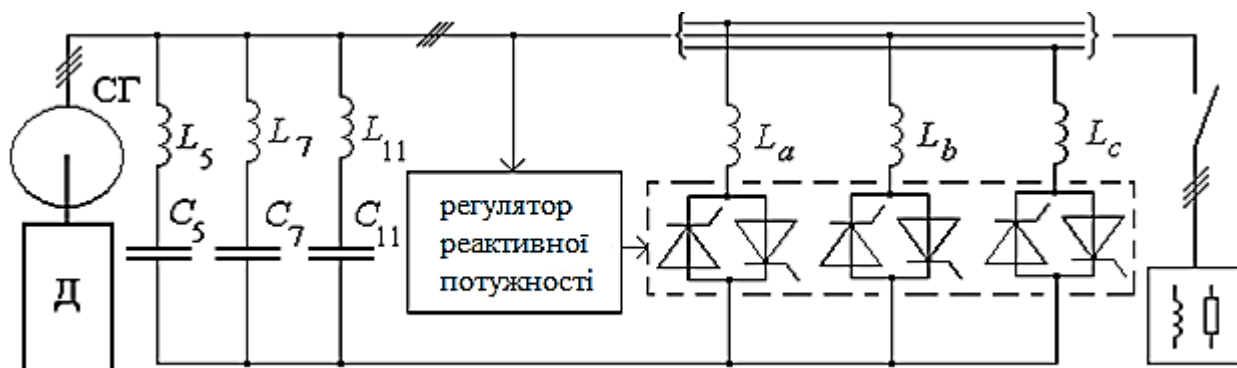


Рис. 1.5. Індуктивний компенсатор реактивної потужності

При використанні СТК на лініях електропередачі високої напруги його ефективність тим більше, чим вище точка підключення. Обладнання СТК зазвичай виконується на клас напруги від 10 до 35 кВ і підключається через спеціальний понижуючий трансформатор до шин підстанції, або до третинної обмотки підстанційного автотрансформатора.

Альтернативою конденсаторних установок генерації реактивної потужності є синхронний компенсатор, рис. 1.6.

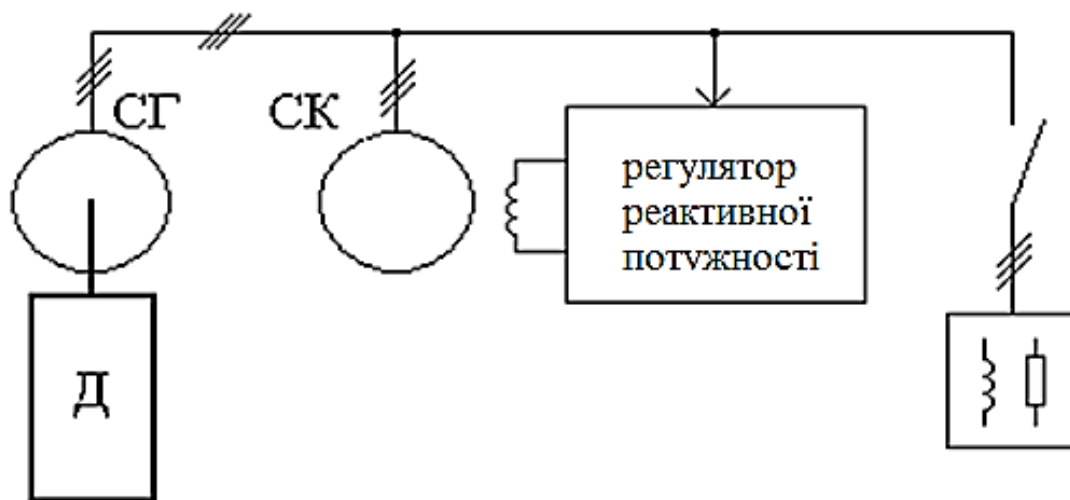


Рис.1. 6. Синхронний компенсатор (СК) реактивної потужності

Синхронний компенсатор - це синхронна електрична машина, що працює в режимі холостого ходу, тобто без навантаження на валу. Споживана ним активна потужність дорівнює втратам неробочого (вільного) ходу, тому компенсатор завантажений в основному реактивним струмом. У порівнянні зі звичайним синхронним двигуном компенсатор виготовляється з полегшеним валом, він має менші розміри і масу, [99, 146].

Реактивна потужність компенсатора дорівнює: $Q_{ск} = U_s \cdot I_{ск} = U_s \cdot U_s - E_q / x_d$.

Величина і знак реактивної потужності залежать від співвідношення між електрорушійною силою компенсатора E_q і напругою мережі U_s . ЕРС синхронної машини пропорційна струму збудження, який є керуючим параметром. Якщо $E_q = U_s$, то реактивна потужність, що генерується дорівнює нулю $Q_{ск} = 0$. При перезбудженні компенсатора, коли виконується співвідношення $E_q > U_s$, в мережу генерується реактивна потужність, при цьому струм компенсатора $I_{ск}$, випереджає напругу мережі на 90° . Зменшення струму збудження призводить до режиму недозбудження компенсатора, тоді виконується умова $E_q < U_s$ і струм компенсатора $I_{ск}$ відстає на 90° від напруги мережі. У цьому режимі СК споживає реактивну

потужність, отримуючи її безпосередньо з мережі. У паспортних даних номінальна потужність синхронного компенсатора вказується для режиму перезбудження. По конструктивним особливостям, пов'язаним з умовами нагрівання обмоток, в режимі недозбудження $Q_{ск} = 0.5Q_{скном}$.

Позитивними властивостями синхронних компенсаторів як джерел реактивної потужності являються: можливість збільшення потужності, що генерується, якщо напруга у мережі знижується; можливість плавного і автоматичного регулювання реактивної потужності, причому як в режимі генерації, так і в режимі споживання.

Недоліками синхронних компенсаторів являються: наявність обертових частин і ковзних контактів на роторі, що вимагає присутності обслуговуючого персоналу. Питома вартість потужності, виробленої синхронним компенсатором, у багато разів більше вартості реактивної потужності косинусних конденсаторів.

Ще одним напрямом у вирішенні проблеми реактивної потужності являється застосування в мережах тиристорних перетворювачів зі штучною комутацією, [100, 101, 182, 184].

Розробка і впровадження в промисловість тиристорів викликали бурхливий розвиток статичних тиристорних перетворювачів частоти. Це відноситься як до їх схем, так і методів їх побудови. В даний час їх розвиток йде як на основі вже відомих схем, побудованих раніше на іонних вентилях, так і шляхом створення принципово нових схем, розробка яких стала можливою завдяки застосуванню силових тиристорів і транзисторів.

Робота тиристорних перетворювачів заснована на комутації вентилів, суть якої полягає в перерозподілі струму навантаження з однієї гілки на іншу, з одного вентиля на інший. При природній комутації це здійснюється за рахунок природної зміни фазних напруг і струмів в схемі. При штучній комутації для такого переходу використовуються спеціально сформовані в схемі імпульси напруги та струму.

У схемі на рис. 1.7 між фазами включена трифазна група конденсаторів (C_{ab}, C_{bc}, C_{ca}), що створює випереджальний зсув по фазі струму відносно напруги. У звичайній трифазній схемі перетворення перехід струму з однієї фази на іншу відбувається в момент, коли порівнюються напруги цих фаз: $U_a = U_b$. В

компенсаційному перетворювачі завдяки конденсатору комутація відбувається в момент, коли рівні напруги $U_a = U_b + U_{Cab}$, де U_{Cab} – напруга на конденсаторі C_{ab} .

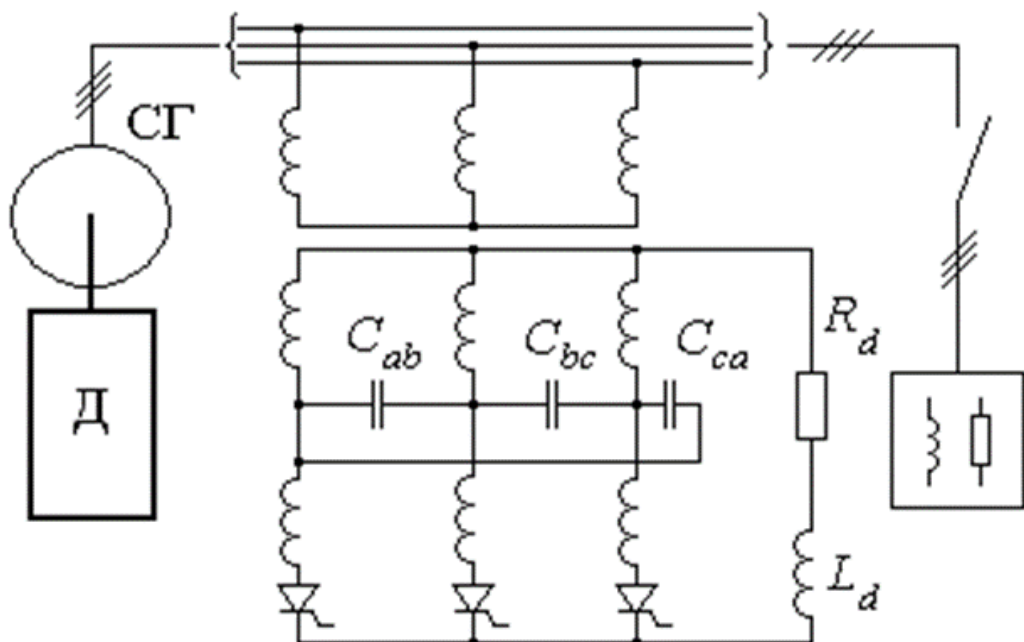


Рис. 1.7. Тиристорне джерело реактивної потужності зі штучною комутацією тиристорів

Регулюючи ємність конденсаторів, можна змінювати значення напруги на конденсаторах U_c і цим домогтися комутації струму при меншому значенні напруги фази U_b і меншому куті комутації. В цьому випадку струм фази буде випереджати напругу і перетворювач буде генерувати реактивну потужність в мережу [101].

Штучну комутацію з повною підставою вважають новим напрямком в перетворювальній техніці. Вентильним перетворювачам з природною комутацією властивий суттєвий недолік: їхня робота завжди пов'язана із споживанням додаткової реактивної потужності від мережі змінного струму. Цей недолік усувається з допомогою штучної комутації. Із застосуванням штучної комутації відкрилися перспективи створення пристроїв, робота яких не тільки пов'язана з додатковою витратою реактивної енергії, але й дає можливість її генерування.

1.3 Установки статичної та динамічної компенсації реактивної потужності

За періодом часу включення чергового ступеня конденсаторів можна виділити два напрямки у виробництві УКРП: статичні та динамічні УКРП.

Статичні УКРП забезпечують компенсацію середнього значення реактивної потужності, при цьому швидкі перехідні процеси в енергетичній системі не враховуються [150].

Динамічні УКРП працюють під час перехідних процесів [178, 189].

Робота автономної (суднової) енергетичної установки характеризується змінними режимами з частими пусками приводів механізмів. Під час пуску електродвигунів система характеризується значним споживанням реактивної потужності, яка в деяких випадках перевищує споживання активної потужності, [6, 10, 15]. За час розгону електродвигуна споживаються пускові струми, що в 5...7 разів перевищують номінальний струм двигуна. Із-за цього в автономній електричній мережі, не розрахованій на такі короткочасні великі струми, виникає значний провал напруги. Такий перепад напруги може створювати проблеми для інших навантажень мережі та може навіть не запуститися сам двигун. Це призводить до зниження запасу стійкості електростанції.

У статичних УКРП використовуються контакторні ключі, це потребує необхідного часу для розряду конденсаторів перед новим включенням. При цьому паралельно з конденсаторами встановлюють розрядні резистори. Для зменшення сталої часу розряду $T_p = R \cdot C$ конденсатора ємністю C через резистор опором R необхідно обирати опір як можна менше. Однак це веде до збільшення втрат на розрядному резисторі: $P_r = U_c^2 / R$. Ця суперечлива вимога щодо мінімізації часу розряду і активних втрат призвела до створення статичних компенсаторів реактивної потужності, у яких час комутації секції конденсаторів значно перевищує період змінного струму. Статичні УКРП ефективні для роботи в сталому режимі навантажень мережі енергосистеми.

Регулюючи струм ємності компенсуючих конденсаторів C можна повністю компенсувати індуктивний струм навантаження в сталому режимі. Можливість

зменшення повного струму за рахунок компенсації реактивного струму залежить від початкового коефіцієнта потужності навантаження $\cos \varphi$.

На рис. 1.8 показано, як може бути зменшений повний споживаний струм I_a і підвищений до одиниці коефіцієнт сумарної потужності навантаження при початковому значенні $\cos \varphi = 0,6$. Для повної компенсації індуктивного струму потрібно підключити конденсатори ємністю C , реактивна потужність яких дорівнює 100% активної потужності навантаження, при цьому повний струм навантаження знижується вдвічі.

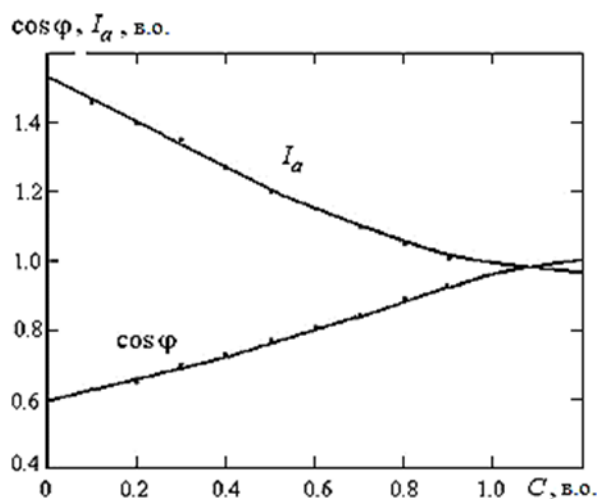


Рис. 1.8. Залежність повного струму і коефіцієнта потужності від ємності компенсуючих конденсаторів

Провідні електротехнічні фірми Європи, такі як Schneider Electric, BELUK, EPCOS, MKS technology в кінці 90-х років освоїли випуск статичних компенсаторів реактивної потужності з контакторною комутацією трифазних секцій косинусних конденсаторів.

Фірма Schneider Electric випускає УКРПІ типу Varset, в яких комутацією конденсаторів типу Varplus управляє контролер типу Varlogic, рис.1. 9, а.

У модулях Varlogic застосовуються спеціально розроблені контактори. У перший момент включення конденсатора C підключається до мережі резистор R і дросель L , що дозволяє уникнути значних кидків зарядних струмів. Потім замикається силовий контакт ключа. Тим не менше, відсутність синхронізації моментів

включення конденсаторів з напругою мережі призводить до перехідних процесів в моменти комутації, рис. 1.10, б.

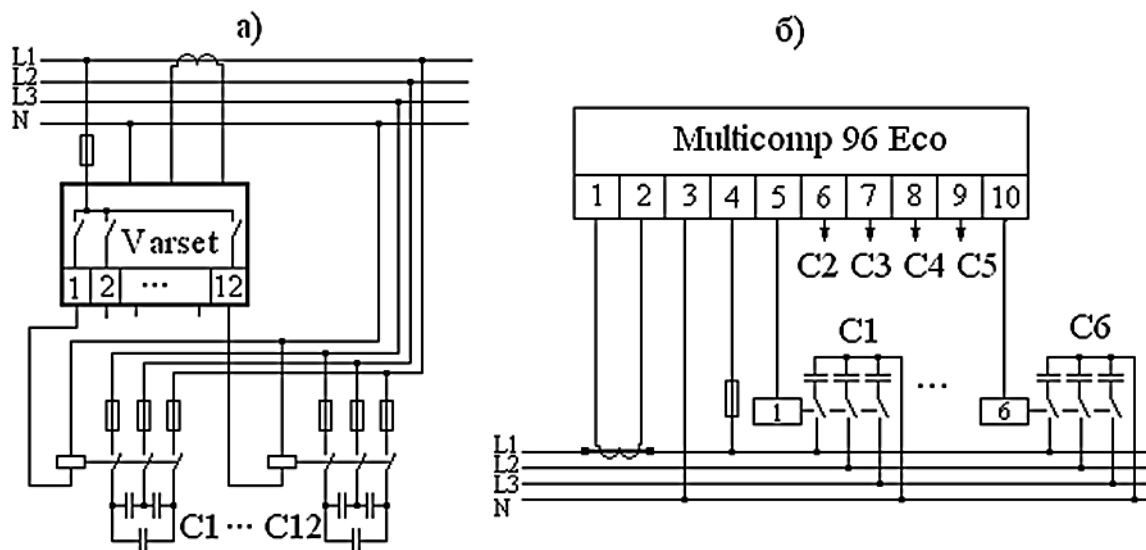


Рис. 1.9. Статичні (контакторні) УКРП

а – фірми Schneider Electric, б – фірми MKS technology

Іншим прикладом регулятора реактивної потужності з контакторною комутацією конденсаторів можна назвати контролер MULTICOMP 96 Eco фірми MKS technology, рис 1.9, б.

Для виконання аналогічних операцій з вимірювання параметрів електроенергії і комутації секцій конденсаторів призначений також контролер BR7000 фірми EPCOS.

Зміна реактивної потужності і заданого $\cos \varphi$ в контакторних установках здійснюється з певною частотою за заданою програмою регулювання. Необхідна величина ємнісного струму досягається за рахунок підключення та відключення відповідних ступенів конденсаторів пристрою компенсації. Розглянемо деякі найбільш використовувані програми [131, 122].

а) Лінійна програма. Усі ступені однакової потужності (наприклад: 1.1.1.1). Послідовність підключення ступенів відповідає принципу «last-in – first-out», тобто остання підключена ступінь відключається першою і навпаки.

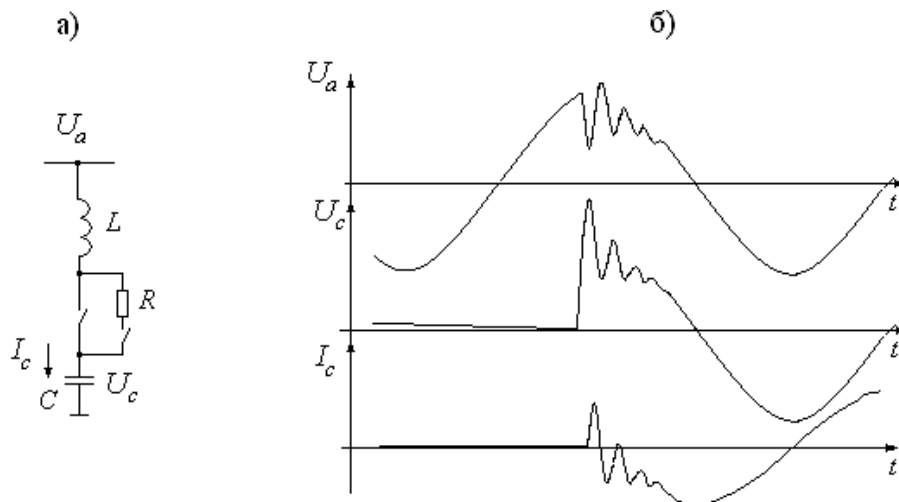


Рис. 1.10. Схема контактора (а) і процеси включення конденсатора (б) у модулях Varlogic

б) Нормальна програма. Ця програма може використовуватися пристроєм компенсації, де відношення потужності ступенів дорівнює 1.2.4.4. Лінійна послідовність починається з третього ступеня. Два перші ступені використовуються для точного регулювання. Комутація завжди починається з першого ступеня, потім з другого. Наступні ступені комутуються один за одним.

с) Кругова програма А. Всі ступені однакової потужності (наприклад: 1.1.1.1). Послідовність підключення ступенів відповідає принципу «first-in – first-out», тобто перший підключений ступінь відключається першим. Потім комутація здійснюється за круговою схемою. Для нормального функціонування кількість зазначених ступенів повинна строго відповідати реальній кількості ступенів.

д) Кругова програма В. Програма може використовуватися в пристроях компенсації реактивної потужності, де відношення потужності ступенів дорівнює 1.2.2.2. Перша ступінь використовується для точного регулювання. Лінійна послідовність запускається з другого ступеня.

е) Оптимальна програма. Ця програма відповідає численній конфігурації ступенів: 1.1.1.1.1; 1.2.2.2.2; 1.2.4.4.4; 1.2.4.8.8; 1.1.2.2.2; 1.1.2.3.3; 1.1.2.4.4; 1.2.3.3.3; 1.2.3.4.4; 1.2.3.6.6 і т. д.

Заданий $\cos \varphi$ досягається мінімальною кількістю ступенів за мінімальний час. Програма визначає оптимальні підключені секції і в той же час зменшує час

пошуку, особливо тоді, коли необхідно виробити більшу реактивну потужність, або коли навантаження мережі набуває ємнісного характеру.

Порівняння між «нормальною» та «оптимальною» програмами наведено на рис. 1.11. Позначимо: Q_n – реактивна потужність навантаження, а Q_c – реактивна потужність компенсуючого пристрою.

Нормальна програма досягає потрібного $\cos \varphi$ за рахунок послідовних підключень або відключень ступенів, змінюючи кожен раз потужність пристрою компенсації на потужність найменшої ступені.

Оптимальна програма досягає потрібного $\cos \varphi$ за рахунок послідовних підключень або відключень ступенів, змінюючи кожен раз потужність пристрою компенсації на потужність, найбільш відповідну потребам. Час повної компенсації за «оптимальної» програми виявляється дещо менше. Якщо контролер враховує вже підключені ступені і обчислює необхідну конфігурацію підключених конденсаторних секцій, то існує можливість встановлення необхідної компенсуючої потужності за один тактовий цикл, рис. 1. 11, в.

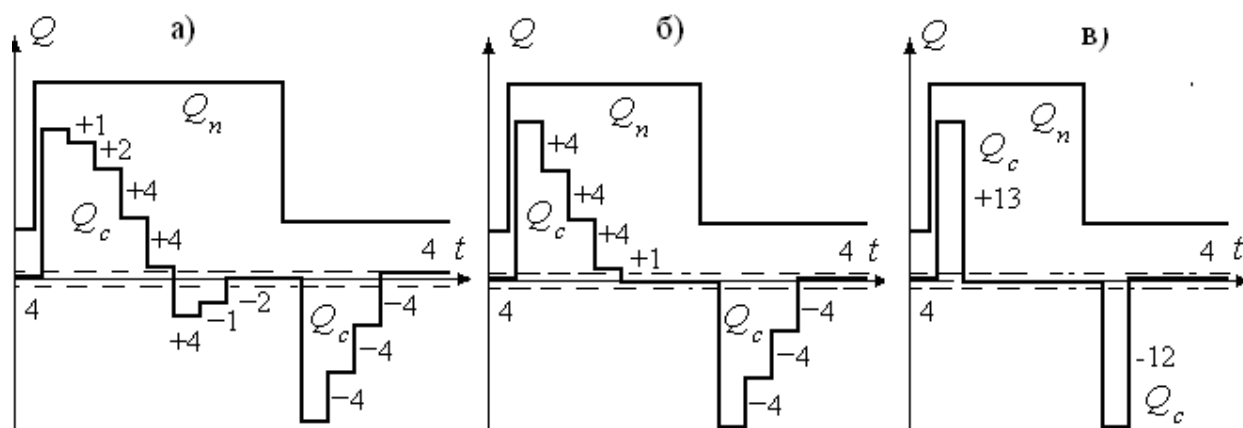


Рис. 1.11. Порівняння алгоритмів роботи контакторних УКРП: а) – нормальна програма; б) – оптимальна програма; в) - програма повної компенсації за один такт

Наприклад, у логічному блоці MULTICOMP 96 Есо фірми MKS technology період комутації може задаватися: від 5 до 1200 секунд. У цьому контролері також здійснюється контроль за струмом підключених конденсаторів, що значно підвищує надійність УКРП.

Затримка перемикання ступенів в середньому на 60 с і більше, обумовлена вимогами стандарту ІЕС 831 до рівня напруги розряду конденсаторів перед повторним включенням (10 %).

Одним з ефективних заходів підвищення стабільності напруги під час перехідних режимів в електроустановках являється динамічна компенсація реактивної потужності, [53].

При динамічному управлінні конденсаторною компенсуючою установкою комутація конденсаторів здійснюється в кожен період змінного струму [211-213].

Для цього реактивна потужність споживачів мережі обчислюється протягом одного періоду змінного струму, а перемикання конденсаторів виконується з частотою мережі.

Використання в якості ключів силових напівпровідникових елементів дозволяє здійснювати комутацію конденсатора в кожній фазі в момент рівності напруги мережі і конденсатора. Фірма Schneider Electric випускає тиристорні УКРП типу Varset FAST з періодом підключення ступені менше 20 мс.

Прикладом використання динамічної компенсації реактивної потужності в реальному часі може служити розробка фірми EQUALIZER [53], яка призначена для запуску потужних асинхронних двигунів, рис. 1.12. Ця система динамічної компенсації дозволяє значно знизити реактивні навантаження при пуску потужного асинхронного двигуна, рис. 1.12, в, ефективно мінімізувати піковий струм і знизити динамічний провал напруги в мережі, рис. 1.12, а, б.

Динамічна компенсація реактивної потужності дозволяє істотно поліпшити динамічні властивості автономної системи (рис.1.13).

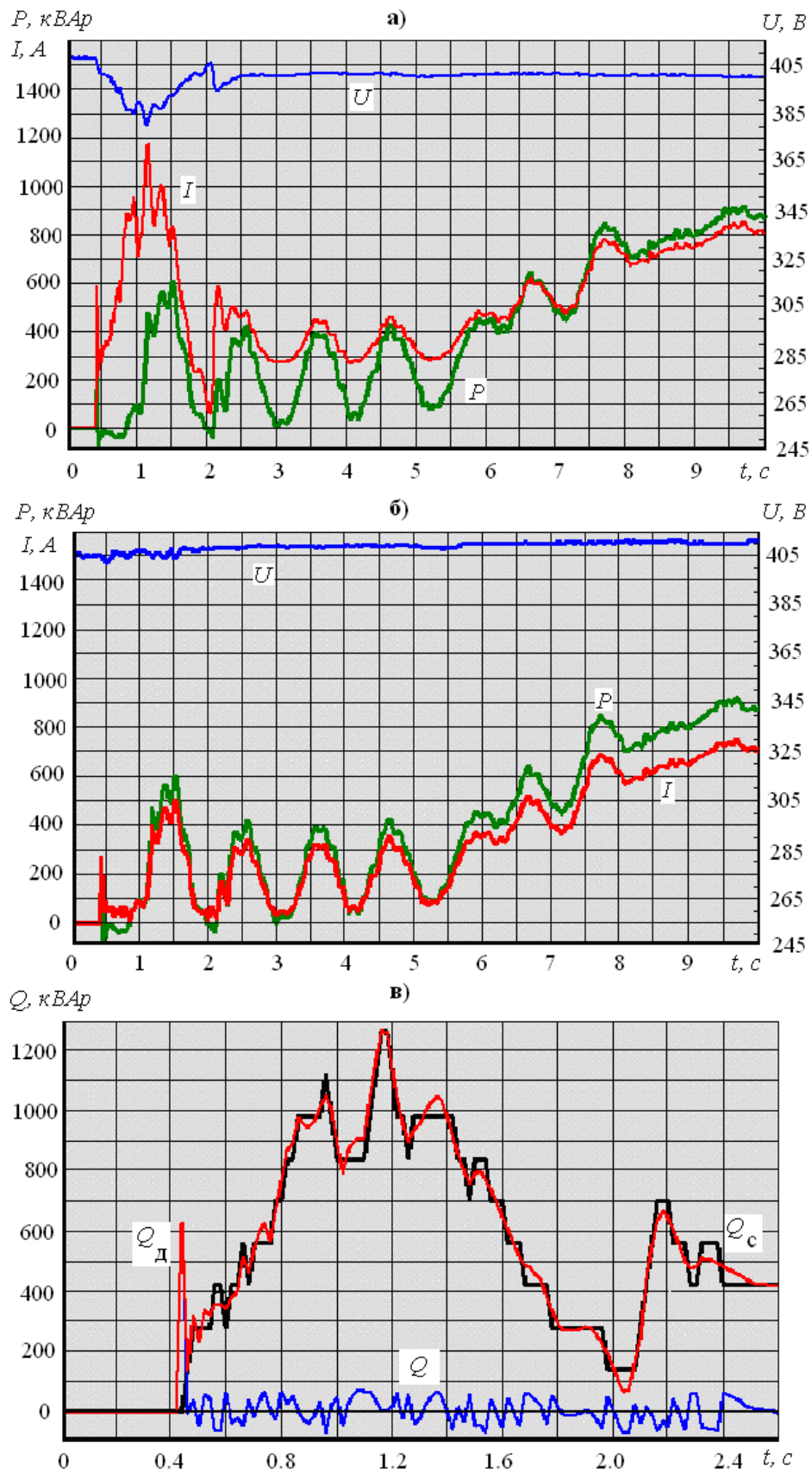


Рис. 1.12. Компенсація реактивної потужності при пуску асинхронної машини: а – пуск без компенсації; б, в – пуск з компенсацією

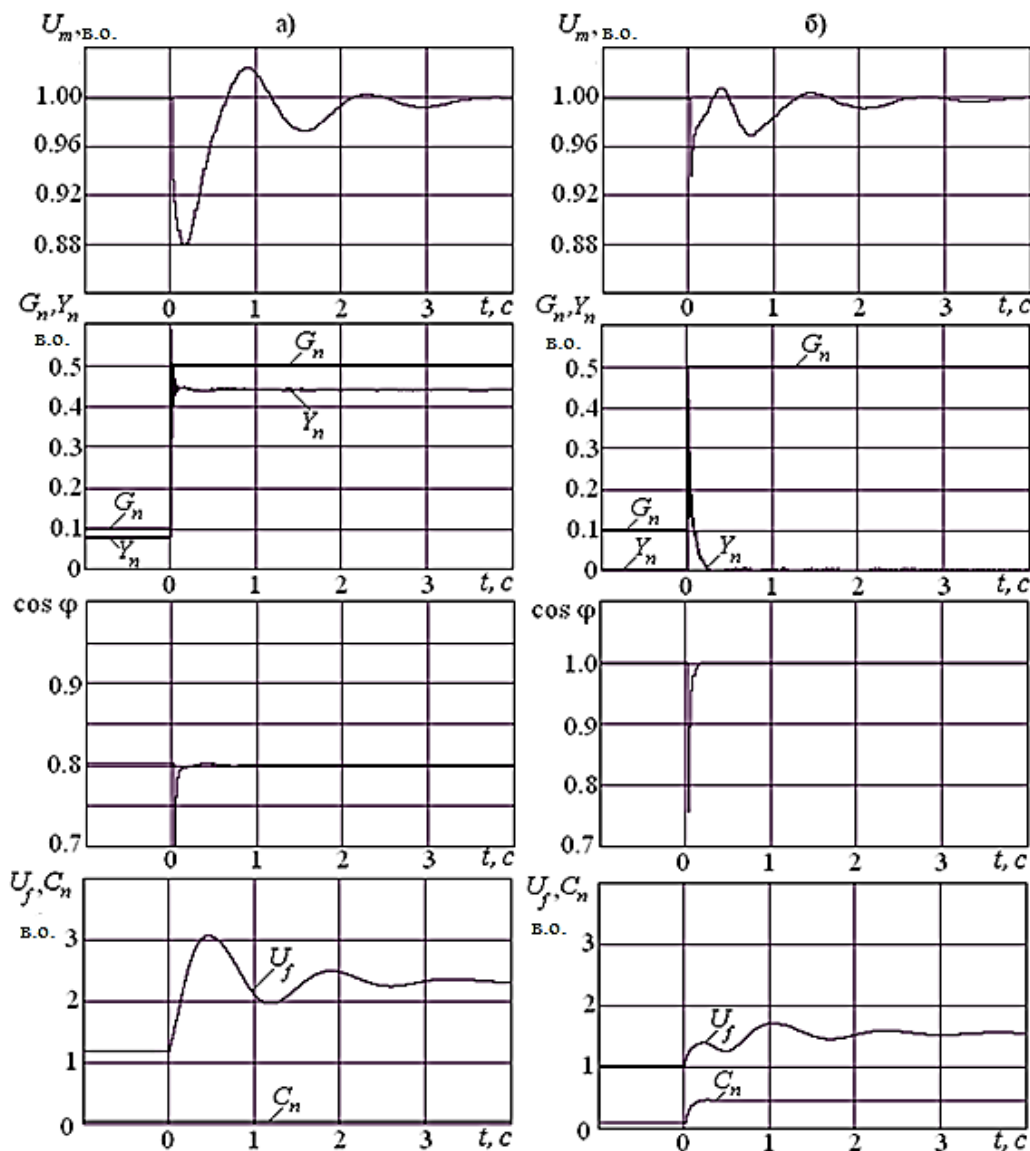


Рис.1.13. Включення 50% активно-індуктивного навантаження синхронного генератора без компенсації (а) і з компенсацією (б) реактивної потужності

На рис.1.13 приведені перехідні процеси в системі стабілізації напруги дизель-генератора з синхронним генератором при ступінчастому включенні половини номінального статичного навантаження з $\cos \varphi = 0.8$. У першому випадку, рис.1.13, а, компенсація реактивної потужності не проводиться, ємність конденсаторів C_n близька до нуля, а керуюча напруга на обмотці збудження U_f змінюється від 1.2 до 2.3 з максимумом 3.1 в. о. Час перехідного процесу $t_p = 4$ с, провал напруги $\Delta U_m = 0.12$ в. о. При динамічній компенсації реактивної потужності (рис.13, б) $C_n = 0.1 \dots 0.5$, $U_f = 1 \dots 1.6$, $\Delta U_m = 0.03$, в. о., $t_p = 3$ с, $\cos \varphi = 1$.

1.4 Керування динамічними характеристиками системи стабілізації напруги синхронного генератора

Висока вартість палива, що витрачається на отримання електроенергії, прогрес виробництва конденсаторів змінного струму роблять ефективним використання на автономних суднових електроустановках компенсуючих конденсаторних пристроїв, рис.1.14, [53, 54].

Це дає змогу понизити величину споживаного струму та повну потужність генераторів, а також втрати в кабельних лініях та витрати на оплату реактивної електроенергії, [14]. Наприклад, на суднах транспортного флоту використовують конденсатори для компенсації індуктивного навантаження суднової електростанції під час стоянки, т. я. необхідно платити за реактивну потужність при живленні судна з берега, [154].

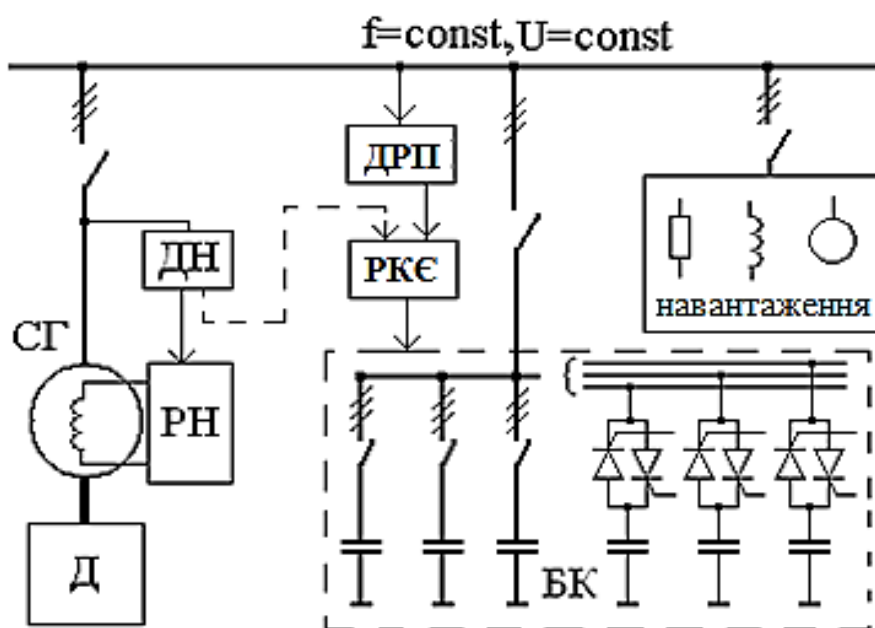


Рис.1.14. Схема енергетичної установки, що містить синхронний генератор і установку компенсації реактивної потужності: СГ - синхронний генератор; Д - приводний двигун; БК - блок конденсаторів; ДН - давач напруги; ДРП - давач реактивної потужності; РН - регулятор напруги; РКЄ - регулятор компенсуючої ємності

До складу електроенергетичної системи автономного об'єкта на додаток до генераторних агрегатів основного і резервного електроживлення встановлюють блоки конденсаторів, які комутуються напівпровідниковими ключами.

Кількість підключених блоків конденсаторів (БК) визначається регулятором компенсуючої ємності (РКЄ) в залежності від величини індуктивності навантаження, яка вимірюється давачем реактивної потужності (ДРП).

Відомо, що напруга синхронного генератора (СГ) залежить як від струму в обмотці збудження, так і від ємності навантаження, [55, 56], проте експлуатація конденсаторних пристроїв у складі автономних електростанцій безпосередньо не пов'язана з керуванням синхронним генератором. Традиційна система управління генератором не використовує ємність конденсаторів для регулювання напруги та містить тільки давач (ДН) і регулятор напруги (РН), керуючий струм в обмотці збудження СГ, див. рис. 1.14.

Наявність в автономній електроенергетичній системі з синхронним генератором компенсуючих конденсаторів робить технічно можливим використання їх ємності не тільки для компенсації індуктивного навантаження, але й для керування напругою електростанції. Для цього інформацію від давача напруги (ДН) генератора можна використовувати для управління регулятором компенсуючої ємності (РКЄ), див. пунктир на рис. 1.14.

Функціональна схема такої системи керування показана на рис.1. 15 [121].

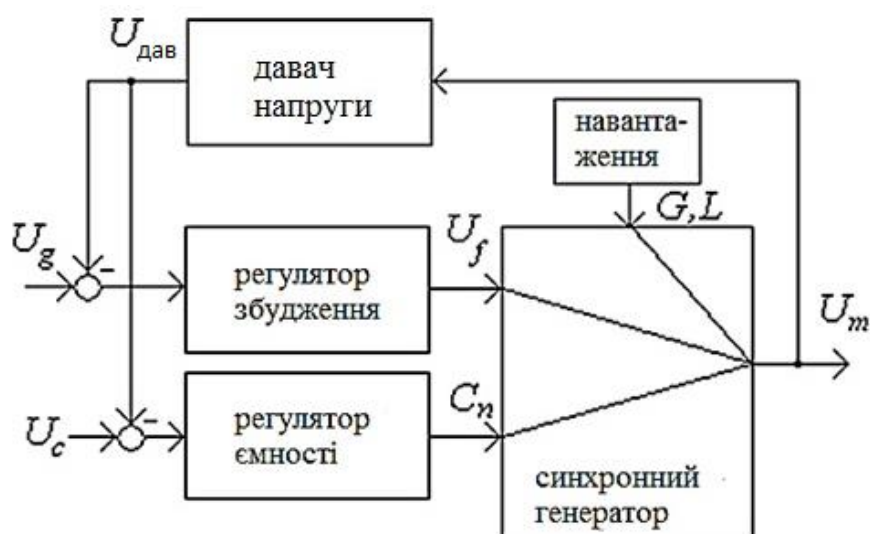


Рис. 1.15. Схема узгодженого керування напругою синхронного генератора

Позначення на схемі: U_m – модуль вектора напруги генератора; U_f – напруга на обмотці збудження; C_n – ємність конденсаторів; G, L – провідність та індуктивність навантаження; $U_{\text{дав}}$ – сигнал давача напруги в мережі; U_g – завдання на регулятор збудження; U_c – завдання на регулятор ємності.

Керуючими впливами на напругу синхронного генератора U_m у запропонованій системі стабілізації є два сигнали: U_f – напруга на обмотці збудження і C_n – ємність компенсуючих конденсаторів, див. рис. 1.15.

В якості регулятора збудження розглянемо використання традиційного пропорційно-інтегрального регулятора:

$$U_f(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I p} \right) \cdot (U_g - U_{\text{дав}}), \quad (1.1)$$

де K_p, T_I – коефіцієнт пропорційності та стала інтегрування регулятора напруги.

Як відомо [59], безударна комутація блоків конденсаторів може бути реалізована один раз за період змінного струму, тому регулятор компенсуючої ємності повинен розглядатися як дискретно-імпульсний з періодом комутації, рівним періоду струму.

Ємність конденсаторів підключених для регулювання напруги будемо змінювати один раз за період змінного струму на величину, пропорційну відхиленню напруги $U_{\text{дат}}$ від заданого U_c :

$$C_n = C_{n-1} + K_c (U_c - U_{\text{дат}}), \quad (1.2)$$

де C_n, C_{n-1} – ємність конденсаторів у поточному і попередньому періодах змінного струму; K_c – коефіцієнт передачі регулятора.

Підсумовування ємності в кожен період струму у виразі (1.2) реалізує дискретний інтегральний закон керування. Одночасне використання двох керуючих впливів U_f і C_n передбачає врахування спільної роботи двох інтегруючих (астатичних) каналів регулятора: за збудженням та за ємністю. Один з каналів регулятора напруги вибирається в якості ведучого, наприклад канал збудження. Для цього його задаючий вплив встановлюється дещо більшим, ніж у каналі ємності: $U_c = (0,97 \dots 0,99)U_g$. У цьому випадку ємнісний канал регулятора напруги буде

працювати тільки в перехідному процесі, тобто при встановленні нового значення напруги додаткова ємність УКРП стає рівною нулю.

При використанні частини конденсаторів УКРП для регулювання напруги в перехідному процесі решта конденсаторів можуть використовуватися за прямим призначенням пристрою, тобто для компенсації реактивної потужності навантаження.

Дослідження запропонованого способу регулювання напруги в електроенергетичній системі, що містить синхронний генератор та комутовані блоки конденсаторів, наведеною на рис.1.14, виконано на базі розробленої комп'ютерної моделі установки потужністю 500 кВт, [53, 136]. При комутації активно-індуктивного навантаження генератора його напруга регулюється у відповідності з законами управління (1.1) і (1.2).

На рис. 1.16 приведені перехідні процеси включення навантаження з коефіцієнтом потужності $\cos \varphi = 0.8$ у традиційній схемі регулювання струму збудження (рис. 16, а) і в системі, що використовує ємність УКРП (рис. 16, б).

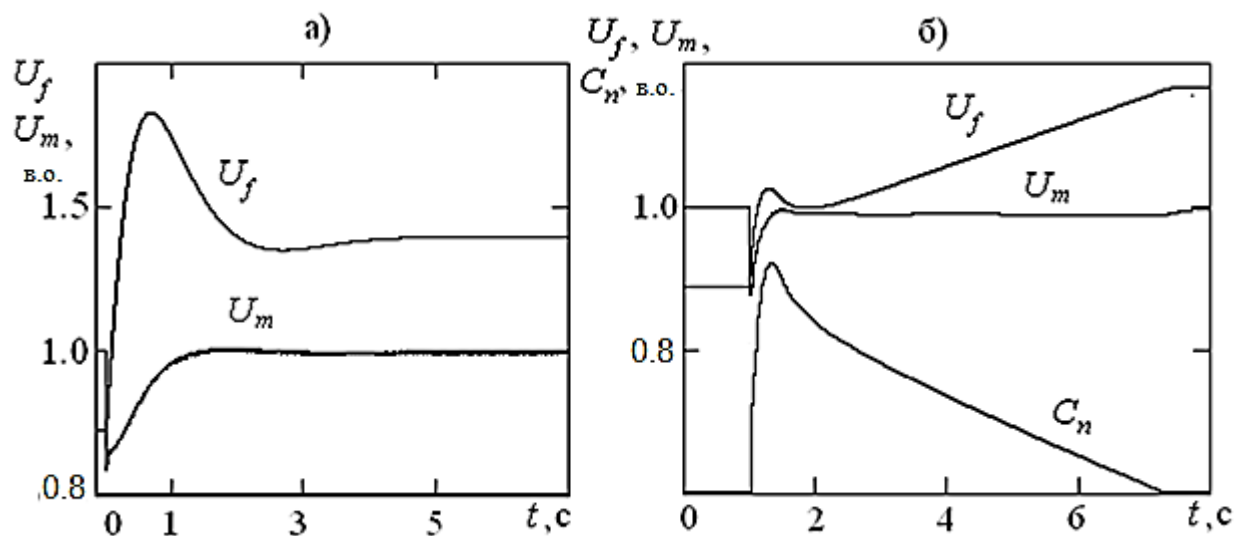


Рис. 1.16. Процеси включення 50% навантаження з $\cos \varphi = 0.8$:

а – регулювання напруги тільки в обмотці збудження; б - регулювання напруги по двох каналах: струму збудження і статорної ємності

Основним недоліком системи регулювання напруги шляхом зміни струму в обмотці збудження є інерційність цього каналу управління. Стала часу ланцюга

роторного збудження синхронного генератора на порядок більша, ніж стала часу його статорної обмотки. Комутація струму навантаження генератора відбувається у колі статора за частки періоду, що призводить до практично миттєвої зміни напруги. Реакція регулятора по інерційному каналу збудження не дозволяє швидко ліквідувати динамічне відхилення навіть при використанні форсування збудження, див. рис. 1.16, а.

Використання конденсаторів для регулювання напруги СГ дозволяє подолати зазначений недолік, т. я. ємнісний струм протікає у тому ж колі, що і навантаження, тому реакція на нього має ту ж сталу часу. В результаті тривалість перехідного процесу значно знижується.

Більш детальні результати дослідження законів керування синхронною електроустановкою з компенсатором реактивної потужності наведені в розділі 4. Далі, в якості ілюстрації можливості управління динамічними характеристиками системи стабілізації напруги синхронного генератора, приводяться деякі з них.

При використанні закону управління ємністю (1.2) тривалість перехідного процесу залежить від коефіцієнта передачі K_c . Отримані на моделі перехідні процеси накиду 50 % активно-індуктивного навантаження з $\cos \varphi = 0.8$ при різних значеннях K_c наведено на рис. 1.17.

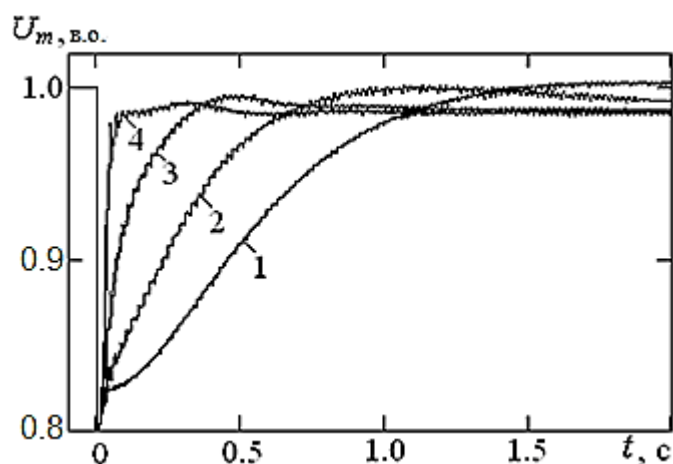


Рис. 1.17. Динамічні процеси відновлення напруги СГ при включенні навантаження: 1- $K_c = 0$; 2 - $K_c = 0,1$; 3 - $K_c = 0,5$; 4 - $K_c = 2$

Як видно з рис. 1.17, при значенні коефіцієнта $K_c = 2$ процес відновлення напруги зменшується майже в десять разів.

Ефект збільшення швидкодії системи регулювання напруги тим більше, чим менше початкове навантаження генератора.

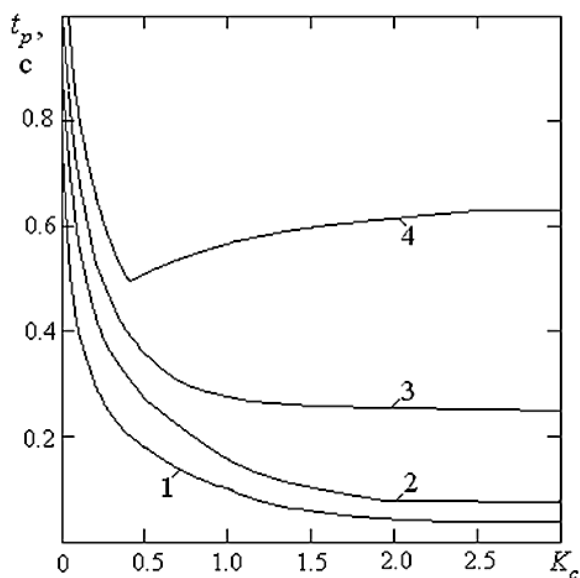


Рис. 1.18. Залежність часу переходного процесу відновлення напруги СГ від коефіцієнта K_c при включенні 50% навантаження:

1 - на холостому ходу; 2 - при 25% навантаженні; 3 - при 50% завантаженні

Залежність часу переходного процесу t_p включення активно-індуктивного навантаження з коефіцієнтом потужності $\cos \varphi = 0.8$ від коефіцієнта передачі K_c при різному початковому завантаженні генератора наведена на рис. 1.18.

1.5 Підвищення техніко-економічних показників автономних генераторних установок шляхом застосування асинхронних генераторів

Застосування динамічних конденсаторних компенсаторів реактивної потужності у складі електроенергетичних систем суден сприяє впровадженні генераторних установок з асинхронними генераторами. Тому доцільним був би розгляд їх техніко-економічних та конструктивних показників у порівнянні з синхронними генераторними установками, якими в переважній більшості комплектуються судові електростанції.

Традиційно і в більшості випадків в якості генератора застосовують синхронні генератори (СГ), виробництво яких добре налагоджено і їх конструкція оптимізована, [10, 17, 40, 64, 105, 117, 174]. Контактне виконання ротора, як основний недолік синхронних генераторів, подолана освоєнням безконтактної технології його збудження шляхом встановлення на роторі оберненої синхронної машини і обертових діодів, рис. 1.19, а. Однак таке ускладнення конструкції ротора призвело до ускладнення і подорожчання СГ. Крім цього недоліку синхронні машини мають ще ряд особливостей і обмежень їх використання в автономних установках, про яких буде сказано нижче.

Альтернативою використання СГ в автономних електростанціях являється більш широке застосування асинхронних генераторів (АГ) з короткозамкненим ротором, рис. 1.19, б, [86, 85], які практично витіснили СГ з вітроенергетики.

Асинхронна машина має просту конструкцію короткозамкненого ротора з алюмінієвою литою обмоткою типу «біляча клітка» з закритими пазами. Така конструкція обмотки дозволяє істотно зменшити величину повітряного зазору і знизити втрати по шляху основного потоку намагнічування, що дозволяє зменшити геометричні розміри ротора та машини в цілому. Відсутність ковзних контактів і обертових напівпровідникових елементів, заміна багатожильної мідної обмотки з ізоляцією на литу алюмінієву дозволяє підвищити робочу температуру ротора і збільшити його максимальну частоту обертання, що розширює експлуатаційний діапазон застосування асинхронної машини в порівнянні з синхронною.

Таким чином, при однакових механічних характеристиках і ступенях захищеності асинхронна машина буде мати кращі масо габаритні та цінові показники. За даними конструкторів електричних машин масо габаритні показники асинхронних машин в 1.4 рази менші, ніж у синхронних з контактними кільцями на роторі, [155, 156].

Невеликий активний опір ротора асинхронної машини і менший повітряний зазор визначають більш високий коефіцієнт корисної дії η АГ порівняно з СГ, що забезпечує більшу економічність АГ, [52].

На рис.1.20 наведено залежності ККД (η) ряду промислових синхронних і асинхронних генераторів різних виробників від їх номінальної активної потужності P_g , а також асинхронних машин серії AIR, [7, 52, 218-221].

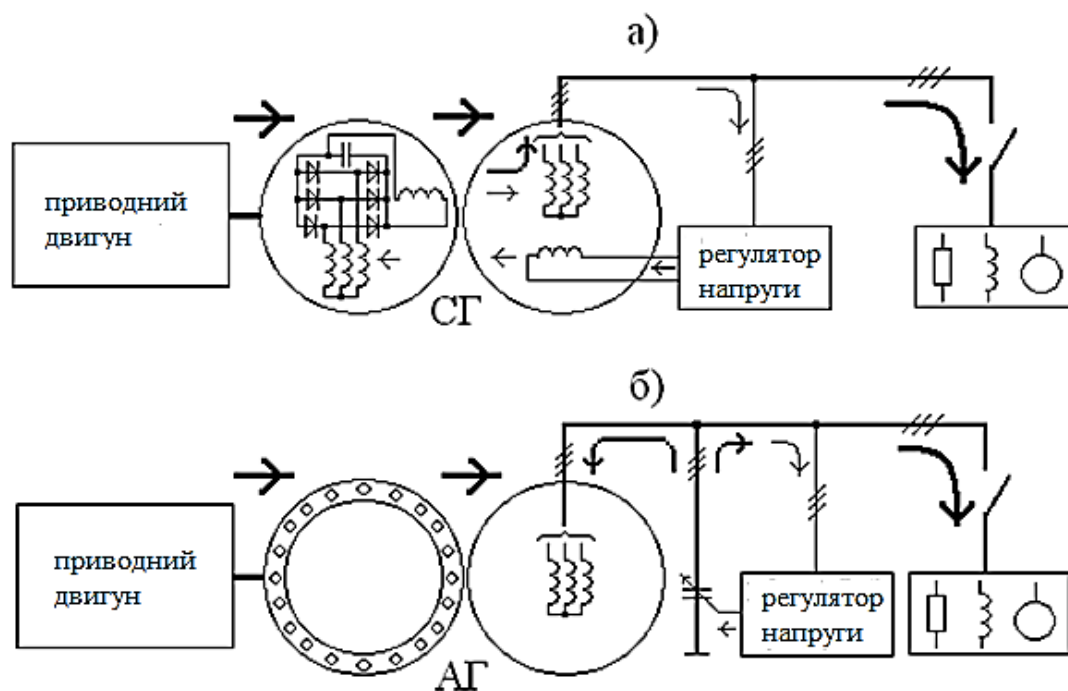


Рис. 1.19. Автономні електроустановки з безконтактним синхронним і асинхронним (б) генератором

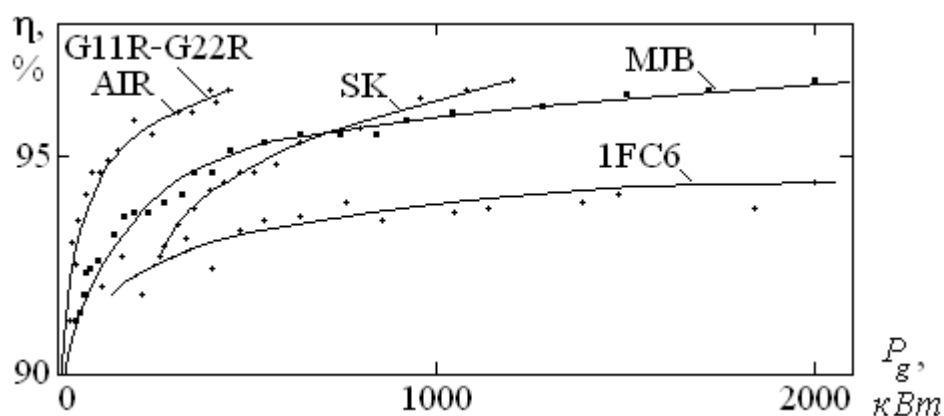


Рис. 1.20. Коефіцієнт корисної дії генераторів

ККД АГ приблизно на 2 % вище, ніж у СГ тієї ж потужності, що робить його використання більш економічним. Наприклад, річна економія від заміни суднового синхронного генератора на асинхронний потужністю 1 МВт складе близько 12 тис. доларів.

Основною причиною, по якій АГ не знайшли застосування в автономних енергоустановках є технічна необхідність для збудження та керування напругою АГ використання додаткового джерела реактивної потужності у вигляді силових конденсаторів, рис. 1.19, б.

В даний час відбулися зміни в технології виробництва конденсаторів змінного струму, суттєво знизилась їх вартість та масо габаритні показники. Так, поліпропіленові конденсатори в своїй основі мають тонку полімерну плівку з алюмінієвим напиленням електродів, тобто дешеві і легкі компоненти. Питома вага таких конденсаторів приблизно дорівнює 0.1 кг/кВА, що в 50...100 разів менше ваги електричних машин, [16, 72, 78]. Вартість сучасних конденсаторів також на порядок менше ціни генераторів.

Зниження ціни косинусних конденсаторів і тиристорів в даний час стимулювало виробництво керованих установок компенсації реактивної потужності з напівпровідниковою комутацією конденсаторів та їх широке застосування на підприємствах та на транспорті. Технологічно такі установки відрізняються від систем збудження АГ тільки контролерами управління.

АГ та СГ істотно відрізняються конструкцією ротора, а також способом збудження і управління генерацією напруги.

В СГ збудження здійснюється примусово з боку роторних кіл. Електромагнітне поле генератора створюється і змінюється обмоткою збудження за рахунок струму в ній. Регулятор напруги СГ змінює струм в обмотці збудження в залежності від відхилення напруги від заданої на статорних обмотках. Як правило, аналоговий регулятор напруги синхронного генератора реалізує пропорційний або пропорційно-інтегральний закон керування. Для зниження потужності керування обмотка збудження виконується багатовитковою для створення необхідного поля при невеликому струмі. Однак за рахунок цього індуктивність та стала часу обмотки збудження істотно збільшуються, тому принципової можливості підвищення швидкодії СГ немає.

Для підвищення швидкодії системи регулювання напруги регулятор СГ має форсувальні можливості, тобто максимальне значення напруги збудження в перехідному процесі допускає величину 5...8 кратну номінальним значенням.

В АГ збудження забезпечується за рахунок коливального процесу обміну енергією між індуктивністю машини і ємністю збудження, підключеної до статорного кола АГ. Напруга АГ буде залежати від кривої намагнічування машини, частоти обертання, навантаження та величини ємнісного струму збудження, [5, 22, 52, 111, 113].

Регулятор збудження АГ змінює ємнісний струм конденсаторів в залежності від відхилення напруги від заданої (номінальної). Струм навантаження і ємнісний струм збудження протікають по одному статорному колу генератора, що дозволяє практично миттєво компенсувати реакцію генератора на навантаження ємнісним струмом. Проблема залишається лише в швидкому вимірі та виборі оптимального закону керування. Регулювання збудження АГ в колі статора дозволяє створити швидкодіючі та інваріантні системи стабілізації напруги [23, 34, 35, 52].

Якщо вимірювання напруги і комутацію конденсаторів проводити протягом одного періоду генерованого струму, то перехідний процес відновлення напруги АГ після комутації навантаження закінчується за 2...3 періоди, тобто за 0.04...0.06 с. В той же час мінімальний час перехідного процесу в СГ складає 0.5 с, рис.1.21, [49, 50].

Більш детальні результати дослідження динамічних процесів СЕЕС з СГ і АГ наведені в розділі 7.

Різниця систем збудження СГ і АГ відображається на перевантажувальній здатності генераторів та їх реакції на короткі замикання. При дворазовому (і більше) перевантаженні та обмеженій ємності збудження АГ різко знижує напругу до нуля, що не відбувається в СГ при перевантаженні, тому він потребує захисту від таких аварійних режимів. У разі короткого замикання ємність збудження шунтується, а АГ швидко розбуджується із-за малих сталих часу контурів розсіювання генератора.

На рис. 1.21, а показані процеси зміни фазного струму і напруги при збільшенні провідності навантаження в п'ять разів.

Таким чином, режим короткого замикання для АГ є безпечним. При цьому селективність захисту від к. з. у розгалуженій електричній мережі АГ повинна забезпечуватися за 2...3 періоди струму, [4].

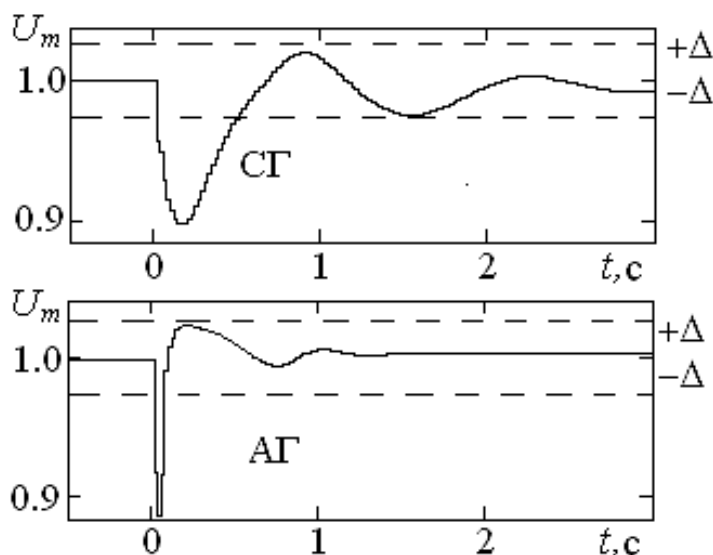


Рис. 1.21. Перехідний процес відновлення напруги СГ та АГ після включення 50 % номінального навантаження з коефіцієнтом потужності 0,8; $\Delta = 0,02U_m$

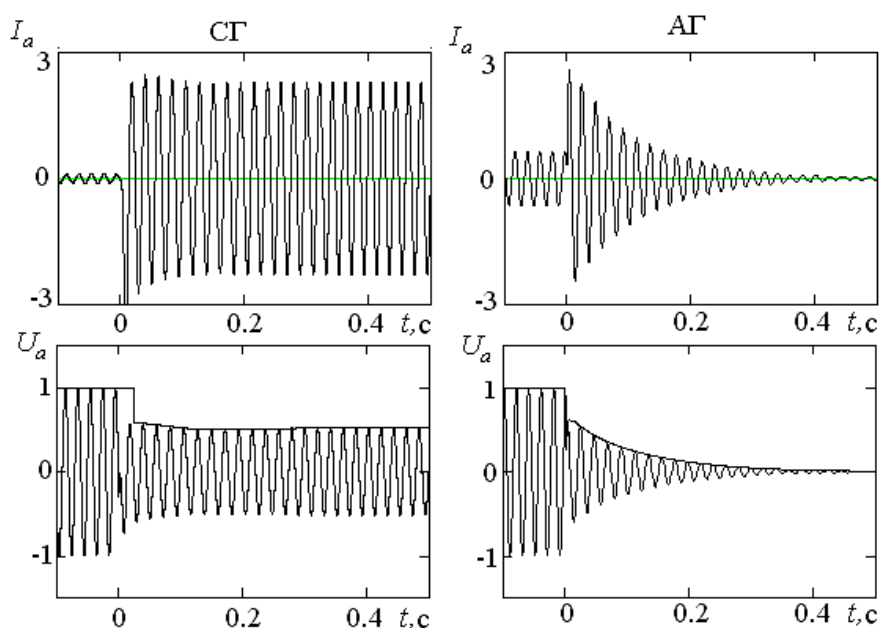


Рис. 1.21, а. Процеси короткого замикання в СГ та АГ

Слід зауважити, що обмеження перевантажувальної здатності АГ пропорційно залежить від величини ємності збудження. Якщо генератор розраховується на

номінальний $\cos \varphi = 0.8$, то від нього можливий прямий пуск асинхронного двигуна потужністю до 30 % від потужності генератора. Якщо ж ємність збудження АГ не обмежена, то можливий пуск двигуна зі співвимірною з генератором потужністю, [54, 139].

За рахунок фільтрувальних властивостей конденсаторів асинхронний генератор має синусоїдальну форму кривої генеруємої напруги з низьким вмістом гармонік [52], симетричну трифазну напругу при нерівномірному розподілі навантаження [156].

Вектор електромагнітного поля СГ жорстко прив'язаний до геометричної осі обмотки збудження. Збільшення кута навантаження (між полем і віссю обмотки) більш ніж на 90 градусів призводить до аварійного режиму випадання з синхронізму. Особливо небезпечний режим «хитань ротора» СГ при включення на паралельну роботу і при перерозподілі навантаження при паралельній роботі. У цьому випадку випадання із синхронізму призводить до знеструмлення, [10, 46].

На відміну від СГ, технологічна наявність ковзання ротора АГ щодо поля істотно підвищує стійкість системи паралельно працюючих генераторів. При цьому немає обмежень кількості генераторів, що працюють в одній мережі, що підтверджено досвідом використання АГ у вітроенергетиці.

Режим включення АГ в паралель абсолютно не небезпечний для генераторів, а при розбіжності фаз до 90 градусів провал напруги не перевищує 30 %. У той же час при різниці фаз СГ, що включаються, більше 60 градусів провал напруги перевищує 40 %.

На рис. 1.22 наведені процеси синхронізації моментів, частот обертання і встановлення напруги генераторів при включенні із різницею фаз в 90 градусів. Моменти синхронізації M_1, M_2 досягають 5 номінальних значень, а частоти ω_1, ω_2 відхиляються на 5...7 %. Загасання коливань моментів і частот при включенні в паралель СГ триває 0.7 с, а при аналогічному включенні АГ – 0.2 с. Динамічні відхилення модуля вектору напруги U_m СГ становлять +20...-30 %, процес встановлення напруги триває 0.35 с. При включенні АГ напруга відхиляється на +12...-15 % протягом 0.2 с.

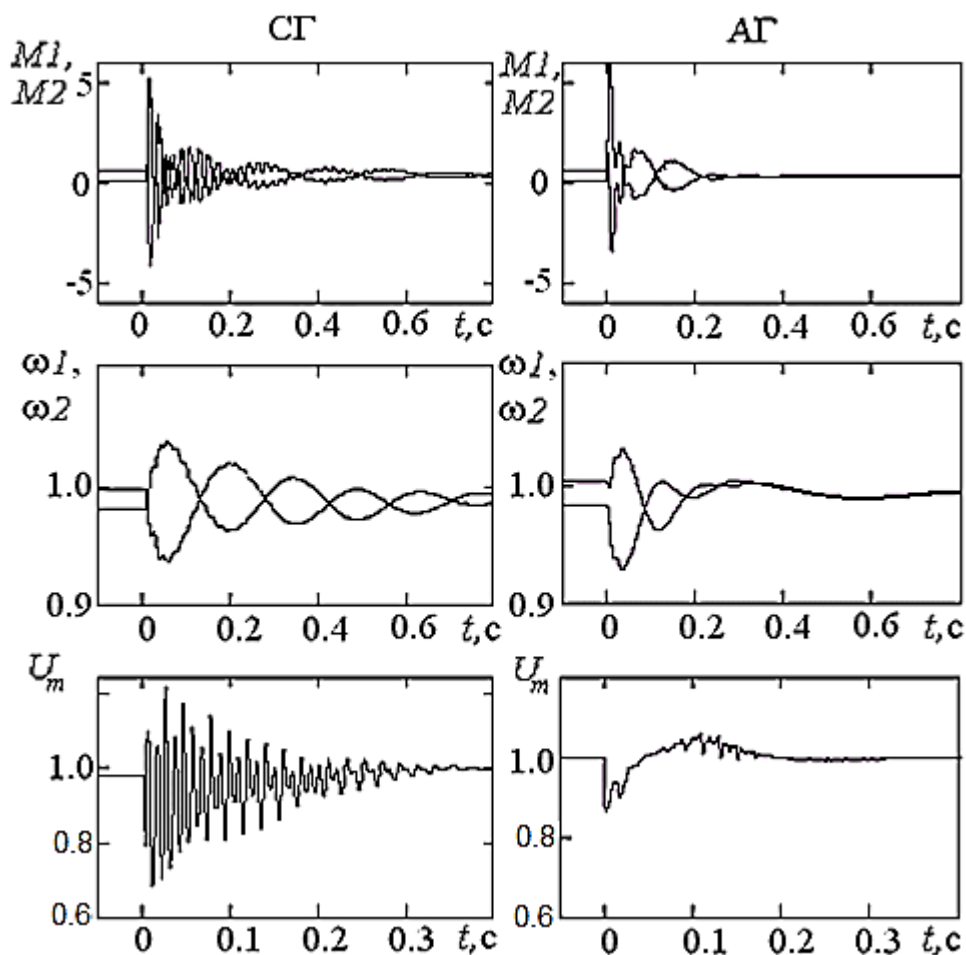


Рис. 1.22. Процеси включення генераторів на паралельну роботу з різницею фаз 90 градусів

Якщо до АГ включати в паралель незбуджений інший АГ, який обертається з синхронною частотою, то синхронізація станеться з дворазовим моментом, з відхиленням частот на 3 % протягом 0.2 с, провал напруги складе 17% протягом 0.15 с.

Підсумовуючи, визначаємо основні переваги АГ над СГ, [35, 52, 142, 226].

Асинхронний генератор має менші габарити і вагу, простішу конструкцію короткозамкненого ротора генератора, відсутні багато виткові роторні обмотки, ковзні контакти і напівпровідникові елементи, що обертаються, відсутня струмова ізоляція на роторі, яка підвищує граничну температуру нагріву і забезпечує високі граничні швидкості обертання ротора.

Більш високий ККД АГ внаслідок малого значення активного опору ротора забезпечує його економічність.

Асинхронний генератор має синусоїдну форму кривої генеруємої напруги та симетричність трифазної напруги при нерівномірному навантаженні.

Швидке затухання струмів розсіювання та втрата збудження забезпечують безпеку режимів коротких замикань для генератора.

Регулювання ємнісного збудження АГ в колі статора дозволяє створити швидкодіючі та інваріантні системи стабілізації напруги.

Простота та безпека включення на паралельну роботу, відсутність коливань ротора при значних змінах навантаження забезпечують стійкість паралельної роботи в багатогенераторних електростанціях.

Переваги АГ підтверджують доцільність широкого впровадження асинхронних генераторних установок в суднових електростанціях з метою підвищення їх надійності і зниження вартості електроенергії.

1.6 Технічна реалізація динамічних конденсаторних систем компенсації реактивної потужності

Вибір схеми тиристорного ключа для комутації конденсаторів визначає технічні характеристики системи компенсації. Швидкодіюча комутація трифазних конденсаторних блоків протягом одного – двох періодів змінного струму T_0 можлива при використанні в якості ключа тиристорного або транзисторного ключового елемента, [83]. Цей ключ у відкритому стані повинен мати низький опір і проводити струм в обох напрямках, такими властивостями володіє симистор. Напівпровідникова структура симистора складніша, ніж у звичайного тиристора. Тому вартість і надійність симистора поступається показникам звичайного тиристора.

В якості силового ключа змінного струму частіше використовують два зустрічно включених тиристора або тиристор зі зворотним діодом. В силових схемах комутації конденсаторів в ланцюгах змінного струму застосування тиристорів виявляється кращим, ніж силових транзисторів. Це пояснюється тим, що немає необхідності управляти запиранням тиристорного ключа, що працює на змінному струмі, достатньо зняти відкриваючий сигнал з керуючого електрода.

Приклади напівпровідникових ключів змінного струму наведено на рис. 1.23.

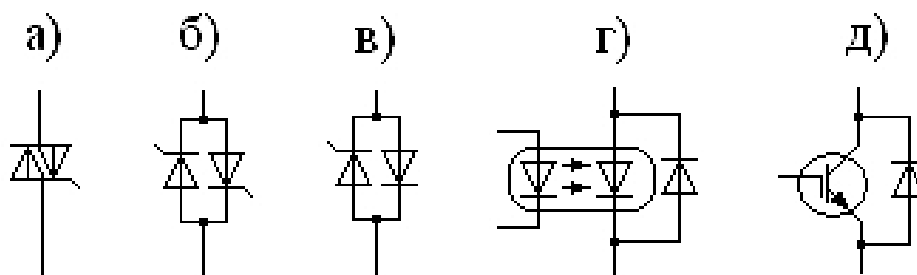


Рис.1.23. Напівпровідникові ключі змінного струму

а) – симистор; б) – два зустрічно включених тиристора; в) – тиристор зі зворотним діодом; г) – оптотиристор із зворотним діодом; д) – польовий транзистор зі зворотним діодом

Вибір схеми ключа змінного струму залежить від вимог до його параметрів та вартості. Використання симисторів або зустрічно включених тиристорів дозволяє зменшити час відключення блоку конденсаторів при трифазному використанні. Застосування зворотних некерованих діодів зменшує вартість ключа.

Комутація трифазних блоків конденсаторів може здійснюватися різним способом підключення ключових елементів, рис. 1.24.

Ключі можуть бути встановлені між мережею і конденсаторами, рис.1.24, а – г, або після конденсаторів, безпосередньо з'єднаних з мережею, рис.1.24, д – к. Фазні секції конденсаторів можуть з'єднуватися «зіркою», рис.1.24, а, б, д, ж, з, к, або «трикутником», рис.1.24, в, г, в. Схеми можуть мати з'єднання з нейтральним проводом, рис.1.24, а, д. Ключі також можуть бути з'єднані «трикутником», рис.1.24, з – к. В схемі рис.1.24, к, ключі можуть складатися з тиристорів, з'єднаних трикутником.

Процеси заряду і розряду конденсаторів в трифазних блоках залежать від обраної схеми з'єднань ключів, рис.1.24, а також від типу ключа, рис. 1.23.

При з'єднанні схеми з нейтральним проводом, рис.1.24, а, д, процеси заряду і розряду конденсаторів можуть розглядатися незалежно, як при однофазному включенні. В інших схемах зарядні процеси залежать не тільки від схеми, але й від часу

комутації в кожній фазі. Тому алгоритм по-фазної комутації конденсаторних блоків вимагає розробки схеми для кожного включення.

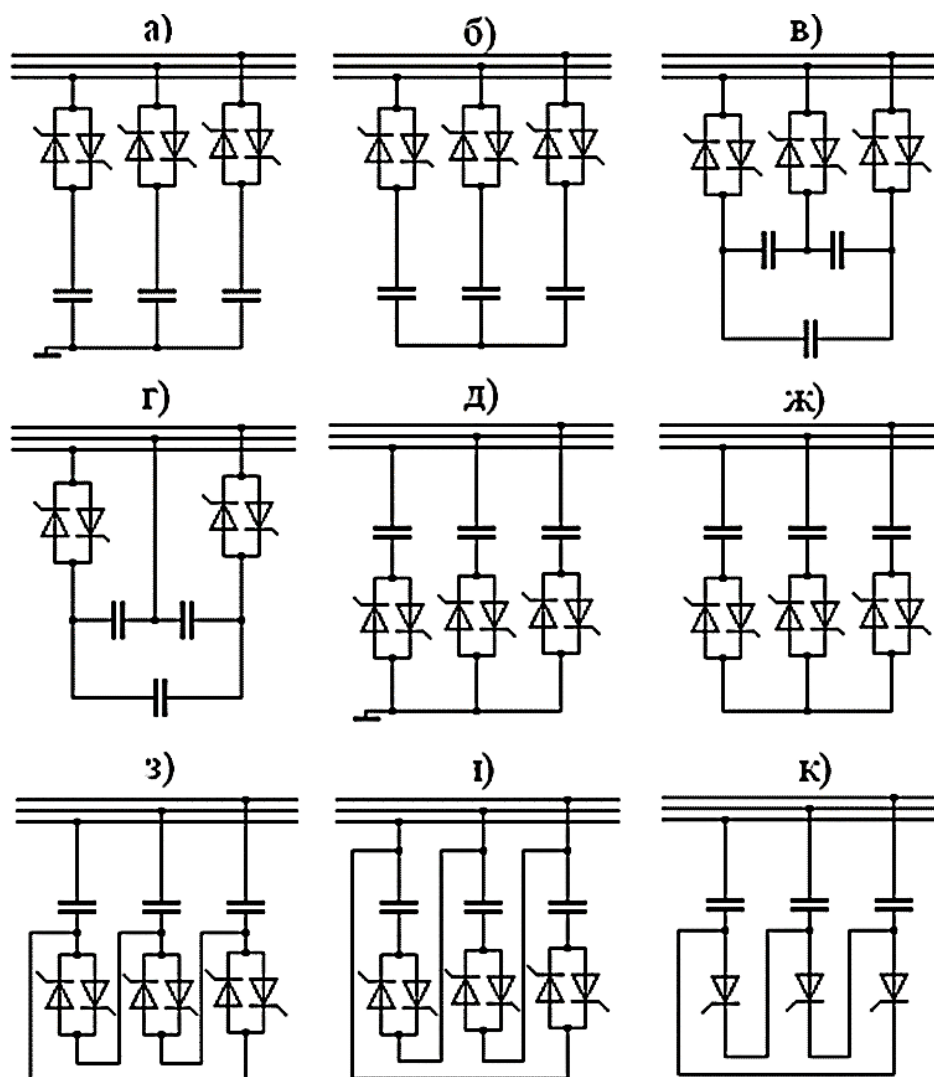


Рис.1.24. Способи з'єднань комутованих трифазних блоків конденсаторів тиристорними ключами змінного струму

Важливим питанням при реалізації тиристорного ключа є синхронізація включення конденсаторів і захист ключових елементів від неприпустимих розрядно-зарядних струмів, що виникають в колах з конденсаторами.

Включення конденсаторів в мережу з напругою призводить до швидкого заряду конденсатора до напруги мережі. Якщо різниця напруги ΔU на конденсаторі та мережі значна, а опір комутуючого ключа R_0 малий, то зарядний струм I_{RCmax} може перевищити допустимі значення для цього типу ключа. У перший момент часу зарядний струм RC – ланцюга дорівнює:

$$I_{RCmax} = \Delta U / R_0.$$

Швидкість же наростання струму заряду dI_{RC}/dt в ідеальному ланцюзі взагалі не обмежена і визначається швидкістю відмикання напівпровідникового переходу тиристора.

Швидкість наростання напруги в перший момент часу на заряджаючому RC – ланцюзі визначається його сталою часу $T = RC$:

$$\frac{dU_{RC}}{dt} = \frac{\Delta U}{RC}.$$

Напівпровідникові ключові елементи мають обмеження на максимальне значення імпульсного струму I_{max} , швидкість наростання струму dI/dt і напруги dU/dt .

У колах змінного струму ці обмеження можуть бути задоволені шляхом включення послідовно з конденсаторами дроселів, а також застосуванням синхронізації включення конденсаторів в мережу у моменти рівності напруги на конденсаторі та на мережі, куди він включається. У цьому випадку $\Delta U = 0$ і зарядний струм конденсатора в момент комутації не виникає, рис.1.25. Контроль різниці напруги може бути замінений вимірюванням струму через комутований конденсатор.

Якщо застосований ключ змінного струму не має нескінченного опору в закритому стані, то за величиною струму витоку (зворотного струму) можна синхронізувати момент включення конденсатора, тобто в момент переходу цього струму через нуль. Приклади синхронного включення конденсатора в системі регулювання кута навантаження синхронного генератора наведені на рис.1.25. Найбільшим опором в закритому стані має ключ на рис.1.25, а.

Напруга на конденсаторі U_c у відкритому стані ключа збігається з напругою мережі U_a , а в закритому – спадає за експоненціальним законом по мірі розряду комутованого конденсатора.

Якщо опір ключа в закритому стані не занадто великий, то спадаюча напруга модулюється змінним струмом конденсатора, рис.1.25, б, в. Опір закритого ключа

в схемі, процеси в якій показано на рис.1.25, б в три рази менше, ніж у схемі з процесами, наведеними на рис.1.25, в.

Моменти відкриття ключів на рис.1.25 збігаються з моментами рівності нулю різниці напруги мережі і конденсатора: $\Delta U = U_a - U_c = 0$.

Тому зарядні струми відсутні, а величина струму конденсатора після відкриття ключа визначається похідною напруги мережі:

$$I_c = C \frac{dU_a}{dt}.$$

У перехідний процес при включенні потужного навантаження можлива ситуація, коли напруга суднової мережі значно зменшується, а напруга на конденсаторі ще залишається великою: $U_c > U_a$, див. четвертий період напруги на рис.1.25, в.

Якщо в цей момент схема керування повинна включити конденсатор, то схема синхронізації не дозволить цього зробити і станеться затримка в керуванні. З метою розряду конденсаторів під час вимкненого стану застосовуються спеціальні розрядні резистори, які встановлюються паралельно з конденсаторами.

Динамічні властивості системи компенсації реактивної потужності залежать від вибору закону керування конденсаторами УКРП.

Наприклад, компенсація реактивної потужності в автономних судових електроустановках, потужність генераторів якої порівняна з потужністю споживачів, відрізняється від режиму компенсації реактивної потужності стаціонарних електростанцій, [35].

Змішане активно-індуктивне навантаження автономного синхронного генератора суттєво впливає на режим його збудження. Реактивний струм навантаження компенсується струмом статора генератора за рахунок додаткового струму збудження. Збільшення активно-індуктивного навантаження синхронного генератора призводить до розмагнічування основного контуру намагнічування і зниження генеруємої напруги. Відхилення статорної напруги автономного судового генератора являється вхідним сигналом регулятора його збудження.

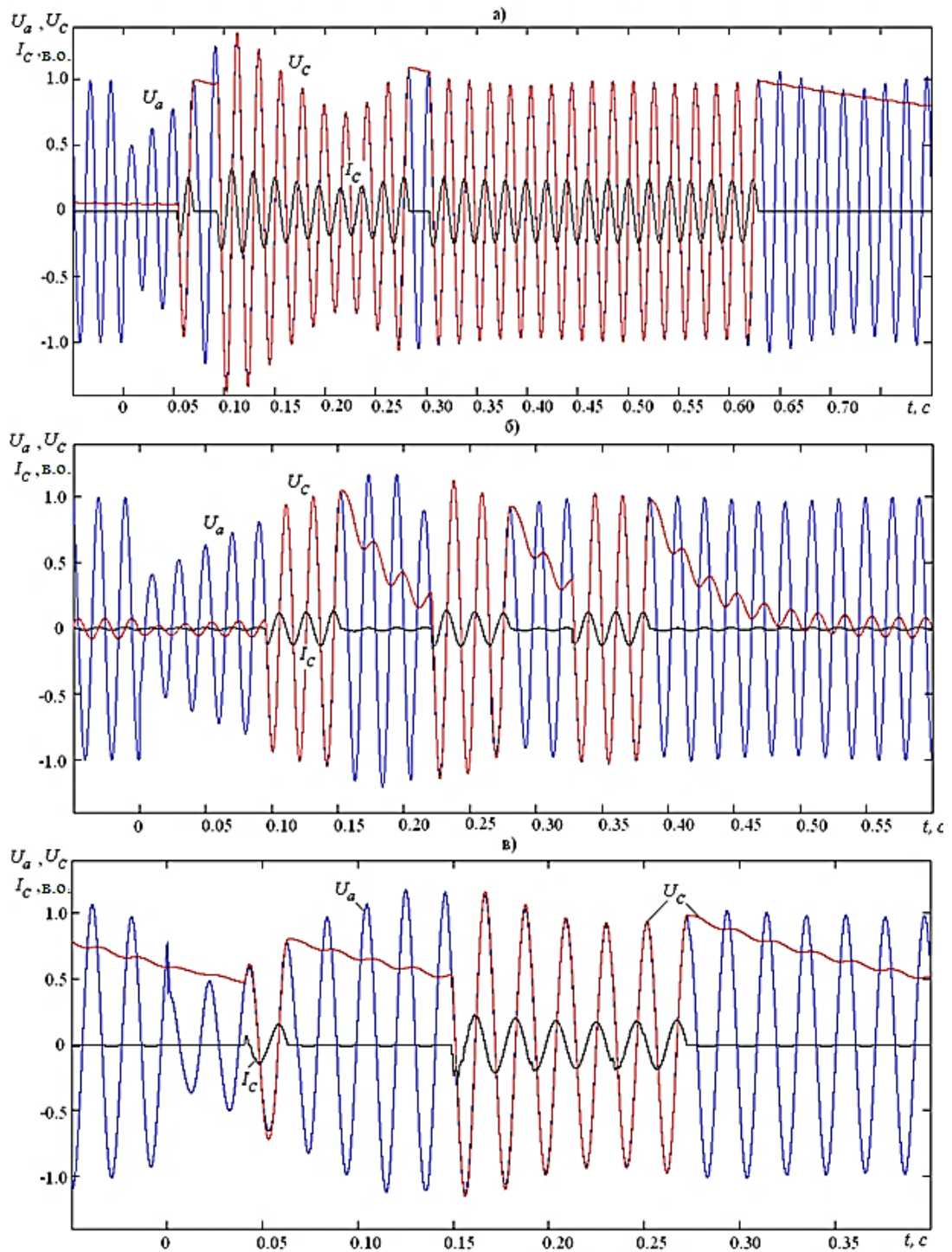


Рис.1.25. Процеси комутації конденсатора в колі змінного струму з синхронізацією моменту включення тиристорного ключа

У звичайній суднової електростанції компенсація реактивного струму навантаження здійснюється шляхом вимірювання відхилення напруги і збільшенням струму збудження синхронного генератора. Додавання до складу суднової електростанції конденсаторного пристрою компенсації реактивного струму суттєво

зменшує необхідний струм збудження суднових генераторів. Конденсаторний компенсуючий пристрій та синхронний генератор будуть працювати паралельно, виробляючи реактивну потужність, рис.1.26.



Рис.1.26. Паралельне генерування реактивної потужності судновим синхронним генератором і конденсаторним компенсуючим пристроєм

Таким чином, у судновій електроенергетичній установці виявляється два різних енергетичних пристрої, призначених для однієї мети – генерування реактивної потужності.

У синхронному генераторі керування генерацією реактивного струму здійснюється за непрямим показником – відхиленням статорної напруги від номінальної (заданої). У схемах керування синхронним генератором з компаундним трансформатором збудження генератора залежить також від струму навантаження. Керування ємністю компенсуючих конденсаторів проводиться за величиною реактивного струму навантаження або кутом між напругою і струмом навантаження.

1.7 Висновки до розділу 1.

1. У суднових автономних мережах з допустимими нелінійними спотвореннями [154] найбільш перспективною є конденсаторна компенсація реактивної потужності шляхом комутації секцій конденсаторів за допомогою тиристорних ключів.

2. Використання динамічної компенсація реактивної потужності навантаження дозволяє істотно поліпшити перехідні процеси при комутації змішаного навантаження, а також поліпшити пускові характеристики електроприводів співвимірної потужності.

3. Використання ємності конденсаторів для регулювання напруги протягом перехідного процесу комутації активно-індуктивного навантаження дозволяє значно зменшити час відновлення напруги СЕЕС з синхронними генераторними установками.

4. Застосування УКРП в автономних суднових електроенергетичних системах спрощує використання асинхронних генераторних агрегатів, а переваги АГ над традиційними СГ підтверджують доцільність широкого впровадження асинхронних генераторних установок з метою підвищення надійності, швидкодії та стійкості СЕЕС і зниження вартості електроенергії.

5. Пошук законів керування реактивним струмом суднової електроенергетичної системи, що містить генератори і конденсаторні компенсатори реактивної потужності, повинен проводитися з урахуванням їх взаємного впливу та взаємодії. Робота двох регуляторів - збудження синхронного генератора й регулятора реактивного струму компенсуючих конденсаторів - повинна бути узгодженою. При використанні мікропроцесорних систем керування електроенергетичними установками доцільно об'єднати функції управління генератора та УКРП в одному керуючому контролері.

2. ПРОБЛЕМА ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Науково-технічні задачі дисертації

Використання в судновій електроенергетичній системі додаткових джерел реактивної потужності буде ефективним, якщо при розробці системи керування будуть враховані особливості процесів в судновій електростанції, а також сучасні можливості вимірювання, синтезу і реалізації керуючих сигналів та виконавчих дій.

Для створення ефективної автономної СЕЕС потрібно вирішити науково-технічну проблему динамічної компенсації реактивної потужності в судновій автономній електроенергетичній системі, що включає конденсаторну установку компенсації реактивної потужності та декілька науково-технічних задач, які складають основу цієї дисертації.

Першою задачею являється правильний вибір елементів електроенергетичної системи та істотних процесів в них для розробки адекватних математичних моделей. Проблемою являється рівень складності, прийнятих допущень і деталізації процесів, що дозволяють аналізувати процеси керування реактивною потужністю в динаміці й отримати значущі результати за осяжний час розрахунку.

Врахування особливостей суднової електростанції, таких як співвимірність за потужністю приводного двигуна, генератора, навантаження і компенсуючого пристрою, а також взаємний вплив процесів в них, передбачає створення загальних математичних моделей для конкретних досліджуваних режимів і структур електростанції. Прийняті допущення при складанні математичного опису підсистем будемо приймати за ступенем їх впливу на досліджуваний процес.

Другою задачею дисертації обґрунтуємо вибір змінної, що характеризує величину реактивної потужності в навантаженні. Цей вибір визначає технічну реалізацію чутливих елементів давачів, які будуть використані в системі керування реактивною потужністю. Проблемою являється те, що в перехідних процесах при зміні навантаження величини, що характеризують реактивну потужність змінюються у відповідності з динамічними властивостями електроенергетичної системи.

Рішенням проблеми є аналіз вимірюваних величин з метою оптимального вибору вимірюваної змінної, що характеризує реактивну потужність в системі її регулювання.

Третьою задачею являється дослідження сучасних можливостей, вибір схемних рішень та алгоритмів керування джерелом реактивної потужності для досягнення максимально швидкого генерування необхідного ємнісного струму. Для цього необхідно проаналізувати процеси включення та відключення дискретних блоків конденсаторів за допомогою різних тиристорних схем та визначити мінімальний час дискретності для процесу тиристорної комутації.

Цей час буде вихідним у технічному завданні для вирішення другої задачі, тобто розробки або використання засобів вимірювання реактивної потужності. За час періоду комутації конденсаторів всі процеси вимірювання, фільтрації та усереднення по фазах повинні бути завершені.

Вибір кількості трифазних секцій конденсаторів та величини їх ємності відповідають таким характеристикам дискретних сигналів керування, як кількість і вага розрядів. Ці характеристики визначають точність регулювання реактивного струму і суттєво впливають на вартість пристрою.

Проблемою являється синтез дискретного закону керування комутацією трифазних блоків конденсаторів. В залежності від кількості секцій конденсаторів та величини їх ємності алгоритм комутації тиристорних комутуючих ключів буде різним.

Визначення закону керування реактивною потужністю в режимі пуску асинхронного електродвигуна є **четвертою задачею**. Проблемою цього режиму являється вибір раціонального співвідношення компенсуючої ємності під час розгону двигуна, поки його реактивна провідність максимальна і практично не змінюється, та під час встановлення сталої частоти обертання на завершальному етапі розгону, коли реактивна провідність двигуна швидко зменшується.

Дослідження можливості керування напругою синхронного генератора шляхом зміни компенсуючої ємності в його статорних колах відноситься до **п'ятої задачі** роботи. Тут визначається оптимальне поєднання законів зміни керуючих

впливів в обмотці збудження та пристрої компенсації реактивної потужності в колі навантаження. Узгоджене керування синхронним генератором та пристроєм компенсації дозволяє зменшити величину форсованого впливу в обмотці збудження генератора та зменшити час перехідного процесу при зміні навантаження.

Розробка способів і законів керування та використання асинхронних генераторів з короткозамкненим ротором і конденсаторним збудженням віднесена до **шостої задачі**. Простота конструкції ротора та особливості ряду режимів роботи, пов'язаних з асинхронним режимом збудження, вимагає рішення проблеми керування ємністю збудження асинхронного генератора. Використання асинхронних генераторів у складі автономних електроенергетичних установок потребує розв'язання проблеми спільного керування ними при паралельній роботі в багатогенераторних установках.

Перелічені задачі та проблеми не вичерпують питання керування реактивною потужністю в автономних генераторних установках, однак є важливими та економічно виправданими, вимагають нових рішень і підходів до їх вирішення.

2.2 Особливості проектування та експлуатації суднових автономних електроенергетичних систем

В порівнянні зі стаціонарними системами електропостачання автономні (транспортні) електроенергетичні системи мають відмінні особливості, що впливають на їх статичні характеристики та динамічні перехідні процеси, котрі необхідно враховувати при проектуванні та експлуатації, [10, 15, 17, 20].

Невеликі відстані між генераторами та навантаженнями і, як наслідок, малі реактивні та активні опори кабелів суднової мережі призводять до більш швидкодіючих змін напруги та частоти при перемиканні споживачів, при включенні на паралельну роботу та при коротких замиканнях. Зменшення сталих часу електричних кіл збільшують швидкості протікання електромагнітних перехідних процесів.

Менші маси дизельних, газових або парових приводних двигунів суднових генераторів призводять до більш прискорених механічних процесів в енергетичних

установках. Короткі кабельні лінії силової суднової мережі не обмежують максимальні значення струмів та електромагнітних моментів в перехідних процесах, що відбуваються в електроенергетичних установках.

Приблизно однакова потужність приводних двигунів і генераторів електроустановок, неоднаковий нахил навантажувальних характеристик приводних двигунів та різна швидкодія їх регуляторів, а також режими паралельної роботи генераторів з різнотипними приводними двигунами впливають на протікання процесів в автономній багатогенераторній електростанції.

Співвимірність потужності генераторів і навантаження, необхідність автономної роботи генераторів на електроприводи великої потужності призводять до більш тяжких перехідних режимів з небезпекою знеструмлення електроенергетичної системи.

Застосування у складі однієї електроенергетичної системи різних типів генераторів змінного струму, таких як самозбуджуючі синхронні генератори, асинхронні з короткозамкненим або фазним ротором вимагають досліджень їх спільної роботи.

Наявність в силових колах електростанції напівпровідникової перетворювальної техніки і комутаторів суттєво ускладнює їх дослідження та забезпечення необхідної якості електроенергії.

У наукових працях, які присвячені дослідженню процесів в суднових електроенергетичних системах, з метою їх проектування та ефективної експлуатації виконуються розрахунки процесів в різних експлуатаційних та аварійних режимах, в яких визначаються струми, моменти в елементах електроенергетичної системи, напруга та частота мережі, тривалості динамічних процесів та умови стійкості і надійності системи, розраховуються налагоджувальні параметри систем регулювання та захисту, [33, 36, 38, 39, 41-43, 45, 48].

Виконання аналітичних розрахунків в зазначених дослідженнях ускладнене нелінійними залежностями струмів, напруги і частоти від таких факторів як криві намагнічування, вихрові струми в магнітному колі, пружні зв'язки в механічних

елементах, індуктивності статорних обмоток та кіл збудження, нелінійності навантаження і т.і.

Одним із способів вирішення цих складних завдань являється використання методів математичного моделювання, які дозволяють розраховувати характеристики електроустановок в перехідних та сталих режимах, [32, 37, 44, 46, 58, 60].

Отже, основними методами дослідження в роботі прийняті методи математичного моделювання автономної електроенергетичної установки, методи теорії автоматичного керування, а також фізичне вивчення досліджуваних процесів та режимів роботи СЕЕС на розроблених математичних моделях, експериментальних макетах, повномасштабному тренажері і на реальних суднових енергетичних установках, [46, 74, 121, 123, 132, 224].

2.3 Фізичне моделювання режимів роботи генераторних установок з конденсаторними джерелами реактивної потужності

Основні режими роботи генераторних установок досліджувалися на діючих експериментальних макетах і на створених комп'ютерних моделях електроустановок, що дозволило зіставити отримані результати та зробити оцінку адекватності моделей. Достатня точність моделей, що підтверджена на досліджуваних режимах з певними параметрами, дозволяє сподіватися на достовірність моделей на аналогічних режимах з іншими параметрами. Науково-дослідні роботи розглянутого напрямку за участю дисертанта почалися з 1978 року в колективі вчених академії А. Є. Паса, Л. В. Вишневського, В. М. Беляєва, В. П. Мироненка, С. І. Горба, В. А. Новосада та інших.

Створені експериментальні макети та дослідні комплекси (рис. 2.1 – 2.5, 2.11) дозволили детально вивчити типові режими роботи суднових генераторних установок з джерелами реактивної потужності та розробити адекватні математичні моделі основних динамічних процесів у них, [15, 31, 35, 54, 62, 74, 121].

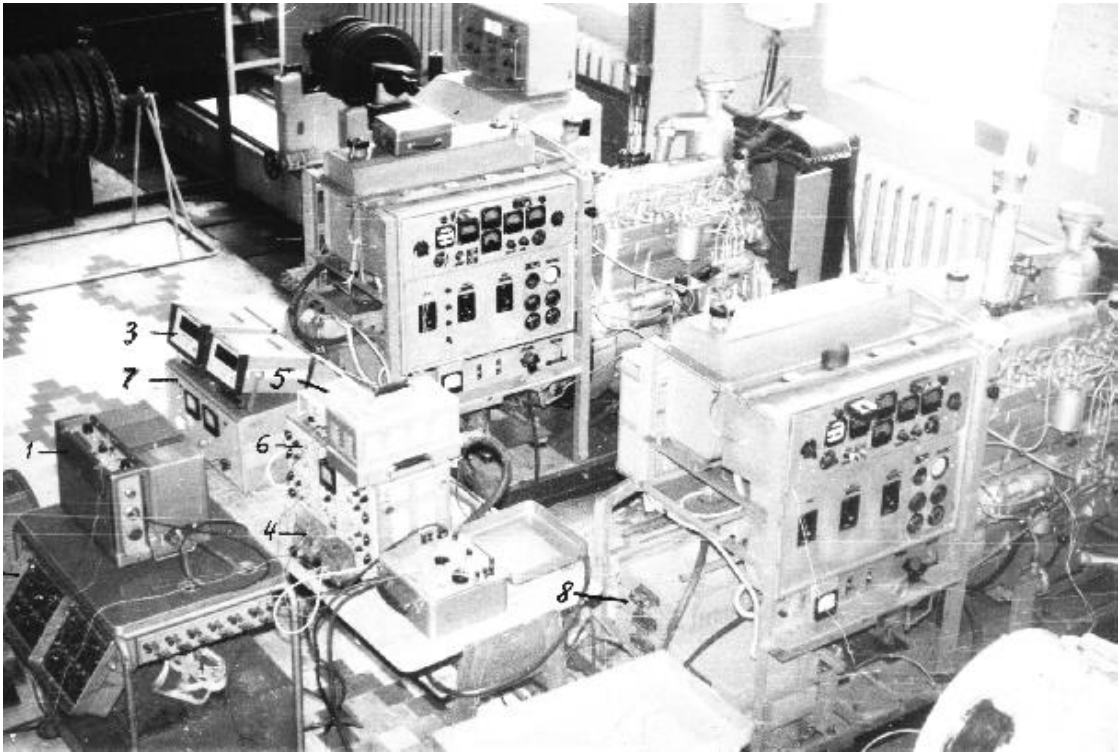


Рис. 2.1. Випробувальний комплекс для дослідження типових режимів суднової електростанції з синхронними та асинхронними генераторами

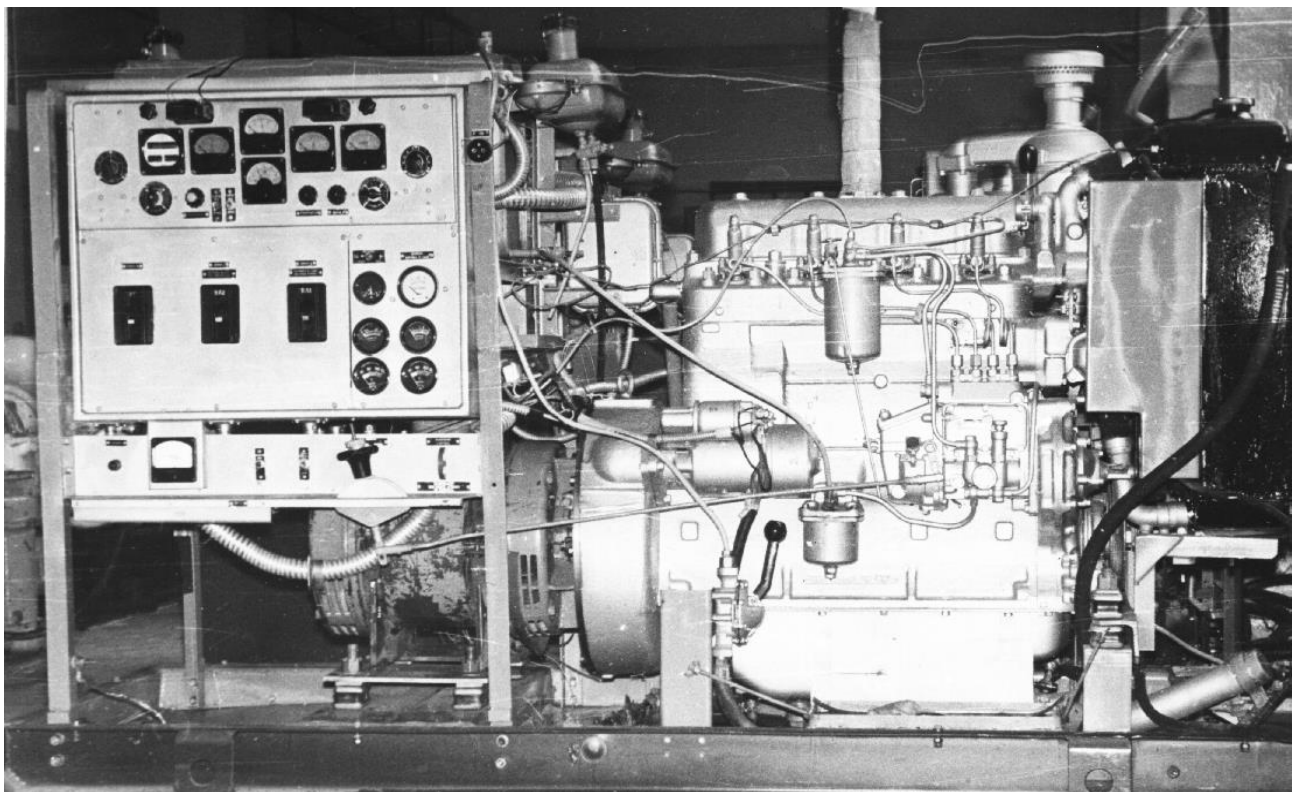


Рис.2.2. Дослідний макет асинхронного дизель-генератора потужністю 20 кВт

Експериментальний дослідницький комплекс (рис.2.1) з двох дизельних електроагрегатів типу АД-20 потужністю 20 кВт був створений в університеті для вивчення процесів автономної і паралельної роботи генераторних агрегатів з синхронними та асинхронними генераторами, рис.2.2. До складу комплексу було включено кероване конденсаторне джерело реактивної потужності.

Для запису перехідних процесів електроагрегати були доукомплектовані давачами частоти обертання валу, рис.2.3, та положення паливної рейки, рис.2.4.

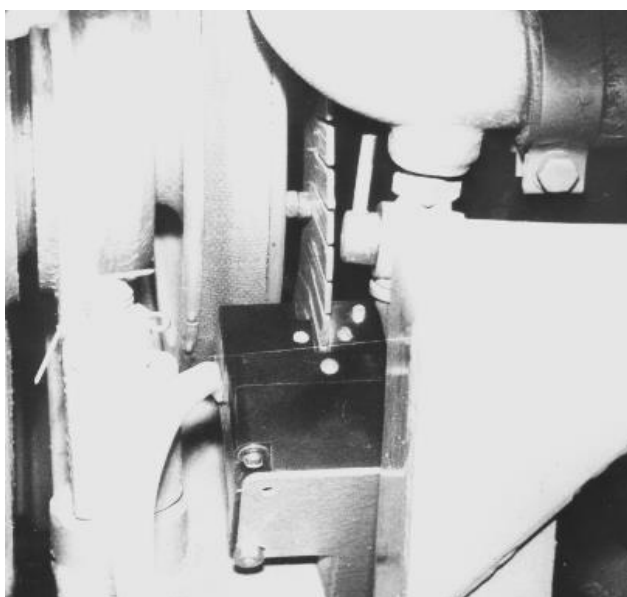


Рис. 2. 3. Імпульсний давач частоти обертання валу дизель-генератора

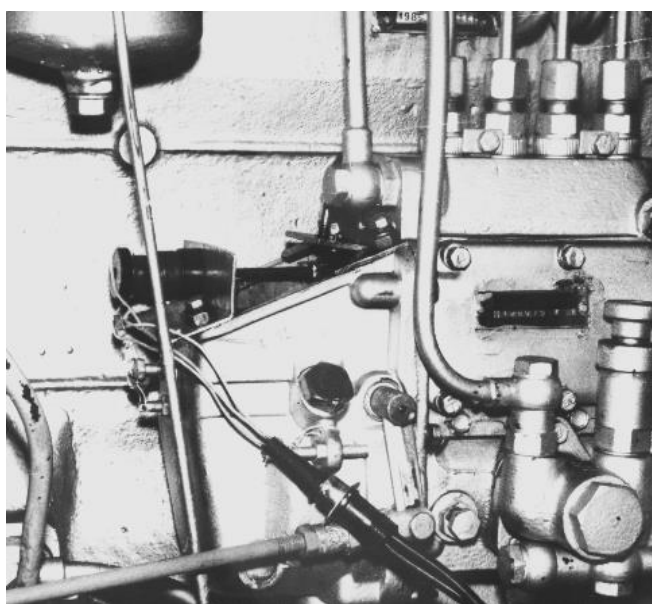


Рис. 2. 4. Індуктивний давач положення паливної рейки дизеля

На електроагрегатах синхронні електричні машини по черзі були замінені на асинхронні, рис.2.5, що дозволило дослідити і порівняти режими паралельної роботи синхронних і асинхронних дизель-генераторів.

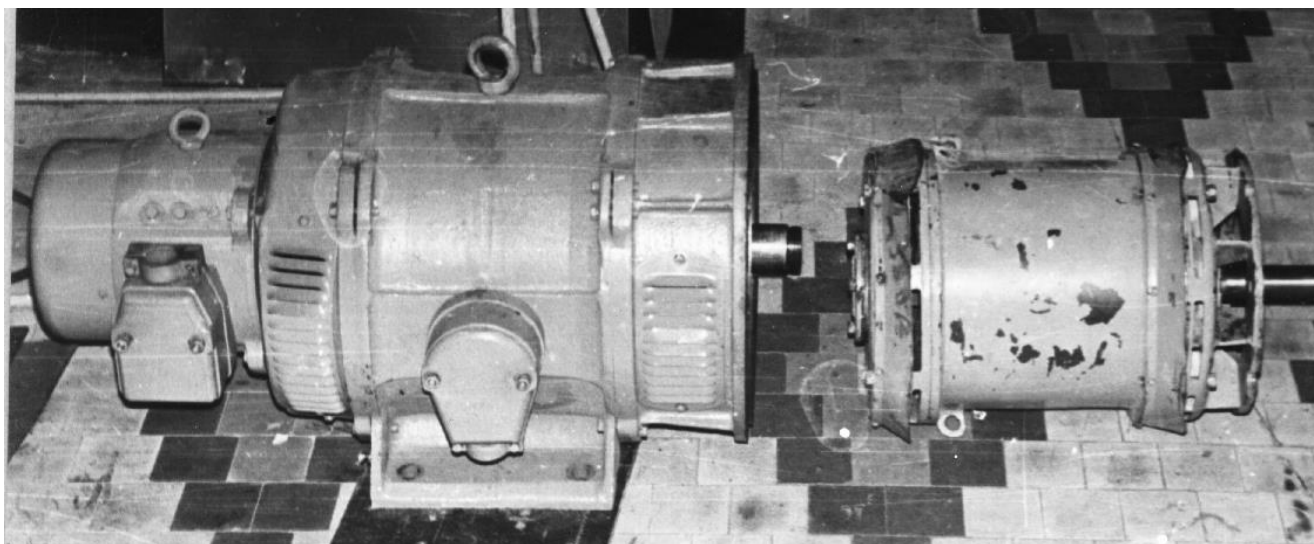


Рис. 2.5. Експериментальні генератори потужністю 20 кВА:
синхронний (ліворуч) і асинхронний

На осцилограмах рис. 2.6 - 2.8 наведені процеси обмінних коливань активної потужності (струмів) між синхронними генераторами, синхронним та асинхронним генераторами і двома асинхронними генераторами, [31, 119, 120].

При паралельній роботі синхронного генератора з асинхронним (рис.2.8) джерелом реактивної потужності, необхідної для збудження асинхронної машини, був перезбуджений синхронний генератор. А при паралельній роботі двох асинхронних генераторів (рис.2.7) – керована конденсаторна установка.

Дослідження та ідентифікація динамічних властивостей асинхронного генератора як об'єкта керування напругою (рис.2.9 – 2.10) виконувалися як на експериментальних макетах, так і на математичних моделях, що дозволило переконатися в їх адекватності, [35, 47, 141].

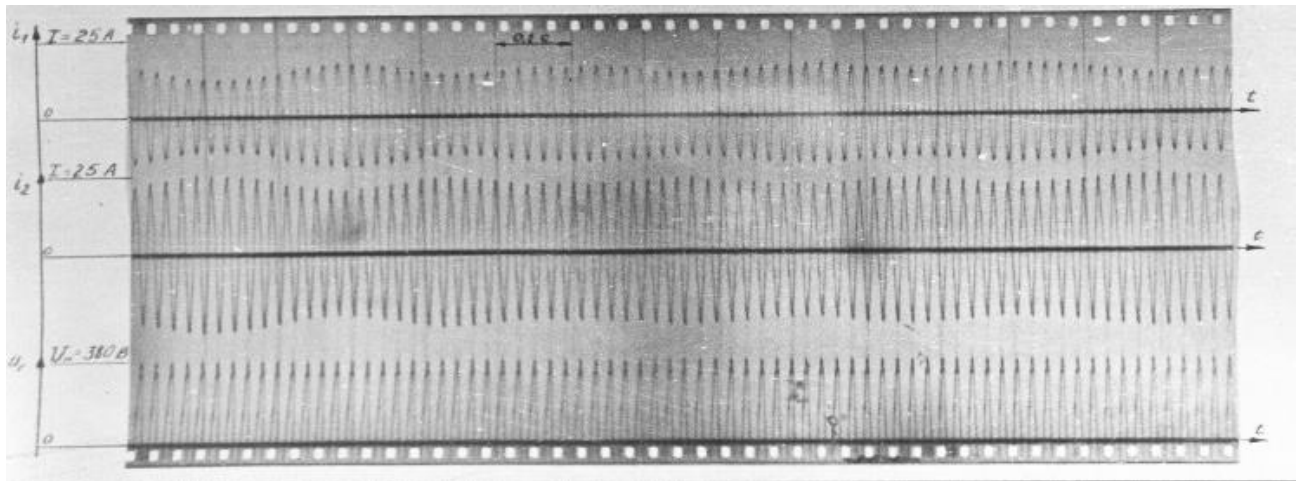


Рис. 2.6. Осцилограма обмінних коливань струму синхронних дизель-генераторів при паралельній роботі

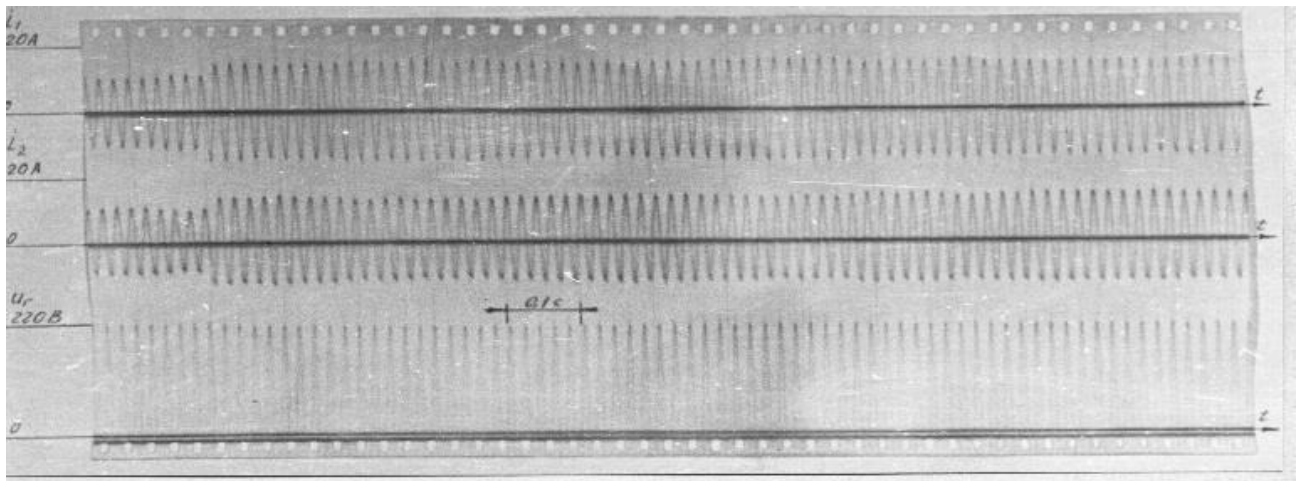


Рис. 2.7. Осцилограма обмінних коливань струму асинхронних дизель-генераторів при паралельній роботі

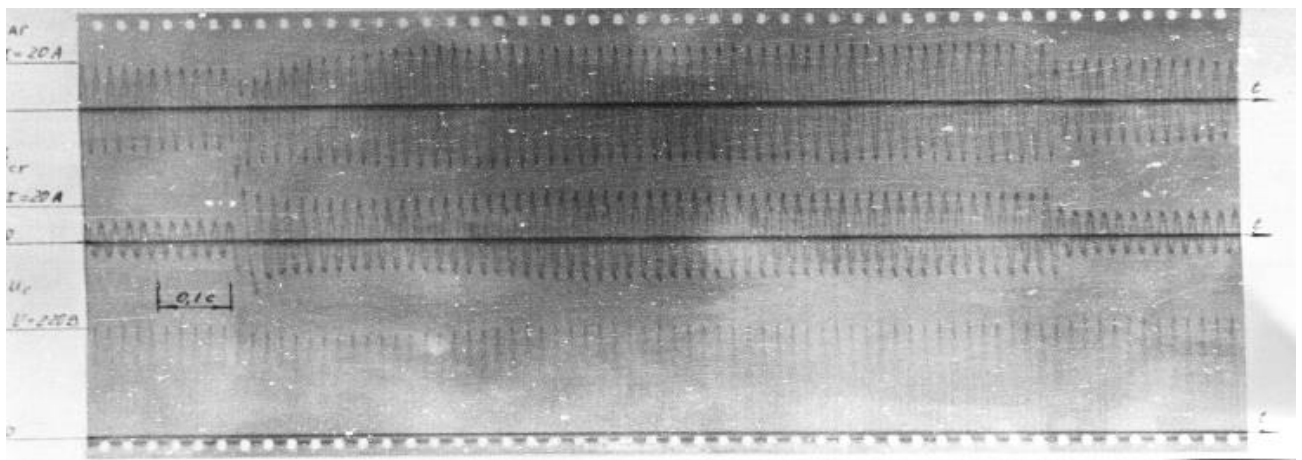


Рис. 2.8. Осцилограма обмінних коливань струму синхронного і асинхронного дизель-генераторів при паралельній роботі

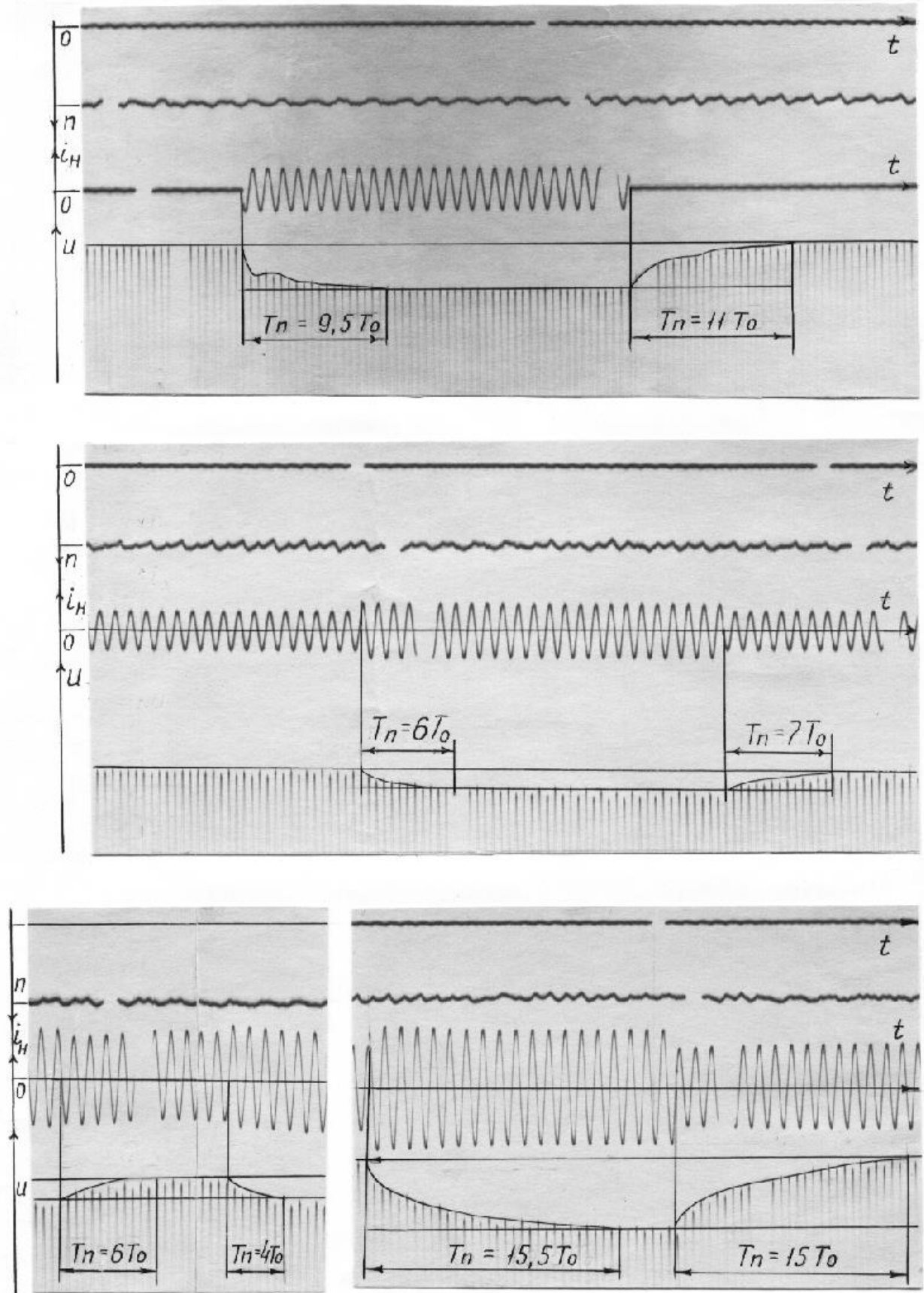


Рис.2.9. Осцилограми комутації навантаження в асинхронному дизель-генераторі без зміни ємнісного струму збудження

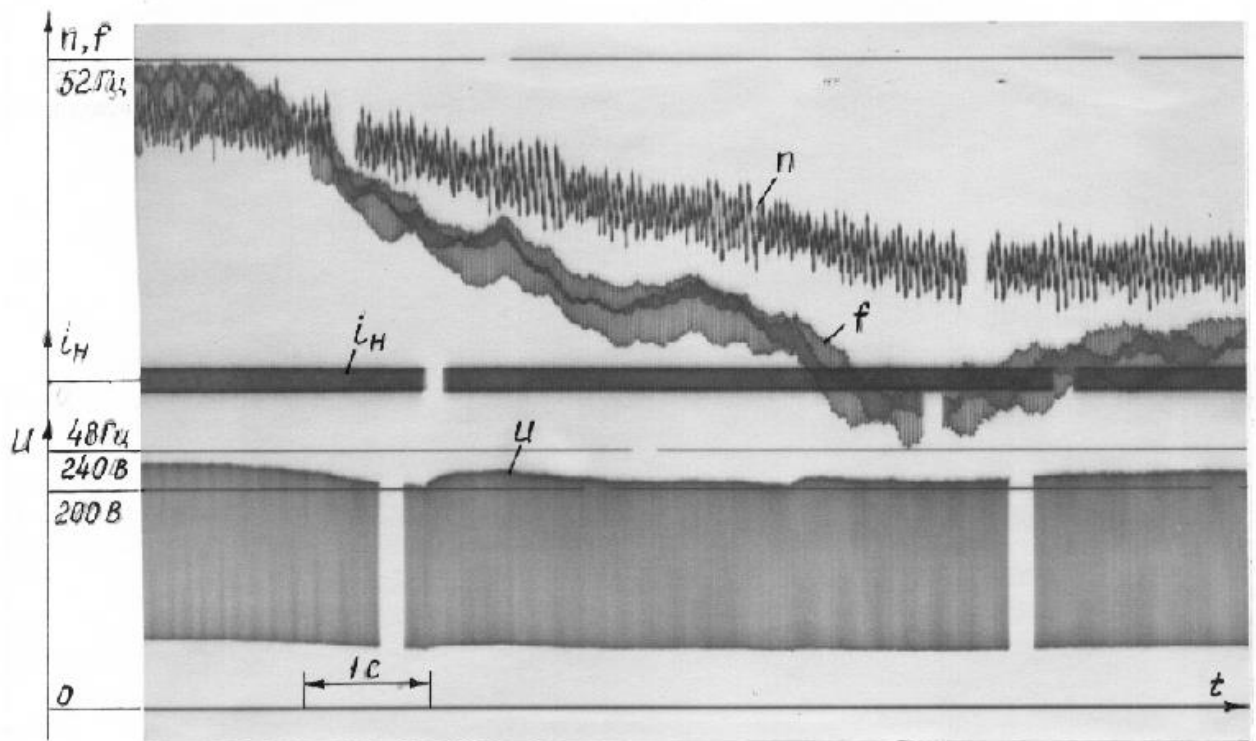
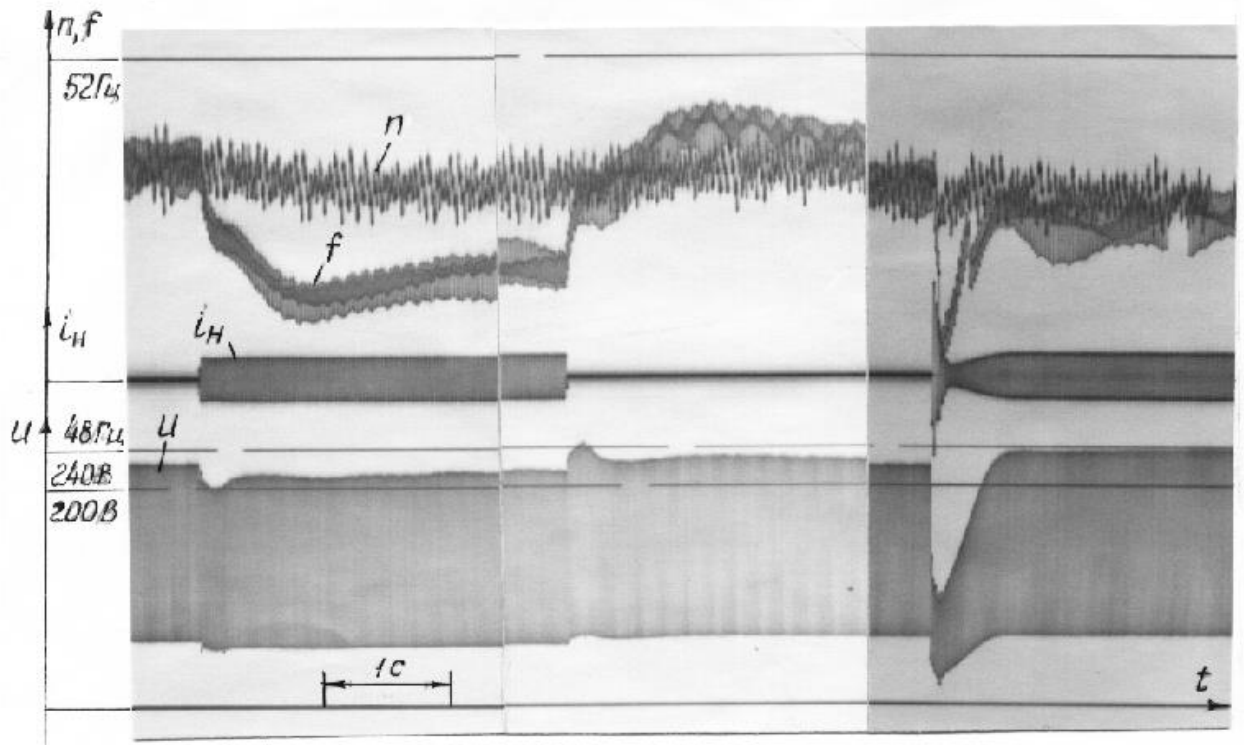


Рис.2.10. Перехідні процеси комутації навантаження в асинхронному генераторному комплексі з дискретним регулятором напруги

Дослідження автономної роботи асинхронного генератора з конденсаторним керуванням, виконувалось також на експериментальному макеті електроустановки, створеному в рамках НДР, рис.2.11, [51, 153].

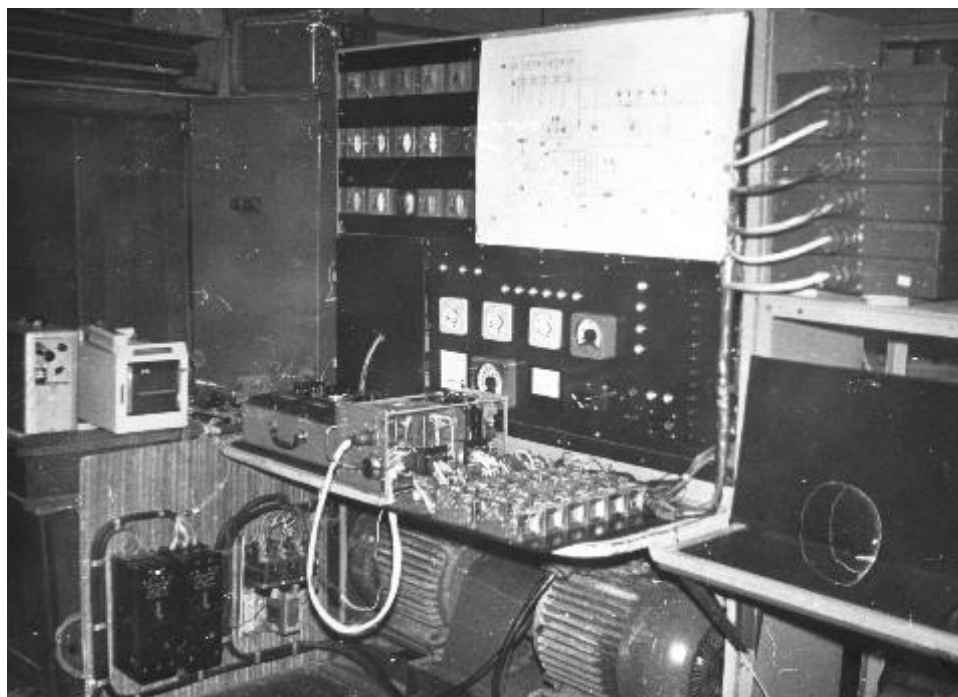


Рис. 2.11. Експериментальний макет асинхронного генераторного комплексу з конденсаторним збудженням потужністю 30 кВт

На цьому стенді досліджувалися процеси комутації навантаження, рис. 2.9, в тому числі і режими пуску асинхронних електродвигунів співвимірної потужності, рис.2.12.

На експериментальній базі університету дисертантом спільно з науковим колективом вирішувалися завдання керування генераторними установками шляхом створення динамічних установок реактивної потужності, рис.2.10, 2.13, [52-54].

Експериментальні дані, які отримані на діючих макетах дозволили розробити адекватні математичні моделі типових режимів роботи автономних генераторних установок з керуванням реактивною потужністю [121], а також створити тренажерний комплекс сучасної автоматизованої суднової електроенергетичної системи, [74, 127, 129, 130, 224, 225].

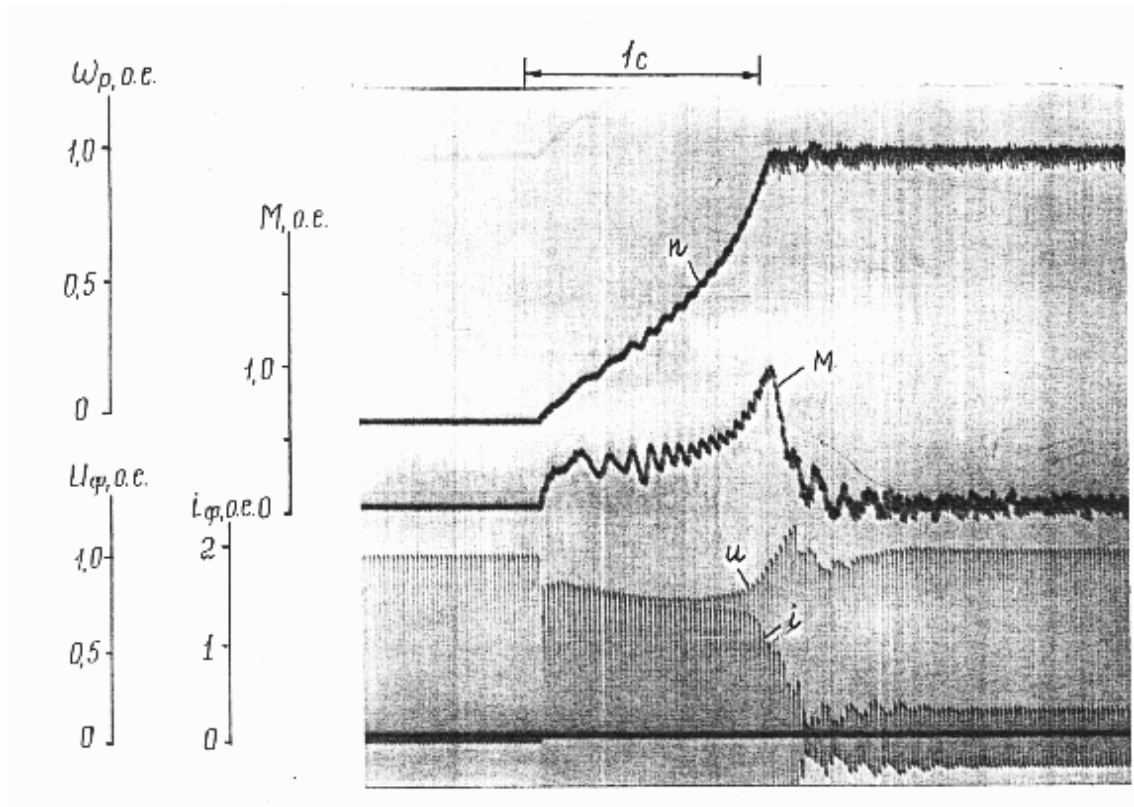


Рис. 2.12. Осцилограма пуску двигуна потужністю 14 кВт від асинхронного генератора потужністю 30 кВт через резистори величиною 1.5 Ом

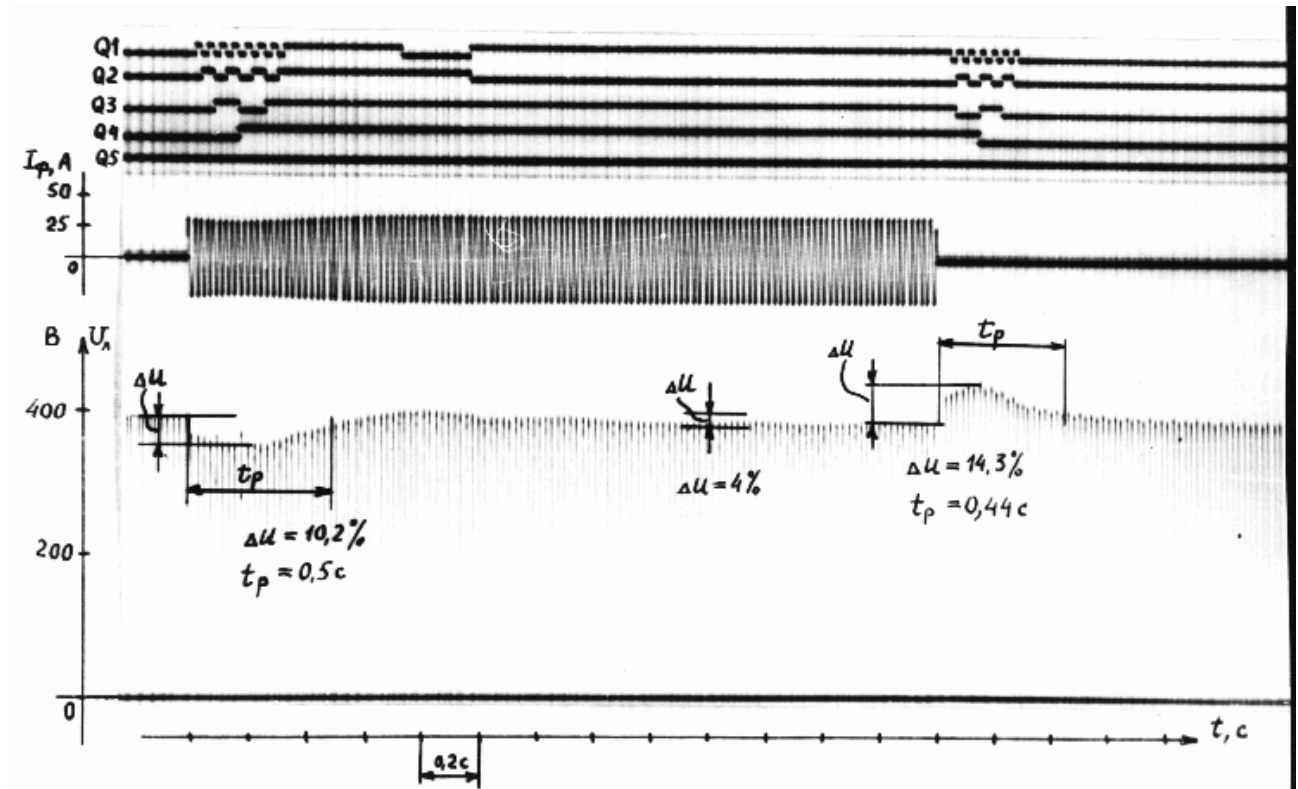


Рис. 2.13. Експериментальні перехідні процеси комутації навантаження в асинхронному генераторі з конденсаторним регулятором

2.4 Повномасштабний тренажерний комплекс суднової автоматизованої електроенергетичної системи

Безпека мореплавства суден, наряду з іншими чинниками, залежить від надійності дії суднових систем «людина – машина» і тому розглядається в якості основи сучасних методів інженерної підготовки офіцерів машинної команди [124, 126, 128, 140, 223, 225]. Сьогодні суднові механіки та електромеханіки повинні володіти широким діапазоном професійних знань і навичок: від роботи з ручним інструментом та вимірювальними приладами до використання сучасних комп'ютерних технологій, забезпечуючи як вахтове, так і без вахтове обслуговування суднового обладнання та засобів автоматики.

Міжнародна Конвенція про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 р. з поправками [124] внесла суттєві зміни та доповнення в стандарти компетентності для суднових механіків і електромеханіків по функції «Електрообладнання, електронна апаратура та системи управління», що вимагає розробки та освоєння нових програм як теоретичної, так і практичної підготовки.

Згідно нової Конвенції тривалість практичної підготовки повинна бути не менше 12 місяців, з яких не менше 6 місяців повинні бути на судні. У зв'язку з цим посилюється актуальність практичної підготовки, яка повинна проводитися в схвалених лабораторних і тренажерних комплексах морських навчальних закладів.

Електрообладнання та електронні засоби автоматики сучасного судна відрізняються великою енергетичною насиченістю та високим рівнем автоматизації на базі сучасних комп'ютерних технологій управління. Наявність зазначеного силового обладнання та систем автоматизації принципово змінили методику їх технічної експлуатації, діагностику несправності, налагодження.

Практично всі сучасні системи управління судновими електроенергетичними та навігаційними комплексами інтегровані в єдину загально суднову систему автоматизації, мають гнучку систему програмування режимів роботи [73]. Все це різноманіття і складність завдань обумовлюють необхідність високого рівня

підготовки та ерудиції суднового інженера для забезпечення необхідного рівня технічного обслуговування сучасного електроустаткування й електронних засобів автоматизації.

Однак, велика кількість практичних завдань і експлуатаційних ситуацій з управління складними судновими електроенергетичними та електромеханічними системами та комплексами в силу об'єктивних причин, пов'язаних з режимом експлуатації та забезпеченням живучості і безпеки судна не можуть розглядатися в необхідному для сучасного фахівця обсязі.

Тому, створення спеціалізованих, реально функціонуючих (не віртуально) і максимально наближених до суднової конфігурації тренажерних комплексів на базі реального обладнання та сучасних комп'ютерних технологій керування, дозволить вирішити дуже важливі проблеми підготовки майбутніх суднових інженерів, [130].

З метою відповідності підготовки суднових інженерів вимогам Міжнародної Конвенції про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 р. з поправками на кафедрі суднової електромеханіки і електротехніки університету за підтримки світових виробників електротехнічної продукції, таких як Schneider Electric, Mitsubishi Electric, DEIF, SELCO, вітчизняної електротехнічної компанії КСІМЕКС, а також Одеського морського тренажерного центру розроблено й створено повномасштабний тренажерний комплекс суднової автоматизованої електроенергетичної системи [56, 125, 127, 129, 130, 224,225].

Областю використання тренажера повномасштабної судової автоматизованої електроенергетичної системи (далі тренажер повномасштабної САЕЕС) являється підготовка та перевірка компетентності суднових механіків та електромеханіків у рамках дипломної та післядипломної освіти за програмами, що базуються на міжнародних та національних стандартах.

Крім того, областю використання тренажера являється проведення науково-практичних досліджень, спрямованих на подальше вдосконалення технічних засобів автоматизації суднового електрообладнання, процесів вироблення та розподілу електроенергії, а також методів ефективного навчання та перевірки компетентності суднових інженерів.



Рис.2.14, а. Секції ГРЩ: основних дизель-генераторів, синхронізації та управління, валогенератора, живлення з берега і аварійного дизель-генератора



Рис.2.14, б. Секція керування асинхронним валогенератором і реактивною потужністю електроенергетичної системи

Таким чином, тренажер повномасштабної САЕЕС спроектований для практичного навчання курсантів та студентів морських навчальних закладів, а також підготовки та перевірки компетентності суднових спеціалістів (механіків та електромеханіків) з несення вахти та обслуговування сучасних інтегрованих систем автоматичного керування судновою електростанцією і окремими електромеханічними системами та комплексами, який відповідає функціям «Електрообладнання, електронна апаратура та системи управління» і «Технічне обслуговування і ремонт» стандартів А-III/1, А-III/2, А-III/6 Міжнародної Конвенції ПДНВ 78 з поправками. В тому числі для суднових механіків за наступними компетенціями:

- експлуатація електрообладнання, електронної апаратури і систем управління;
- технічне обслуговування та ремонт електричного та електронного обладнання;
- усунення неполадок, приведення в робочий стан електричного та електронного обладнання управління.

Для суднових електромеханіків за наступними компетенціями:

- нагляд за експлуатацією електричних і електронних систем, а також системи управління;
- нагляд за роботою автоматичних систем управління руховою установкою і допоміжними механізмами;
- експлуатація генераторів і систем розподілу електроенергії;
- експлуатація та технічне обслуговування силових систем з напругою понад 1000 вольт;
- експлуатація комп'ютерів і комп'ютерних мереж на судні;
- технічне обслуговування та ремонт електричного та електронного обладнання;
- технічне обслуговування та ремонт систем автоматики і управління головною силовою установкою і допоміжними механізмами;
- технічне обслуговування та ремонт електричних, електронних систем і систем управління палубними механізмами та вантажопідйомним устаткуванням.

Короткий перелік основних завдань, розв'язуваних на тренажерному комплексі, [27, 74, 121, 123, 126, 128, 134, 136].

1. Відпрацювання навичок з аналізу сучасних суднових автоматизованих електроенергетичних систем. Сучасне компонування САЕЕС, схеми розподілу електроенергії, включаючи високовольтні. Економічна і безпечна експлуатація дизель-генераторів, валогенераторів, апаратів і пристроїв систем розподілу та захисту. Аналіз ситуацій та практичне відпрацювання дій оператора при різних видах керування в типових режимах роботи електростанції, включаючи аварійні, на реальному обладнанні САЕЕС. Відпрацювання алгоритмів автоматизації типових електростанцій, конфігурування контролерів. Налаштування захистів та параметрів регуляторів, пошук і усунення несправності.
2. Отримання навичок роботи з сучасними програмованими логічними контролерами (ПЛК) на базі контролерів фірм Mitsubishi Electric і Schneider Electric, серій Alpha2, Q, FX3U, TeSYS U і Twido на прикладах управління різними судновими електромеханічними системами. Знайомство з програмою для конфігурування мікроконтролерів. Налаштування і моніторинг мікроконтролера за допомогою сервісного програмного забезпечення. Склад і завантаження файлів конфігурації в мікроконтролер. Підключення до мікроконтролерів та використання додаткових пристроїв (панелі оператора, віддаленого дисплея, ПК). Розробка програмного забезпечення для ПЛК різних типів, спрямованих на вирішення конкретних завдань для суднових механізмів та систем.
3. Набуття навичок технічного використання та обслуговування сучасних інформаційних і керуючих систем. Налаштування параметрів комунікаційних протоколів обміну даними між контролерами, окремими локальними об'єктами керування, системою дистанційного керування та моніторингу, використовуючи реальне обладнання і засоби автоматизації.
4. Використання сучасних енергозберігаючих технологій [76], що застосовуються на судах, на прикладах частото-керованих електроприводів різних суднових механізмів і систем, динамічної компенсації реактивної потужності для підвищення коефіцієнта потужності суднової електроенергетичної установки.

Тренажер повномасштабної САЕЕС, який забезпечує практичну підготовку та перевірку компетентності офіцерів машинної команди за функціями «Електрообладнання, електронна апаратура та системи керування», і «Технічне обслуговування і ремонт» відповідає загальним експлуатаційним вимогам розділу А-I/12 Міжнародної Конвенції про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 р. з поправками, виконаний на реальному обладнанні та засобах автоматизації, відповідає реальній конфігурації і компонуванню суднової автоматизованої електростанції з реальними споживачами і типовим навантаженням. Тренажер повномасштабної САЕЕС схвалений Морськими Класифікаційними Товариствами.

Тренажер відповідає цілям та завданням підготовки, а також цілям і завданням перевірки компетентності офіцерів машинної команди.

Тренажер відтворює реальні умови експлуатації САЕЕС для отримання слухачами навичок технічного обслуговування і ремонту, що відповідають цілям підготовки, а також дає можливість продемонструвати ці навички для цілей оцінки компетентності.

Тренажер забезпечує контрольовану експлуатаційну обстановку, включаючи позаштатні та аварійні ситуації, які відповідають цілям і задачам підготовки, а також дозволяє імітувати різні експлуатаційні ситуації.

Тренажер забезпечує можливість слухачам з будь-якого комп'ютеризованого робочого місця або безпосередньо за допомогою реальних органів контролю управляти як електростанцією, так і окремими електромеханічними об'єктами в автоматизованому або автоматичному режимах роботи, простежити за робочими параметрами об'єктів управління. Тренажер надає слухачам доступ до навчально-методичних і довідкових матеріалів.

Тренажер забезпечує можливість інструктору відстежувати та реєструвати дії слухачів з метою подальшого аналізу допущених помилок.

Зазначений тренажерний комплекс виконаний з можливістю віддаленого управління, моніторингу та дистанційного доступу до навчально-методичних і довідкових матеріалів.

Більш детальна інформація про тренажерний комплекс САЕЕС, напрямках та методах практичної підготовки суднових інженерів машинної команди, що проводиться на одній із мов Міжнародної Морської Організації (ІМО), наведена в додатку Г.



Рис.2.15. Фізичні моделі суднових дизель-генераторів

Тренажер САЕЕС включає головний розподільний щит (ГРЩ), три основних і один аварійний генераторні агрегати, суднові споживачі електроенергії з їх типовим навантаженням, автоматизовані робочі місця операторів (слухачів) і робоче

місце інструктора. ГРЩ складається з 14 секцій: двох секцій синхронних генераторів (№1, №2); секції валогенератора та регулювання реактивної потужності ($\cos\varphi$); секції синхронізації і управління; секції споживачів №1; секції аварійного генератора; секції споживачів №2; секції живлення з берега (від мережі навчального корпусу); 4-х секцій високовольтного обладнання 7,2 кВ. Система автоматичного керування судновою електростанцією (Power Management System, PMS) реалізована на базі сучасних контролерів серії C6200 і M2500 фірми SELCO, а також контролерів серії PPM 3 фірми DEIF.

Основна електростанція складається з двох дизель-генераторних агрегатів моделі GMS10PX фірми Power link Machine Co (див. рис. 2.15). Управління дизелями здійснюється мікроконтролерами M2500 фірми SELCO, які вбудовані в кожен секцію синхронного генератора. В якості суднового генератора використовується синхронний без щітковий генератор типу PI044E фірми Stamford з сучасним цифровим автоматичним регулятором напруги АРН. Третім основним генератором є валогенератор. Валогенераторна установка ВГУ (валогенератор) обладнана асинхронним генератором з конденсаторним збудженням та приводним асинхронним електродвигуном. Для живлення та керування приводним електродвигуном ВГУ використовується перетворювач частоти, що імітує зміну частоти обертання гребного валу в залежності від погодних та інших умов роботи судна.

Система регулювання реактивної потужності САЕЕС (див. рис. 2.16) складається з контролера коефіцієнта потужності серії BR7000 – T15/S485 фірми EPCOS, тиристорних модулів (див. рис. 2.17) для керування блоком конденсаторних батарей типу TSM – LC-I, багатофункціонального вимірювального інтерфейсу (Multi Measuring Interface) MMI7000-S, і конденсаторних блоків різної ємності з ваговими коефіцієнтами 1-2-4-8 для підтримки заданого коефіцієнта потужності САЕЕС. До складу аварійного розподільного щита (АРЩ) входить аварійний дизель – генератор з автоматикою дистанційного запуску, а також відповідні споживачі згідно вимог Морських Класифікаційних Товариств. Основними споживачами в САЕЕС являються суднові електроприводи різних механізмів та систем, які побудовані на базі сучасних перетворювачів і програмованих логічних контролерів, наприклад,

FX3U та серії Q фірми Mitsubishi Electric, частотних перетворювачів FR – A740, FR – A540, Altivar 71 фірм Mitsubishi Electric та Schneider Electric.

На комп'ютерах інструкторів встановлена операційна система сервера та спеціалізоване програмне забезпечення M-Vision (SCADA), за допомогою якого можна керувати як електростанцією, так і окремими електромеханічними об'єктами в автоматизованому або автоматичному режимах роботи, встановлювати пріоритети управління операторами, контролювати та реєструвати їх дії.

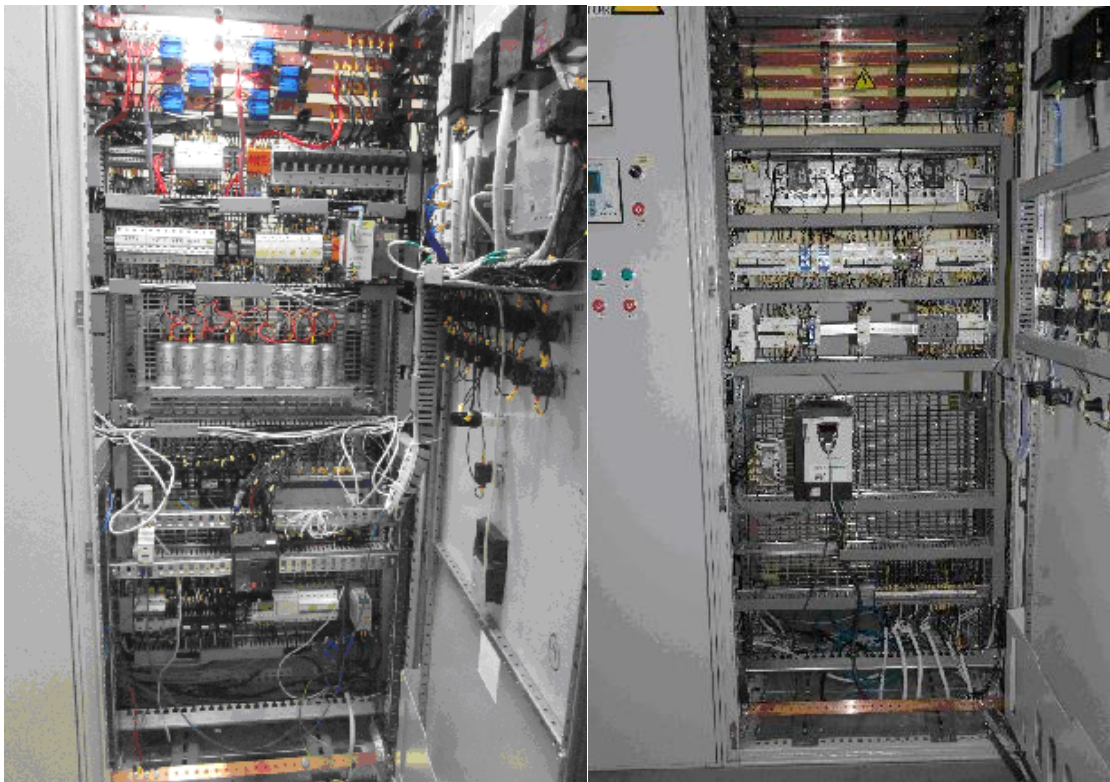


Рис.2.16. Секції керування реактивною потужністю та навантаженням

Робочим механізмом кожного з електроприводів служить навантажувальний генератор, з'єднаний з валом конкретного електродвигуна, навантаження якого в свою чергу імітується підключенням за допомогою відповідного мікроконтролера навантажувальних резисторів у відповідності з характерним навантаженням реального судового механізму. Для дистанційного керування та контролю режимними параметрами тренажера використовується спеціальне програмне забезпечення M-Vision (SCADA), за допомогою якого можна керувати як електростанцією, так і окремими електромеханічними об'єктами в автоматизованому або автоматичному

режимах роботи, простежити за робочими параметрами об'єктів керування з будь-якого робочого місця. Комп'ютери інструкторів та операторів об'єднані в мережу, що дає можливість передачі управління тренажером в цілому або його локальним об'єктом будь-якому слухачеві, імітувати різні експлуатаційні ситуації, включаючи аварійні, контролювати та реєструвати дії оператора.

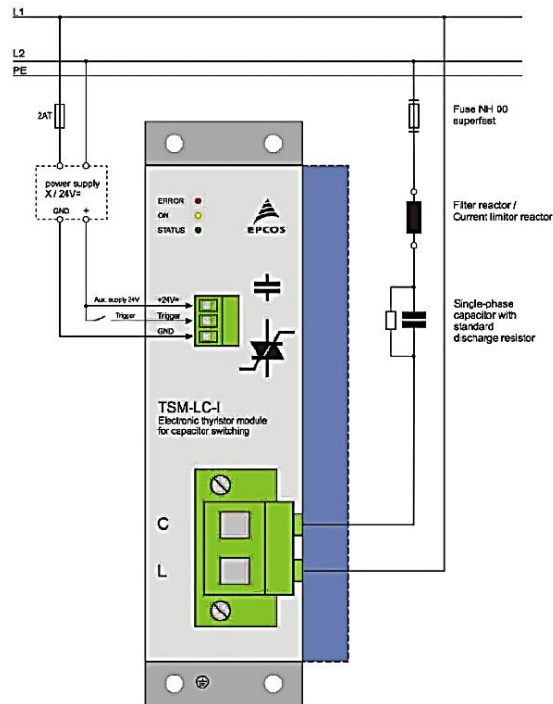


Рис.2.17. Тиристорний модуль безударної комутації конденсаторів

На сервері (комп'ютері інструктора) встановлюються також всі додаткові програмні продукти. Комп'ютер інструктора підключений до інтернету. Комп'ютеризовані робочі місця операторів (слухачів) і інструкторів об'єднані в єдину інформаційну та керуючу мережу з можливістю передачі управління тренажером в цілому або його локальним об'єктом будь-якому слухачеві (у відповідності з пріоритетом), а також з можливістю вирішувати завдання параметрування, налаштування, візуалізації і т. п.

На створеному в національному університеті «Одеська морська академія» тренажерному комплексі майбутній судновий інженер отримує достатні знання та практичний досвід, які дозволяють йому ефективно реалізовувати необхідні функції управління сучасним судновим обладнанням, його технічної експлуатації,

діагностування та параметризації. Запропонована програма тренажерної підготовки повністю охоплює мінімальні компетенції, знання, розуміння і професіоналізм морського фахівця, [126].

2.5 Математичні моделі автономної електроенергетичної системи з компенсацією реактивної потужності

Дослідження режимів роботи суднової електроенергетичної системи в даній роботі проводилося на розроблених математичних моделях, експериментальних макетах, повномасштабному тренажері та на реальних судових енергетичних установках.

Математична модель суднової електроенергетичної системи включає диференціальні, алгебраїчні та логічні рівняння, що описують фізичні процеси в елементах системи та зв'язки між агрегатами. Модель включає прийняті допущення в математичному описі.

Склад і структура математичної моделі визначається функціональною схемою суднової електроенергетичної системи. Кожному елементу досліджуваної системи відповідає конкретна модель. Зв'язки між елементами моделюються шляхом введення загальних змінних і об'єднання підсистем рівнянь відповідних частин СЕЕС, рис. 2.18, [73, 101, 134, 135, 156, 165, 173, 175, 185].

Ступінь деталізації процесів і рівень припущень визначається завданнями дослідження. Розроблена математична модель електроенергетичної системи включає рівняння і допущення для наступних агрегатів:

- теплоенергетичного приводу генератора змінного струму;
- синхронного або асинхронного генератора;
- регулятора частоти обертання приводного двигуна;



Рис. 2. 18. Структура математичної моделі автономної електроенергетичної системи з компенсацією реактивної потужності

- регулятора збудження синхронного або асинхронного генератора;
- двигунного, активного і реактивного навантаження електроагрегата;
- пристроїв комутації та розподілу навантаження;
- технологічних зв'язків між агрегатами.

Розглянемо комп'ютерні математичні моделі підсистем електроенергетичного комплексу, які складені для вирішення конкретних задач дисертаційної роботи.

2.5.1 Моделювання приводного двигуна електроенергетичної установки з регулятором частоти обертання

Допоміжні двигуни суднових дизель-генераторів мають потужність трохи більшу номінальної потужності генератора. Частота їх обертання змінюється у відповідності з навантажувальними характеристиками, тобто залежить від зміни навантаження генератора. Тому до складу моделі дизель-генератора повинні входити рівняння двигуна.

Без урахування теплових процесів в циліндрах дизеля його рівняння представлено диференціальним рівнянням першого порядку [10, 105]:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = M_d - M_c; M_c = \operatorname{Re}(\overline{\Psi}_s) \cdot \operatorname{Im}(\overline{I}_s) - \operatorname{Im}(\overline{\Psi}_s) \cdot \operatorname{Re}(\overline{I}_s),$$

де ω_r – частота обертання дизель-генератора; J – момент інерції валу двигуна, ротора генератора і приєднаних мас, $M_d = f(\omega_r, p_1, \dots, p_n, t)$ – механічний момент приводного двигуна; p_i – параметри двигуна; M_c – електромагнітний момент генератора.

При моделюванні процесів в електроустановці у залежності від поставлених завдань ступінь урахування режимних параметрів приводного двигуна можна розділити на чотири рівня, [35, 63, 65-69, 120].

У найпростішому випадку частота приводу генератора приймається постійною величиною. Це можна зробити при моделюванні автономної роботи суднової установки відбору потужності від головного двигуна, коли потужність двигуна значно більше потужності генератора. Для дослідження впливу частоти обертання на інші параметри електроустановки її величину необхідно задавати у вигляді аналітичної функції.

На другому рівні деталізації двигуна момент можна задавати у відповідності з його навантажувальною характеристикою: $M_d = (\omega_0 - \omega_d)/\delta$, де ω_0 – частота обертання холостого ходу; δ – нерівномірність частотної регулювальної характеристики. Такий опис приводу можна використовувати при дослідженні електромагнітних перехідних процесів в колах навантаження та при вивченні систем збудження генераторів, [52].

На третьому рівні момент приводу розглядається як функція частоти і переміщення паливної рейки, що змінює витрату палива $M_d = f(\omega_d, h, t)$. У цьому випадку до рівнянь руху приводу необхідно додати рівняння регулятора частоти обертання двигуна.

У моделі четвертого рівня деталізації [120] враховуються теплоенергетичні процеси, рушійний момент розглядається як функція робочого тиску в циліндрах, описуються робочі процеси в циліндрах дизеля, процеси в газовому тракті, в газовій турбіні турбонагнітача і інших елементах дизеля. На такій моделі можна розраховувати вплив електромеханічних процесів в генераторі на приводний двигун,

враховувати конструктивні особливості дизеля і процеси згоряння палива в циліндрах.

2.5.2 Моделювання суднових генераторів змінного струму

В суднових електроенергетичних установках застосовуються багатогенераторні системи вироблення та розподілу електроенергії. При цьому до складу енергетичного комплексу можуть входити дизель-генератори, валогенератори і турбогенератори з генераторами змінного струму різного типу. Ці генератори відрізняються конструкцією ротора, тому вивчення суднових систем енергопостачання передбачає розробку моделей генераторів з різними конструкціями роторів.

Розглянемо саму загальну модель генератора змінного струму, що дозволяє вибрати тип генератора шляхом задання параметрів рівнянь без зміни їх виду.

В роботі аналізується модель узагальненої ідеалізованої електричної машини, що описується рівняннями Парка-Горєва, яка традиційно використовується в більшості робіт, присвячених моделюванню процесів в електричних генераторах, [28, 82, 92-96, 159, 168].

В ідеалізованій електричній машині прийняті наступні допущення[99]:

- параметри обмоток симетричні щодо перпендикулярних осей;
- машина має гладкий повітряний зазор і синусний розподіл обмоток;
- вихрові струми і втрати в магнітних колах відсутні;
- насичення основного магнітного потоку і потоку розсіювання взаємно незалежні;
- відсутнє явище гістерезису;
- магнітне поле кругове;
- індуктивності розсіювання і активні опори обмоток постійні.

У приведених рівняннях Парка-Горєва для узагальненого електричного генератора напруги, струми та потокозчеплення описуються зображаючими векторами \bar{U} , \bar{I} і $\bar{\Psi}$, що дозволяє отримати векторну форму запису рівнянь Кірхгофа для

статора, ротора і обмотки збудження в системі координат, що обертається відносно статорної обмотки з частотою ω_k :

$$\begin{aligned}\bar{U}_s + r_s \bar{I}_s + (p + j\omega_k) \bar{\Psi}_s &= 0, \\ r_r \bar{I}_r + (p + j\omega_k - j\omega_r) \bar{\Psi}_r &= 0, \\ \bar{U}_f + r_f \bar{I}_f + (p + j\omega_k - j\omega_r) \bar{\Psi}_f &= 0,\end{aligned}$$

тут r_s, r_r, r_f – відповідно опори статора, короткозамкненої обмотки ротора і обмотки збудження.

Для опису узагальненої електричної машини використовуються декілька систем координат, [28]. Вибір системи координат визначає вид рівнянь і дозволяє досліджувати процеси в генераторах з різними типами роторів.

Для опису огинаючих кривих напруги та струму в генераторі використовують систему координат (u, v) , нерухому відносно поля і яка обертається відносно статора з синхронною швидкістю $\omega_k = \omega_s$. В цій системі координат в сталому режимі вектори напруги \bar{U}_s і струму \bar{I}_s нерухомі.

Для моделювання явнополюсного синхронного генератора, який має несиметричний ротор, застосовують систему координат (d, q) , що пов'язана з ротором, тобто обертається зі швидкістю ротора $\omega_k = \omega_r$. Ця система координат може застосовуватись для моделювання синхронного генератора з демпферною обмоткою на роторі і без неї.

Нерухома відносно статора система координат ($\omega_k = 0$) використана при розрахунках миттєвих значень статорних напруги і струмів. При симетричному навантаженні простіше користуватися ортогональною системою координат (α, β) . Вісь α в цій системі збігається з електричною віссю фази A генератору, тому проекції векторів напруги і струму на вісь α збігаються з їх миттєвими фазними значеннями.

Для несиметричного по фазах навантаження скористаємося нерухомою відносно статора системою координат (a, b, c) , осі якої збігаються з фазними осями.

При вирішенні конкретних задач моделювання виникає необхідність в одній програмі використовувати декілька систем координат.

Так, при моделюванні паралельної роботи синхронних генераторів, рівняння кожного з генераторів необхідно записувати в системах координат (d, q) , а рівняння їх зв'язку – в системах (α, β) або (a, b, c) .

Використання в одній математичній моделі кількох систем координат вимагає запису рівнянь зв'язку між змінними, записаними в різних системах.

Характерним випадком являється зв'язок між змінними в навантаженні, рівняння якого записані в системі координат (a, b, c) , та рівняннями електричної машини, записаними в довільній ортогональній системі координат (x, y) , що обертається з частотою ω_k .

Фазні напруги u_a, u_b, u_c визначаються через проєкції зображуючого вектору напруги u_x, u_y в системі координат (x, y) , що обертається з частотою ω_k :

$$\begin{aligned} u_a &= u_x \cos \omega_k t - u_y \sin \omega_k t; \\ u_b &= u_x \cos(\omega_k t - 2\pi/3) - u_y \sin(\omega_k t - 2\pi/3); \\ u_c &= u_x \cos(\omega_k t + 2\pi/3) - u_y \sin(\omega_k t + 2\pi/3). \end{aligned}$$

З опису фізичних процесів у кожній фазі по відомим напругам u_a, u_b, u_c необхідно визначити фазні струми i_a, i_b, i_c , а потім перейти до проєкцій вектору струму i_x, i_y , які використовуються у рівняннях статорних ланцюгів генератора:

$$\begin{aligned} i_x &= \frac{2}{3} [i_a \cos \omega_k t + i_b \cos(\omega_k t - \frac{2\pi}{3}) + i_c \cos(\omega_k t + \frac{2\pi}{3})]; \\ i_y &= -\frac{2}{3} [i_a \sin \omega_k t + i_b \sin(\omega_k t - \frac{2\pi}{3}) + i_c \sin(\omega_k t + \frac{2\pi}{3})]. \end{aligned}$$

В дисертаційній роботі розглядалась найбільш загальна модель генератора змінного струму, яка розроблена в [35, 120], а саме модель синхронного явнополюсного генератора з демпферною короткозамкненою обмоткою і обмоткою збудження на роторі. Статори та його обмотки у генераторів змінного струму мають однакову конструкцію, а синхронний генератор відрізняється від асинхронного конструкцією ротора, на якому є явнополюсна обмотка збудження.

Тому модельований генератор розглядається як окремий випадок узагальненого генератора, в якості якого обрано саме синхронний явнополюсний генератор з демпферною короткозамкненою обмоткою та обмоткою збудження на роторі.

Неявнополюсний синхронний генератор характеризується рівністю електричних параметрів статора по осях d, q . Синхронний генератор може не мати демпферної обмотки на роторі. У асинхронного генератора є короткозамкнена обмотка на роторі і відсутня обмотка збудження. Асинхронизований генератор з фазним ротором має однакові параметри ротора по осях d, q , і не має короткозамкненої обмотки.

Для складання моделі узагальненого генератора використана система координат (d, q) . Записуємо рівняння статора і ротора в формі Коші відносно похідних потокозчеплення, [95]:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_{sd}}{d\tau} &= \Psi_{sq}\omega_r - r_s i_{sd} - u_{sd}; & \frac{d\Psi_{sq}}{d\tau} &= \Psi_{sd}\omega_r - r_s i_{sq} - u_{sq}; \\ \frac{d\Psi_{rd}}{d\tau} &= -r_r i_{rd}; & \frac{d\Psi_{rq}}{d\tau} &= -r_r i_{rq}; & \frac{d\Psi_f}{d\tau} &= u_f - r_f i_f, \end{aligned} \quad (2.1)$$

де $\Psi_{sd}, \Psi_{sq}, \Psi_{rd}, \Psi_{rq}$ – проекції потокозчеплення на осі d, q ; u_{sd}, u_{sq} – проекції напруги; r_s, r_r, r_f – опори статора, ротора та обмотки збудження; $i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}$ – проекції струму; Ψ_f, i_f, u_f – потокозчеплення, струм і напруга обмотки збудження; τ – час.

Потокозчеплення в рівняннях (2.1) виразимо через струми:

$$\begin{aligned} \Psi_{sd} &= (L_d + L_{sd})i_{sd} + L_d i_{rd} + L_d i_f; \\ \Psi_{rd} &= (L_d + L_{rd})i_{rd} + L_d i_{sd} + L_d i_f; \\ \Psi_f &= L_d i_{sd} + L_d i_{rd} + L_f i_f; \\ \Psi_{sq} &= (L_q + L_{sq})i_{sq} + L_q i_{rq}; \\ \Psi_{rq} &= (L_q + L_{rq})i_{rq} + L_q i_{sq}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

де $L_{sd}, L_{sq}, L_{rd}, L_{rq}, L_d, L_q$ – індуктивності розсіювання та контуру намагнічування статорних і роторних обмоток; L_f – індуктивність обмотки збудження.

Введемо позначення відносних індуктивностей і коефіцієнта симетрії ротора, [35]:

$$l_{rd} = \frac{L_d}{L_d + L_{rd}}; l_{rq} = \frac{L_q}{L_q + L_{rq}}; l_{sd} = \frac{L_d + L_{sd}}{L_d}; l_{sq} = \frac{L_q + L_{sq}}{L_q}; l_f = \frac{L_d}{L_f}; \quad k_c = \frac{L_q}{L_d}.$$

Виразимо струми генератора через потокозчеплення, використовуючи введені позначення:

$$\begin{aligned}
 i_{sd} &= \frac{1}{\Delta_d} [\psi_{sd}(1 - l_f l_{rd}) + \psi_{rd} l_{rd} (l_f - 1) + \psi_f l_f (l_{rd} - 1)]; \\
 i_{rd} &= \frac{l_{rd}}{\Delta_d} [\psi_{sd} (l_f - 1) + \psi_{rd} (l_{sd} - l_f) + \psi_f l_f (1 - l_{sd})]; \\
 i_f &= \frac{l_f}{\Delta_d} [\psi_{sd} (l_{rd} - 1) + \psi_{rd} (1 - l_{sd}) + \psi_f (l_{sd} - l_{rd})]; \\
 i_{sq} &= \frac{1}{\Delta_q} (\psi_{sq} - \psi_{rq} l_{rq}); \quad i_{rq} = \frac{l_{rq}}{\Delta_q} (-\psi_{sq} + \psi_{rq} l_{sq}); \\
 \Delta_d &= L_d [l_{sd} (1 - l_{rd} l_f) + 2l_{rd} l_f - l_{rd} - l_f]; \quad \Delta_q = k_c L_d [l_{sq} - l_{rq}].
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

Відсутність обмоток на роторі генератора можна задати вибором значень відносних індуктивностей і опорів, [35].

Наприклад, для асинхронного генератора з симетричним короткозамкненим ротором, параметри рівнянь (2.1) і (2.3) дорівнюють:

$$l_f = 0, r_f = \infty, l_{rd} = l_{rq} \neq 0, k_c = 1. \tag{2.4}$$

Для явнополюсного синхронного генератора без демпферної обмотки:

$$l_{rd} = l_{rq} = 0, r_r = \infty, k_c \neq 1; \tag{2.5}$$

При дослідженні генераторних установок виникає необхідність розраховувати насичення їх магнітного кола. Зміна провідності за шляхом магнітного потоку проявляється як непостійність індуктивності обмоток статора і ротора [95].

Для експлуатаційних режимів синхронного генератора поблизу номінальної напруги індуктивність основного контуру намагнічування може бути прийнята сталою, але явище насичення необхідно враховувати при моделюванні процесів перевантаження, перезбудження і аварійних режимів, при складанні точних моделей судових допоміжних установок з синхронними генераторами.

У рівняннях асинхронного генератора насичення повинно моделюватися, тому що параметри процесу конденсаторного самозбудження визначаються видом нелінійності основного контуру намагнічування, [110-113]. Для задання

апроксимуючої функції при моделюванні використовуються показові, гіперболічні функції, степеневі поліноми, графічне і табличне представлення характеристики намагнічування, [52].

У цьому дослідженні використана апроксимація кривої намагнічування функцією Ланжевена, яка запропонована в роботах [35, 52, 112].

Функція Ланжевена отримана [141, 162] на підставі опису процесів намагнічування феромагнітного матеріалу, як взаємозалежної прояви спонтанного намагнічування атомів всередині доменів і орієнтації сумарних моментів доменів відносно зовнішнього поля. У цьому випадку намагнічування феромагнітного матеріалу I_0 пов'язано з напруженістю магнітного поля H функцією Ланжевена, рис. 2.19:

$$I_0 = \coth(\gamma H) - \frac{1}{\gamma H}.$$

В електричних ланцюгах струм намагнічування I_μ пропорційний напруженості магнітного поля H , а електрорушійна сила E і потокозчеплення Ψ - пропорційні магнітній індукції B і намагнічуванню I_0 . Тому нелінійна характеристика намагнічування електричної машини може бути апроксимована функцією Ланжевена:

$$m_e E = m_\Psi \Psi = \coth(m_i I_\mu) - \frac{1}{m_i I_\mu}, \quad (2.6)$$

де m_e, m_Ψ, m_i - масштабуючі коефіцієнти, що залежать від параметрів магнітопроводу, обмоток генератора і частоти струму.

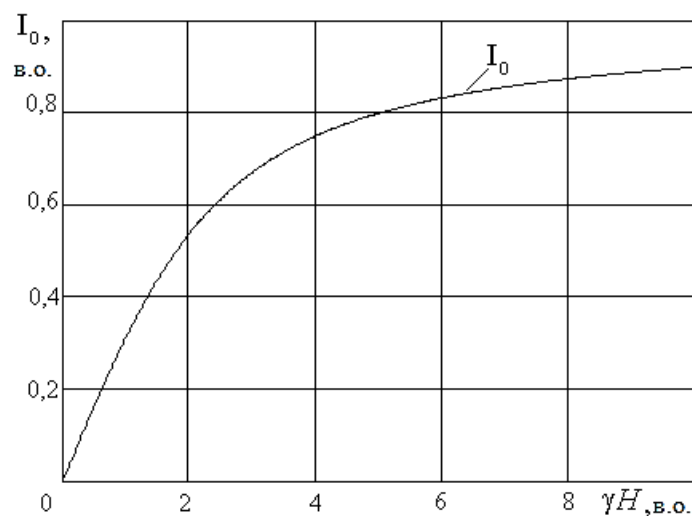


Рис. 2.19. Апроксимація кривої намагнічування електричної машини функцією Ланжевена

Апроксимація кривої намагнічування функцією Ланжевена у всьому діапазоні зміни струму намагнічування дозволяє моделювати процеси самозбудження, форсування збудження і перенапруги в генераторах. За результатами дослідження [35, 52] похибка апроксимації характеристик намагнічування асинхронних та синхронних генераторів не перевищує 2%.

2.5.3 Моделювання електричного навантаження суднової генераторної установки

Основним навантаженням суднової електроенергетичної системи являються електроприводи суднових механізмів, а також статичне і тиристорно-випрямне навантаження.

Для симетричного активного, індуктивного та ємнісного навантаження операторне рівняння зв'язку векторів статорного струму та напруги у системі координат, що обертається з постійною частотою ω_k запишемо у вигляді:

$$\bar{\mathbf{I}}_s = \left[g + \frac{1}{(p + j\omega_k)L} + (p + j\omega_k)C \right] \bar{\mathbf{U}}_s, \quad (2.7)$$

де g, L, C – відповідно провідність, індуктивність і ємність навантаження.

Представимо проекції векторів напруги і струму в системі координат (α, β) у часовій області, які відповідають рівнянню (2.7), системою диференціальних рівнянь у формі Коші:

$$\begin{aligned} \frac{du_\alpha}{d\tau} &= \frac{1}{C}(i_\alpha - i_{L\alpha} - gu_\alpha); & \frac{du_\beta}{d\tau} &= \frac{1}{C}(i_\beta - i_{L\beta} - gu_\beta); \\ \frac{di_{L\alpha}}{d\tau} &= \frac{u_\alpha}{L}; & \frac{di_{L\beta}}{d\tau} &= \frac{u_\beta}{L}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Якщо рівняння кіл генератора та навантаження записані у різних системах координат, то в моделі їх пов'язують тригонометричними рівняннями перетворення координат:

$$\begin{aligned} u_x &= u_\alpha \cos \gamma + u_\beta \sin \gamma; & i_\alpha &= i_x \cos \gamma - i_y \sin \gamma; \\ u_y &= -u_\alpha \sin \gamma + u_\beta \cos \gamma, & i_\beta &= i_x \sin \gamma + i_y \cos \gamma; \end{aligned} \quad (2.9)$$

де $\gamma = \omega_k \tau + \theta$, ω_k – відносна частота обертання координат (x, y) і (α, β) , θ – початковий кут між осями x і α .

Для багатогенераторних СЕЕС характерною є паралельна робота генераторів коли зв'язок між ними проявляється через навантаження. При спільній роботі n генераторних установок (кожен із генераторів моделюється у власній системі координат) струм навантаження дорівнює сумі струмів генераторів:

$$i_\alpha = \sum_{i=1}^n i_{\alpha i}; \quad i_\beta = \sum_{i=1}^n i_{\beta i}$$

При несиметричному навантаженні генераторів, яке характерне при використанні випрямлячів або тиристорних перетворювачів, а також при обриві фази, доцільно скористатися системою рівнянь, що записується відносно похідних фазних струмів і напруг:

$$\begin{aligned} \frac{di_{La}}{d\tau} &= u_a / L_a; & \frac{du_a}{d\tau} &= (i_a - i_{La} - g_a u_a) / C_a; \\ \frac{di_{Lb}}{d\tau} &= u_b / L_b; & \frac{du_b}{d\tau} &= (i_b - i_{Lb} - g_b u_b) / C_b; \\ \frac{di_{Lc}}{d\tau} &= u_c / L_c; & \frac{du_c}{d\tau} &= (i_c - i_{Lc} - g_c u_c) / C_c. \end{aligned} \quad (2.10)$$

2.5.4 Моделювання систем збудження суднових синхронних і асинхронних генераторів

Розглянемо системи збудження автономних генераторів: в колі статорної обмотки та обмотці збудження. Перша система застосовується для конденсаторного збудження асинхронних генераторів, а також в системах компенсації реактивного навантаження. Друга система - в синхронних генераторах, які мають збудження.

Статорне збудження та регулювання напруги асинхронних генераторів досягається за рахунок зміни ємності навантаження. Ємність підключених конденсаторів C в рівняннях навантаження (2.7) розглядається як керуюча змінна.

В сучасних регуляторах процес включення конденсаторів виконується без перезаряду [53]. Ємності конденсаторів C змінюються у синхронізовані моменти

комутації тиристорного ключа, які не збігаються за фазами. Процес перемикання у всіх фазах займає деякий час, в який ємнісне навантаження несиметричне. Тому при моделюванні конденсаторних систем збудження потрібно користуватися рівняннями генератора і навантаження, що записані відносно фазних значень змінних. Якщо знехтувати процесом фазної комутації конденсаторів, то рівняння можна записувати в ортогональних осях, що спрощує програму розрахунків.

Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними показує, що періодом фазної комутації конденсаторів у більшості випадків можна знехтувати. Система конденсаторного збудження виконує закон управління ємністю в певні моменти часу. Між змінами ємність можна вважати постійною. Тому в загальному випадку система регулювання збудження асинхронного генератора може розглядатися як лінійно-імпульсна.

У запропонованих системах керування асинхронним генератором [23, 57] використовується лінійно-імпульсний закон управління, що складає з ваговими коефіцієнтами поточне $u^*(t)$ та попереднє $u^*(t - T_0)$ значення управління і попереднє значення регульованої величини $C^*(t - T_0)$:

$$\begin{aligned} C^*(t) &= k_1 u^*(t) + k_2 u^*(t - T_0) + k_3 C^*(t - T_0), \\ u^*(t) &= U_r^*(t) - U_{\text{зад}}, \end{aligned} \quad (2.11)$$

де k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти регулятора напруги.

В роботах [35, 59] розроблений і випробуваний імпульсний регулятор напруги асинхронного генератора постійної швидкості. Алгоритм зміни ємності представлений системою умов таким чином:

$$C(t + T_0) = \begin{cases} C_{\text{max}}, \text{ при } U_{\text{ген}} \leq U_{\text{min}f}; \\ C(t) + \Delta C, \text{ при } U_{\text{min}f} < U_{\text{ген}} \leq U_{\text{min}}; \\ C(t), \text{ при } U_{\text{min}} < U_{\text{ген}} \leq U_{\text{max}}; \\ C(t) - \Delta C, \text{ при } U_{\text{max}} < U_{\text{ген}} \leq U_{\text{max}f}; \\ C_{\text{min}}, \text{ при } U_{\text{max}f} < U_{\text{ген}}, \end{cases} \quad (2.12)$$

де $C_{\text{min}}, C_{\text{max}}$ – мінімальна і максимальна ємність збудження, ΔC – комутувана ємність.

Якщо напруга генератора знаходиться в допустимій зоні $U_{min} < U_{ген} \leq U_{max}$, то ємність збудження не змінюється. При виході з цієї «вузької» зони в кожен період комутації T_0 ємність змінюється на величину ΔC . Збільшення або зменшення ємності залежить від знаку відхилення напруги. Якщо напруга виходить з «широкої» зони, то виконується форсування (дефорсування) збудження, тобто ємність приймає максимальне або мінімальне значення. «Вузькі» і «широкі» зони встановлюються у відповідності з вимогами до відхилення напруги асинхронного генератора в сталому і в динамічному режимі.

Експериментальна осцилограма комутації навантаження в асинхронному генераторі з описаним регулятором наведена на рис. 2.10.

Напруга генератора $U_{ген}$ надходить від цифрового датчика напруги один раз за період комутації конденсаторів T_0 , вихідний сигнал якого дорівнює середньому значенню напруги за період комутації T_0 :

$$U_{ген} = U_{дат} = \frac{\Delta t}{T_0} \sum_{i=1}^{T_0/\Delta t} \sqrt{u_{\alpha i}^2 + u_{\beta i}^2}. \quad (2.13)$$

Тут Δt – період вимірювання або крок розрахунку комп'ютерної моделі.

Синхронний генератор безщіткового виконання одержує напругу збудження U_f від збудника, інерційність якого визначається сталою часу T_b [136].

Збудник і пропорційний регулятор напруги синхронного генератора описується диференціальним рівнянням першого порядку:

$$\frac{dU_f}{dt} = [-U_f + K_f(U_{зад} - U_{ген})]/T_b, \quad (2.14)$$

де K_f – коефіцієнт передачі пропорційного регулятора; $U_{ген} = \sqrt{u_{sd}^2 + u_{sg}^2}$ – модуль вектору напруги; $U_{зад}$ – задання регулятору напруги.

У математичній моделі синхронного генератора введемо обмеження напруги збудження $U_{f min} \leq U_f \leq U_{f max}$. Верхнє обмеження збудження $U_{f max}$ визначає форсувальні можливості системи регулювання. Величина $U_{f max}$ залежить від потужності збудника. Величина $U_{f max}$ становить 1.1...2.5 номінального значення

напруги. Нижнє обмеження напруги збудження $U_{f \min}$ встановлюється для утворення магнітного потоку, що створює мінімальний необхідний синхронізуючий момент генератора при паралельній роботі.

2.6 Висновки до розділу 2.

1. Основними методами дослідження в роботі прийняті методи математичного моделювання суднової електроенергетичної системи, методи теорії автоматичного керування, а також фізичне вивчення досліджуваних процесів та режимів роботи СЕЕС на розроблених математичних моделях, експериментальних макетах, повномасштабному тренажері та на реальних судових енергетичних установках.

2. Експериментальні дані, які отримані на діючих макетах дозволили розробити адекватні математичні моделі типових режимів роботи автономних електроенергетичних установок з керуванням реактивною потужністю, [121], а також створити тренажерний комплекс сучасної автоматизованої суднової електроенергетичної системи, [125, 127, 129, 130, 225].

3. Досвід експериментальних досліджень на створеному в національному університеті «Одеська морська академія» тренажерному комплексі дає можливість майбутньому судовому інженерові отримати достатні знання та практичні навички, які дозволяють йому ефективно реалізовувати необхідні функції управління сучасним судовим обладнанням, його технічної експлуатації, діагностування та параметризації. Запропонована програма тренажерної підготовки [126] повністю охоплює мінімальні компетенції, знання, розуміння і професіоналізм морського фахівця.

4. Комплексні дослідження на експериментальних макетах і розроблених математичних моделях, повномасштабному тренажері та реальних енергетичних установках дозволили отримати нові науково-технічні рішення в керуванні реактивною потужністю судових електроенергетичних систем [46, 52-54, 56, 132, 133, 137-139].

3. ВИМІРЮВАННЯ ВЕЛИЧИН, ЩО ХАРАКТЕРИЗУЮТЬ РЕАКТИВНУ ПОТУЖНІСТЬ В НАВАНТАЖЕННІ

При проектуванні УКРП необхідно вибрати фізичну величину, яка буде характеризувати реактивну потужність в навантаженні. Цей вибір визначає технічну реалізацію чутливих елементів в давачах, які будуть використані в системі регулювання реактивної потужності. У перехідних процесах при зміні навантаження величини, що характеризують реактивну потужність змінюються у відповідності з динамічними властивостями енергетичної системи. В цьому розділі виконаємо аналіз цих змін з метою вибору вимірюваної величини, що характеризує реактивну потужність в системі її регулювання.

Розглянемо наступні фізичні величини, що характеризують реактивну потужність в навантаженні:

- реактивну потужність $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$;
- реактивний струм $I_q = I \cdot \sin \varphi$;
- реактивна провідність навантаження $Y = I_q / U = I \sin \varphi / U$;
- кут між векторами напруги U і струму I навантаження φ , який характеризує величину реактивної потужності.

3.1 Динамічна зміна величин, що характеризують реактивну потужність при комутації навантаження

Зміни фізичних величин реактивної потужності в навантаженні залежать від структури та параметрів енергетичної системи, в якій відбуваються зміни режимів роботи. В цьому розділі обмежимося розглядом наступних режимів: ступінчастої комутації активно-індуктивного навантаження і пуску асинхронного двигуна.

Функціональна схема суднової системи, в якій будемо моделювати зміни режимів роботи, наведена на рис. 3.1.

В математичній моделі енергетичної установки (див. розділ 2) описано властивості приводного двигуна, генератора та його навантаження з урахуванням систем стабілізації частоти обертання приводного двигуна, напруги генератора і роботи установки компенсації реактивної потужності.

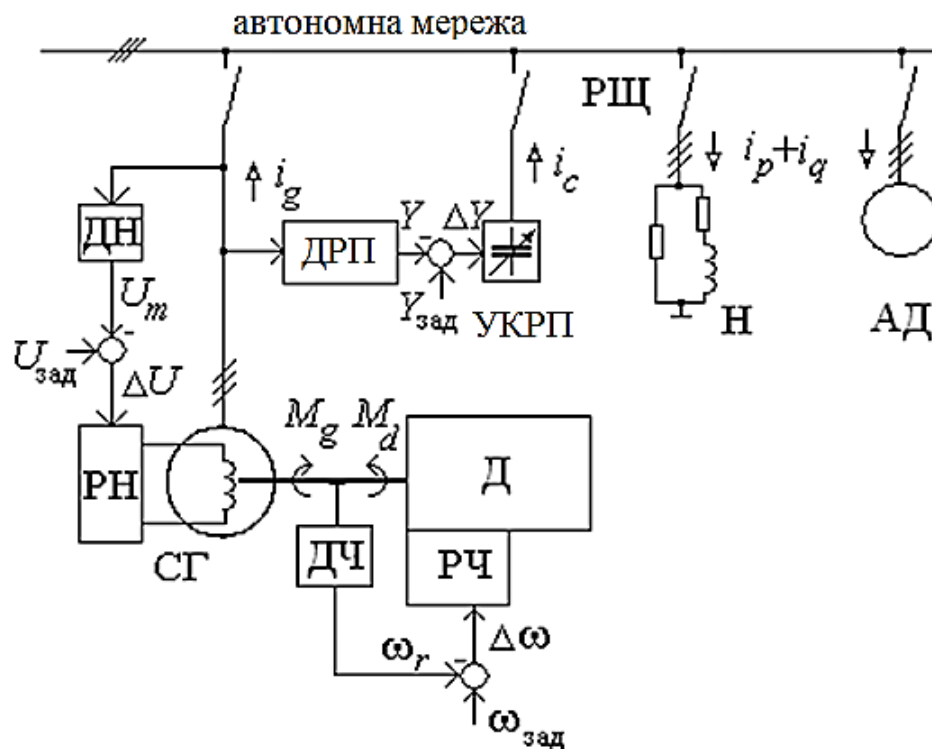


Рис. 3.1. Схема суднової електроенергетичної установки з компенсацією реактивної потужності: Д – приводний двигун; РЧ – регулятор частоти обертання; ДЧ – давач частоти обертання; СГ – синхронний генератор; РН – регулятор напруги зі збудником; ДН – давач напруги; УКРП – установка компенсації реактивної потужності; ДРП – давач реактивної потужності; РЩ – розподільний щит; Н – активно-індуктивне навантаження; АД – асинхронний двигун

Розглянемо спочатку, як змінюються величини реактивної потужності в СЕЕС в режимі комутації активно-індуктивного навантаження. Використовуючи розроблену модель суднового дизель-генератора (рис. 3.1), розраховувались і оцінювались зміни його основних режимних параметрів: модуля вектору напруги генератора U_m , миттєвої напруги фази u_a , активного i_p , реактивного i_q та повного струму i_s , напруги збудження U_f , моментів двигуна M_d і генератора M_g , частоти обертання

ω_r , а також величин реактивної потужності $Q, I_q, Y, \cos \varphi$ при включенні 50 % статичного навантаження, рис. 3.2, рис. 3.3 і рис. 3.4.

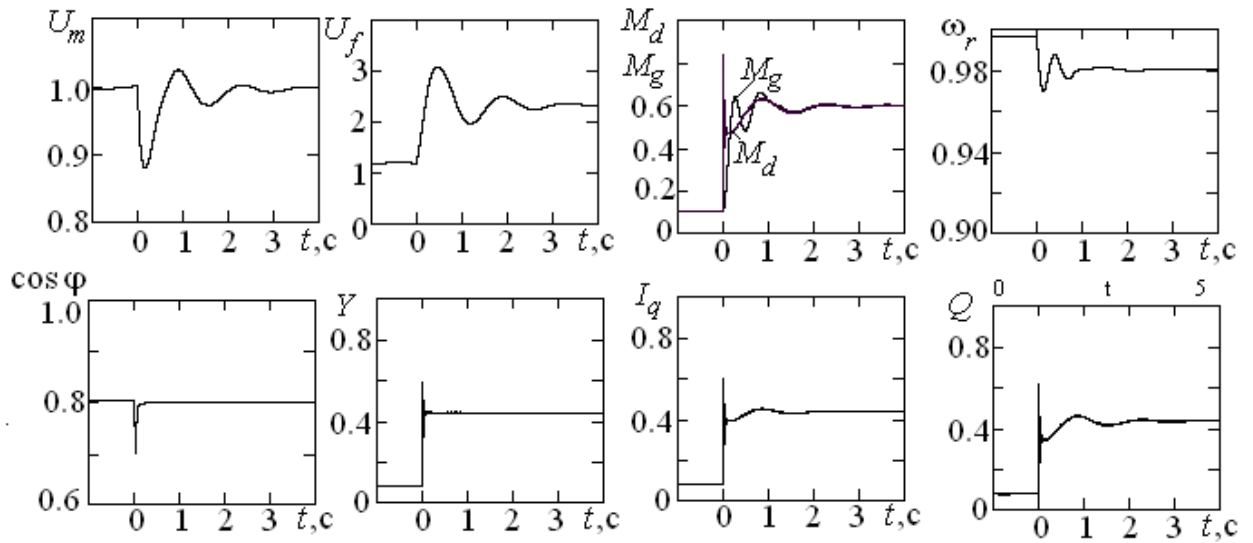


Рис. 3.2. Перехідні процеси в дизель-генераторі при включенні статичного активно-індуктивного навантаження

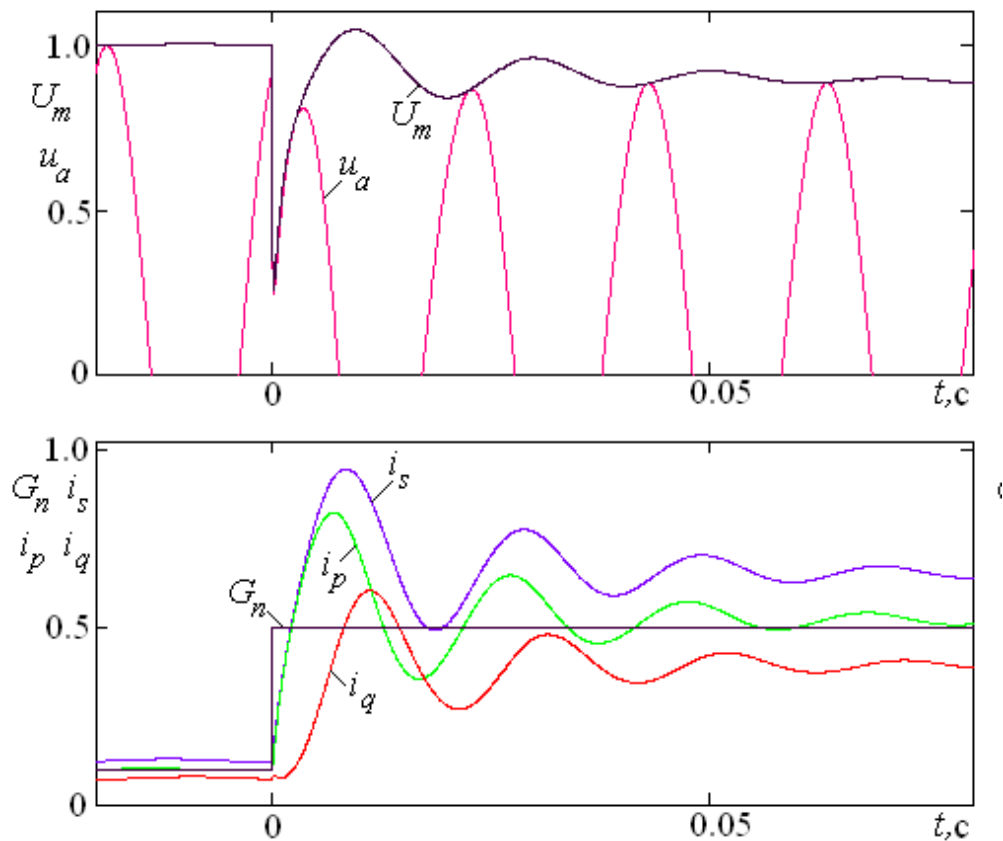


Рис. 3.3. Зміна параметрів електроенергії в навантаженні дизель-генератора на початку перехідного процесу

Включення навантаження призводить до динамічного провалу напруги і частоти дизель-генератора приблизно на 10% і 2% відповідно. В наслідок цього зміна фізичних величин реактивної потужності Q , I_q , Y в навантаженні дизель-генератора при включенні статичного активно-індуктивного навантаження буде відбуватися по-різному, див. рис. 3.4.

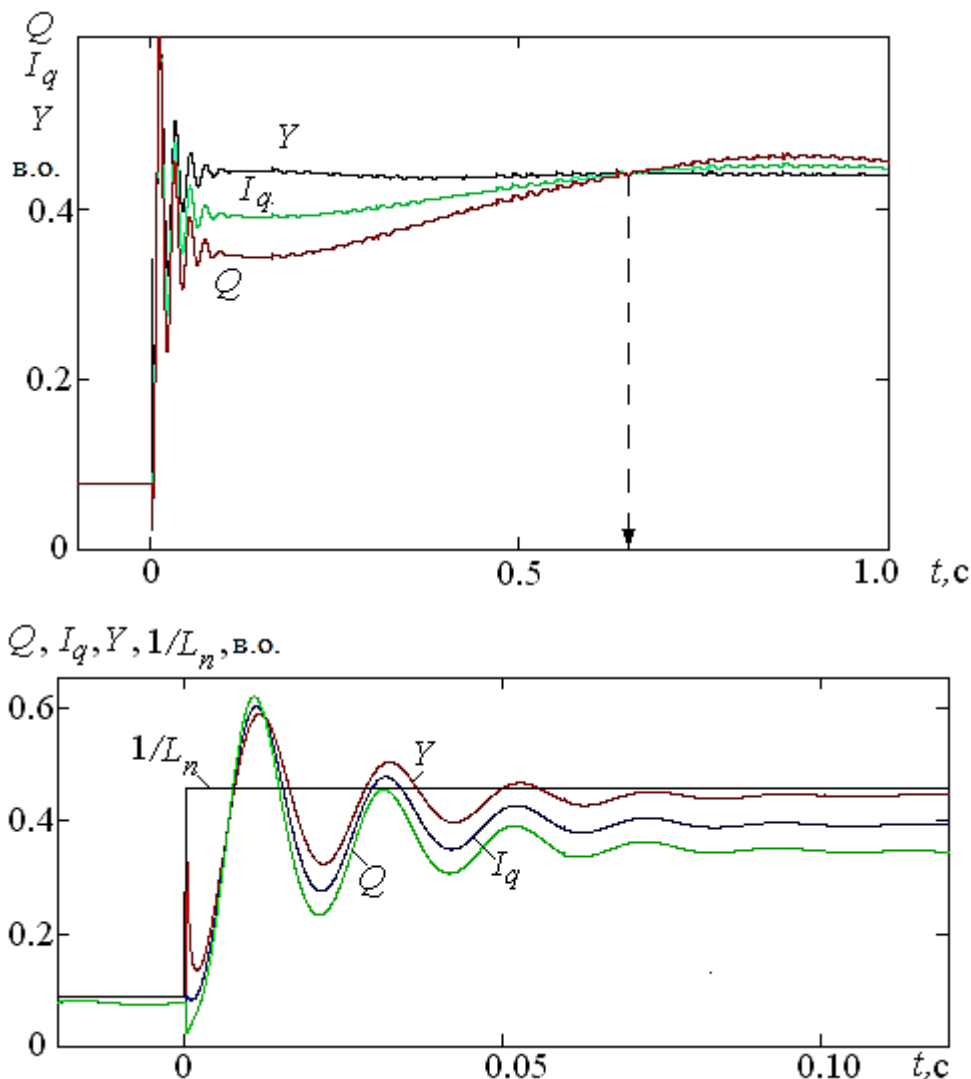


Рис. 3.4. Зміна величин реактивної потужності в навантаженні дизель-генератора при включенні статичного активно-індуктивного навантаження

На початку процесу відбуваються коливання енергії в контурах розсіювання генератора, накладені на більш повільні процеси встановлення значень розглянутих величин: реактивної провідності Y , реактивного струму I_q та реактивної потужності Q . Реактивна провідність Y встановлюється практично відразу, а реактивний

струм I_q і реактивна потужність Q змінюється подібно напрузі генератора, але в різних масштабах. При цьому динамічне відхилення потужності Q вдвічі більше, ніж струму I_q , див. рис. 3.3. Це легко пояснити формулами обчислення реактивного струму, який залежить від напруги і потужності, що визначається добутком напруги генератора та реактивного струму навантаження.

Чисельні характеристики змін величин реактивної потужності в перехідних процесах залежать від властивостей генератора і його системи стабілізації напруги, проте якісні показники зберігаються. На рис. 3.5 наведені процеси зміни величин реактивної потужності при включенні активно-індуктивного навантаження дизель-генератора вдвічі меншої потужності, іншого виробника та з іншими елементами системи стабілізації напруги. Характер процесів та співвідношення їх параметрів зберігається і подібний процесам на рис. 3.4.

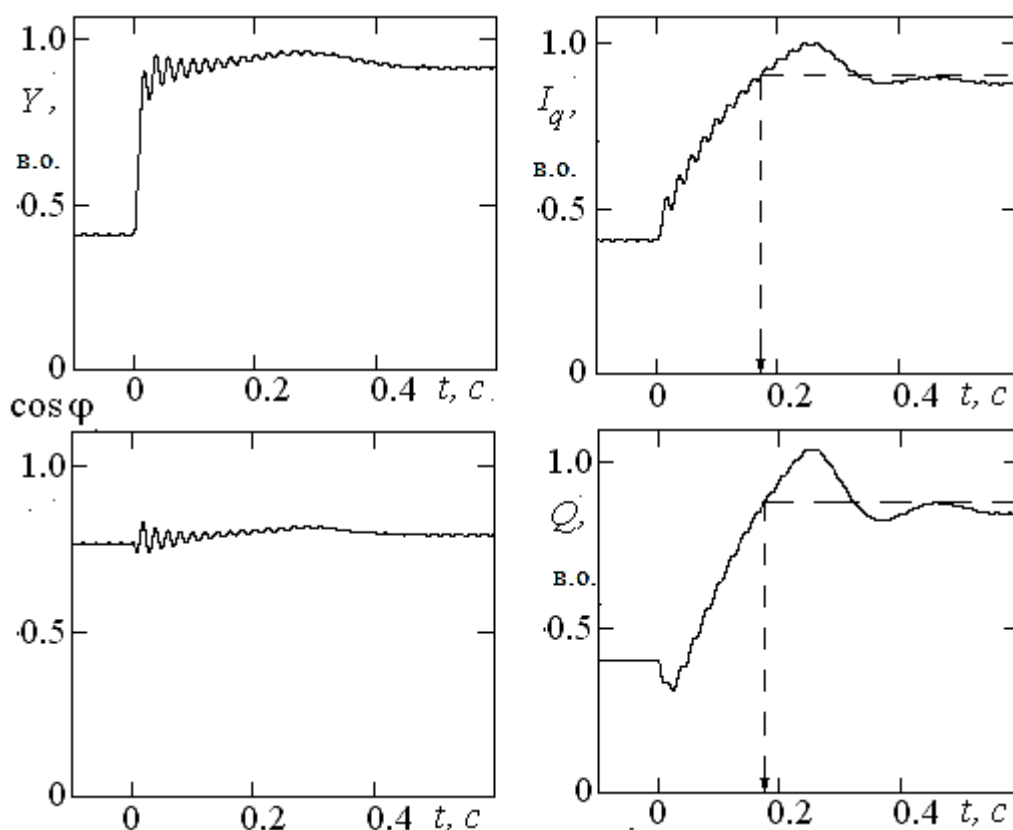


Рис. 3.5. Зміна величин реактивної потужності в навантаженні дизель-генератора при включенні активно-індуктивного навантаження

Аналіз процесів на рис. 3.2 – 3.5 показує, що зміна реактивної провідності Y після загасання коливань в контурах розсіювання генератора визначає фактичну величину навантаження. Динаміка зміни реактивного струму I_q і потужності Q повторює характер зміни напруги, але в різних масштабах (1:2).

Час досягнення встановленого значення величини навантаження залежить від параметрів дизель-генератора та його систем управління, на рис. 3.4 – 0.7 с, а на рис. 3.5 – 0.2 с. Розглянемо процеси зміни величин реактивної потужності Q, I_q, Y спочатку перехідного процесу комутації навантаження, коли затухають процеси розсіювання, рис. 3.5. З аналізу зміни величин реактивної потужності видно, що тільки реактивна провідність $Y = \frac{I_q}{U} = \frac{I \cdot \sin \varphi}{U}$ повторює зміну фактичного реактивного навантаження $1/L_n$ за винятком високочастотних процесів, загасаючих в контурах розсіювання генератора, див. рис. 3.3 – 3.5.

Таким чином, при комутації активно-індуктивного навантаження найбільш відповідною фізичною величиною для використання в системах керування реактивною потужністю в судновій електроенергетичній системі являється реактивна провідність навантаження.

3.2 Зміна фізичних величин реактивної потужності при пуску асинхронного двигуна від суднової електростанції

У режимі пуску асинхронного електродвигуна від мережі суднової електростанції споживається велика кількість реактивної потужності для створення його електромагнітного поля. Цей динамічний режим суттєво відрізняється від включення статичного активно-індуктивного навантаження, який розглянуто у попередньому параграфі.

У цьому параграфі розглянемо ряд фізичних величин в системах компенсації реактивної потужності. До них відноситься реактивна потужність $Q(t)$, реактивний струм $I_q(t)$, реактивна провідність навантаження $Y(t)$ або кут між вектором

напруги і струму $\varphi(t)$, [2, 158, 171]. З'ясуємо, який з цих параметрів може бути використаний в якості вимірюваного в системі компенсації реактивної потужності.

Виконаємо моделювання перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна потужністю 20 % від номінальної потужності синхронного дизель-генератора, рис.3.6 і рис.3.7.

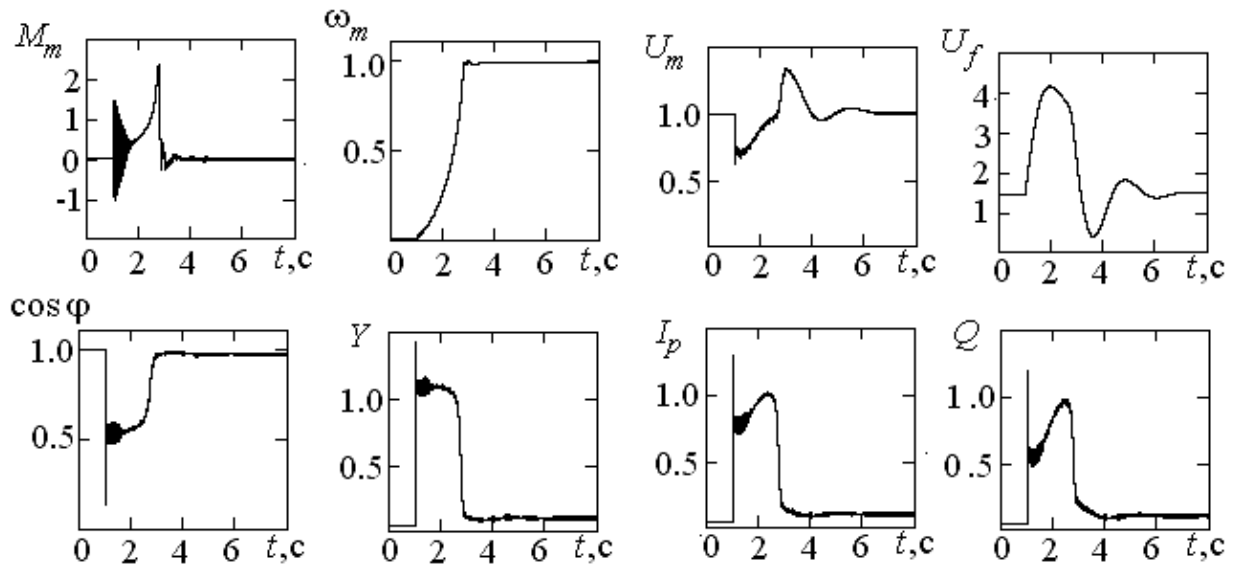


Рис.3.6. Пуск асинхронного двигуна від автономного синхронного дизель-генератора

На цих рисунках наведено зміну моменту $M_m(t)$, частоти обертання ω_m двигуна, що пускається, напруги генератора $U_m(t)$ і напруги на обмотці збудження генератора $U_f(t)$, а також зміну коефіцієнта потужності $\cos \varphi(t)$, реактивної провідності $Y(t)$, реактивного струму $I_q(t)$ та реактивної потужності $Q(t)$ двигуна, що запускається.

Аналіз зміни величин, що характеризують реактивну потужність дозволяє вибрати контрольований параметр в системі динамічної компенсації реактивної потужності суднової енергоустановки в режимі пуску електродвигуна.

У початковий момент пуску коефіцієнт потужності $\cos \varphi(t)$, реактивна провідність $Y(t)$, реактивний струм $I_q(t)$ і реактивна потужність $Q(t)$ асинхронного двигуна змінюються практично миттєво і на час пуску зберігаються на зміненому

рівні. Закінчення процесу пуску супроводжується відновленням величин реактивної потужності, див. рис. 3.6 та 3.7.

Розрахунок реактивної потужності $Q(t)$ в колах змінного струму пов'язаний з визначенням діючих значень напруги $U(t)$, струму $I(t)$ та кута $\varphi(t)$ між векторами напруги і струму: $Q(t) = U(t) \cdot I(t) \cdot \sin \varphi(t)$.

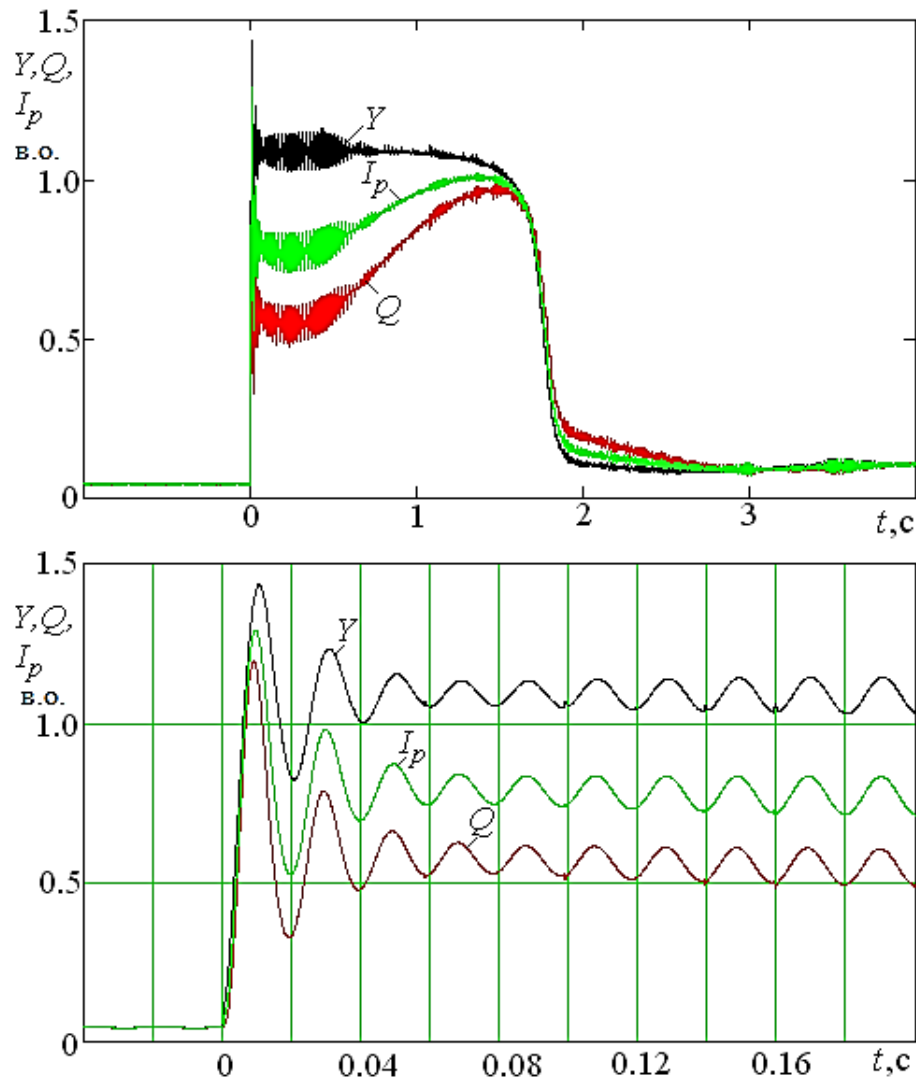


Рис.3.7. Зміна величин реактивної потужності під час пуску асинхронного двигуна від автономного синхронного дизель-генератора

Пуск електродвигуна співвимірної потужності, призводить до динамічного провалу напруги $U(t)$ автономного генератора на початку процесу і відновлення напруги при закінченні пуску.

Динамічне зниження напруги дизель-генератора викликає запізнювання в на-ростанні реактивної потужності $Q(t)$, див. рис. 3.6 рис. 3.7. Характер зміни

величини $Q(t)$ істотно відрізняється від динаміки зміни коефіцієнта потужності $\cos \varphi(t)$. Запізнювання сигналу реактивної потужності $Q(t)$ буде знижувати швидкість системи компенсації реактивної потужності двигуна, який пускається.

В автономній електроенергетичній системі напруга мережі стабілізується, тому величину реактивної потужності можна оцінювати за величиною реактивного струму навантаження $I_q(t)$.

Величина струму залежить від напруги дизель-генератора і реактивної провідності: $I_q(t) = U(t) \cdot Y(t)$, тому характер зміни реактивного струму спочатку пуску також відрізняється від ступеневого. Це запізнювання менше, ніж у сигналу реактивної потужності $Q(t)$, оскільки остання залежить від квадрату напруги $U(t)$ та реактивної провідності навантаження $Y(t)$: $Q(t) = U^2(t) \cdot Y(t)$.

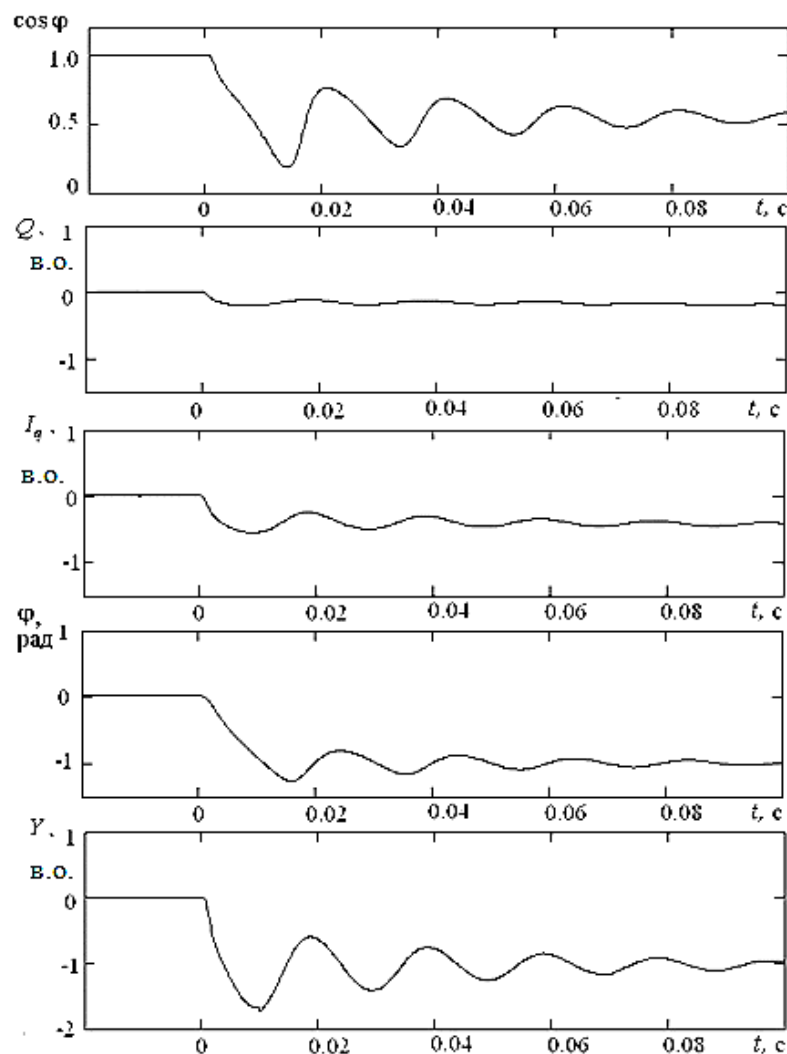


Рис.3.8. Зміна величин реактивної потужності в початковий момент пуску асинхронного двигуна від синхронного дизель-генератора

Характер зміни сигналу коефіцієнта потужності $\cos \varphi(t)$ повторює зміни кута навантаження $\varphi(t)$ і провідності навантаження $Y(t)$, рис. 3.8, рис.3.9.

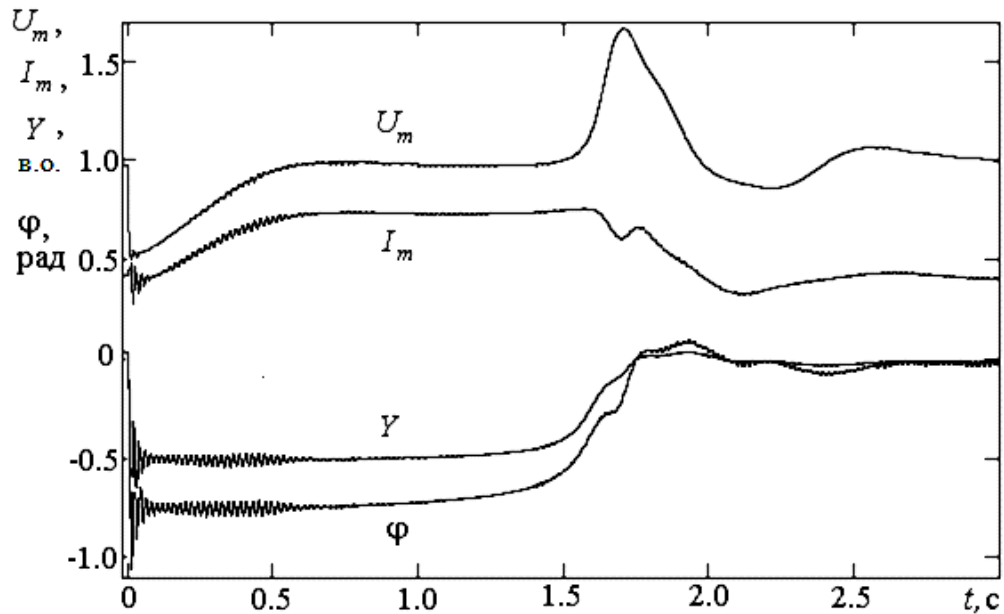


Рис.3.9. Зміна параметрів електроенергії при пуску електродвигуна потужністю 10 % від номінальної потужності генераторного агрегату

Технічно найпростішим є алгоритм обчислення кута $\varphi(t)$ між векторами напруги \bar{U} і струму \bar{I} навантаження.

Істотним недоліком використання кута навантаження $\varphi(t)$ в системах компенсації являється його незалежність від величини потужності навантаження. Цей недолік має істотне значення при роботі суднової мережі при малому завантаженні, т. я. керуючий вплив, сформований за величиною кута навантаження, буде залежати не від величини індуктивності навантаження, а від її коефіцієнта потужності.

Більш складним є алгоритм вимірювання реактивної провідності навантаження:

$$Y(t) = \frac{I_q(t)}{U(t)} = \frac{I(t) \cdot \sin \varphi}{U(t)}$$

Для розрахунку провідності $Y(t)$ потрібно виміряти три змінні: діючі значення напруги генератора $U(t)$ та струму навантаження $I(t)$, а також кут $\varphi(t)$ між векторами напруги і струму.

Незважаючи на труднощі вимірювання та розрахунку індуктивної провідності навантаження Y_l , її величина дозволяє безпосередньо визначити необхідну провідність компенсуючих конденсаторів: $Y_c = Y_l$, яка пропорційна величині ємності C_k : $Y_c = \omega \cdot C_k$.

Використання різних фізичних величин, що характеризують реактивну потужність для автоматизації процесу компенсації реактивного навантаження призводить до різних перехідних процесів при пуску електродвигуна співвимірної потужності.

На розробленій моделі порівняємо процеси пуску електродвигуна з компенсацією реактивної потужності в системах з пропорційними аналоговими регуляторами, в яких компенсуюча ємність $C_k(t)$ пропорційна одній із величин реактивної потужності, рис. 3.10:

$$C_k(t) = K_p \cdot Q(t); C_k(t) = K_p \cdot I_q(t); C_k(t) = K_p \cdot \varphi(t); C_k(t) = K_p \cdot Y(t).$$

Для всіх наведених регуляторів обрано однаковий коефіцієнт підсилення $K_p = 10$.

Як видно з рис.3.10, процеси компенсації коефіцієнта потужності $\cos \varphi(t)$ електродвигуна, що запускається істотно відрізняються. Най тривалішим та коливальним виявився процес компенсації в системі, де вимірюється і регулюється реактивна потужність $Q(t)$. Дещо краще процес регулювання реактивного струму $I_q(t)$.

Використання в якості керованої змінної кута $\varphi(t)$ навантаження або реактивної провідності $Y(t)$ дають приблизно однаковий результат, значно кращий, ніж при використанні реактивної потужності $Q(t)$ або величини реактивного струму $I_q(t)$.

Отже, в системі компенсації реактивної потужності при пуску від синхронного дизель-генератора асинхронного двигуна співвимірної потужності доцільно використовувати в якості вимірювальної та регульованої змінної реактивну провідність навантаження $Y(t)$ [139].

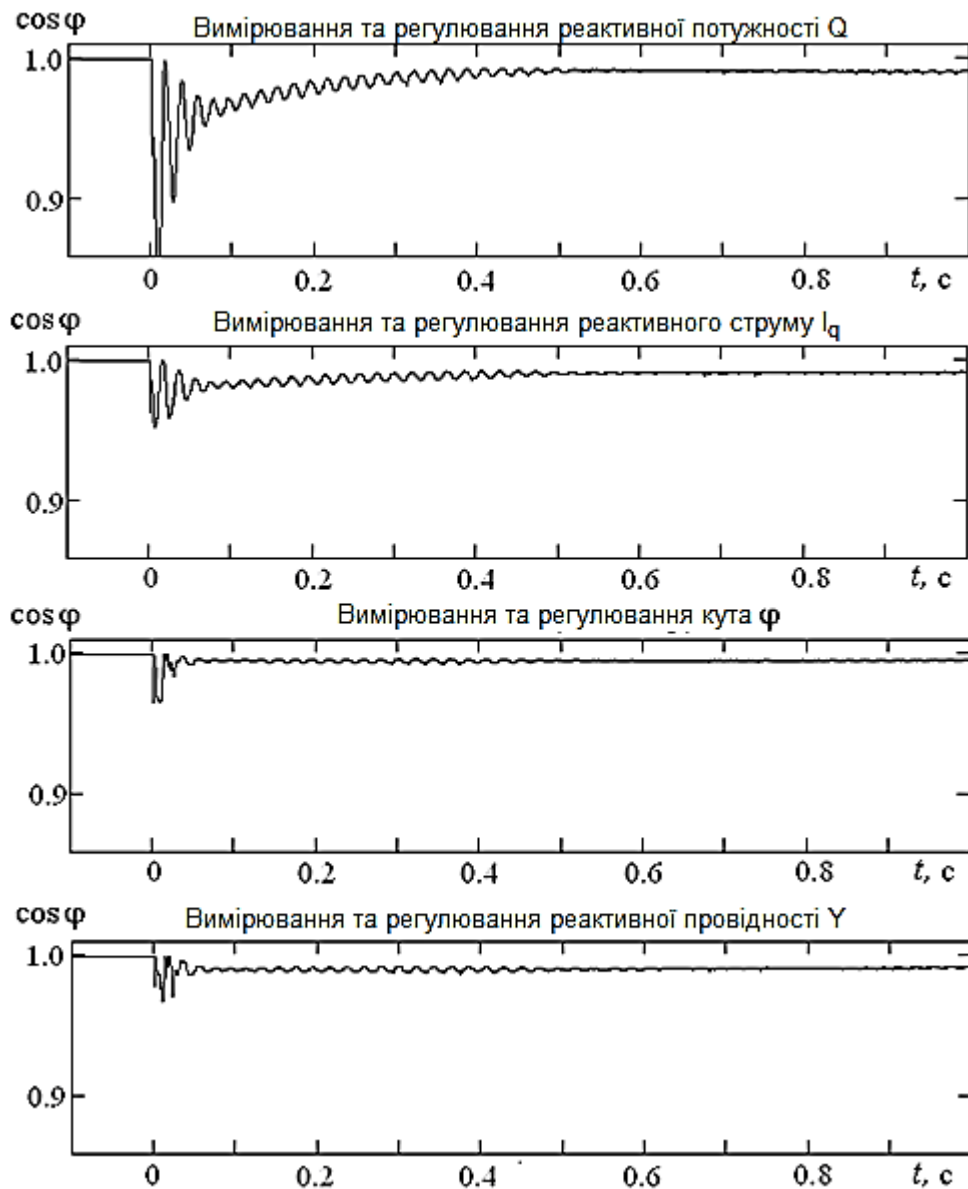


Рис. 3.10. Перехідні процеси в аналогових системах компенсації реактивної потужності при пуску асинхронного двигуна від синхронного дизель-генератора

3.3 Вимірювання реактивної провідності навантаження в колах трифазного змінного струму

Вимірювання та розрахунок реактивної провідності навантаження $Y(t)$ вимагає визначення напруги генератора $U(t)$, струму навантаження $I(t)$ та кута $\varphi(t)$ між векторами напруги \bar{U} і струму \bar{I} .

У трифазній мережі миттєві значення напруги $u(t)$ і струму $i(t)$ в кожній фазі змінюються за гармонійним законом. Узагальнені вектори напруги \bar{U} і струму \bar{I} обертаються з частотою ω відносно нерухомих обмоток статора генератора. Проекції цих векторів на геометричні осі фазних обмоток визначають миттєві значення змінних $u_a(t)$, $u_b(t)$, $u_c(t)$ и $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, [18]:

$$u_a(t) = U_m \sin(\omega t); \quad u_b(t) = U_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right); \quad u_c(t) = U_m \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right);$$

$$i_a(t) = I_m \sin(\omega t); \quad i_b(t) = I_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right); \quad i_c(t) = I_m \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right),$$

де U_m , I_m – модулі узагальнюючих векторів напруги і струму.

У сталому режимі діючі значення змінної напруги $U(t)$ та струму $I(t)$ пропорційні їх амплітудним значенням $U_m(t)$ і $I_m(t)$:

$$U(t) = \frac{U_m(t)}{\sqrt{2}} \quad \text{і} \quad I(t) = \frac{I_m(t)}{\sqrt{2}}.$$

В динаміці величину реактивної провідності в колах навантаження можна обчислювати через довжини векторів (амплітуди) напруги та струму:

$$Y(t) = \frac{I(t) \sin \varphi(t)}{U(t)} = \frac{I_m(t) \sin \varphi(t)}{U_m(t)}.$$

Довжини векторів напруги і струму зручно визначати за їх проекціями на перпендикулярні осі α і β , рис. 3.11:

$$|\bar{U}| = U_m = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \quad \text{и} \quad |\bar{I}| = I_m = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2}.$$

У фізичних колах трифазного струму можна виміряти фазні напруги і струми фаз A , B і C , які можна представити у вигляді проекції векторів на просторові осі трифазних обмоток, які зміщені один відносно одного на 120 градусів. Розглянемо варіанти обчислення проекцій векторів на осі α і β через проекції векторів на фазні осі A , B та C . Як це прийнято, вісь α сумісна з віссю фази A , тобто $u_\alpha = u_a$ і $i_\alpha = i_a$.

Розглянемо три варіанти обчислення проекції векторів на вісь β через дві відомі проекції на фазні осі [121,122].

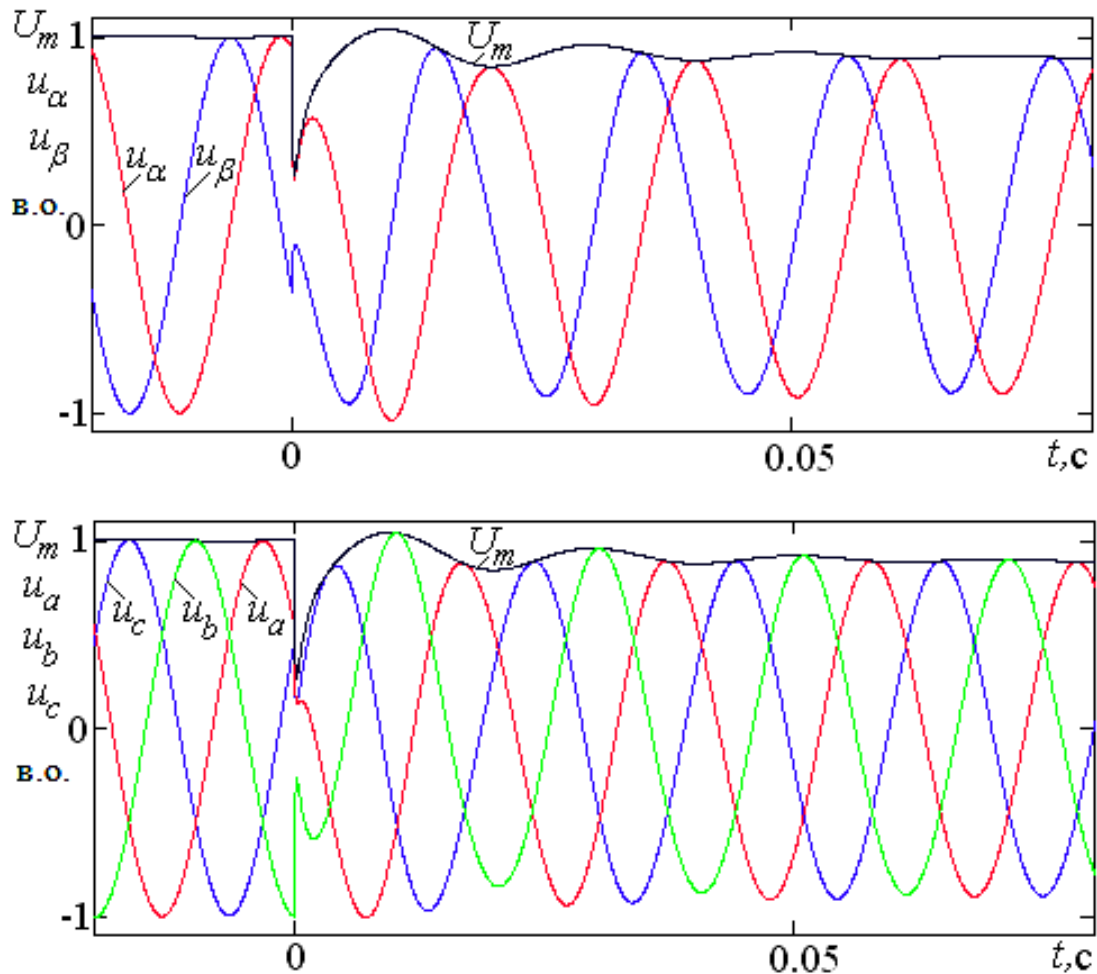


Рис. 3.11. Зв'язок миттєвих і амплітудних значень напруги трифазної системи змінного струму

1. За величинами двох фазних проекцій u_a і u_b визначаємо величину проекції на вісь β , рис. 3.12, а. Використовуючи допоміжні проекції u_1 і u_2 , визначаємо проекцію u_β . З рис. 3.12, а випливають співвідношення:

$$u_\beta = u_1 + u_2 = \frac{u_b}{\cos(\pi/6)} + u_a \operatorname{tg}(\pi/6) = \frac{2u_b}{\sqrt{3}} + \frac{u_a}{\sqrt{3}} = \frac{u_a + 2u_b}{\sqrt{3}}.$$

2. За відомими напругами u_a і u_c визначимо проекцію вектора напруги на вісь β з рис.3.12, б:

$$u_1 = -u_c - u_2; \quad u_\beta = u_1 \cos(\pi/6); \quad u_2 = (u_a - u_\beta \operatorname{tg}(\pi/6)) \sin(\pi/6).$$

$$\text{Звідки знаходимо: } u_\beta = (-u_c - (u_a - u_\beta \operatorname{tg}(\pi/6)) \sin(\pi/6)) \cos(\pi/6).$$

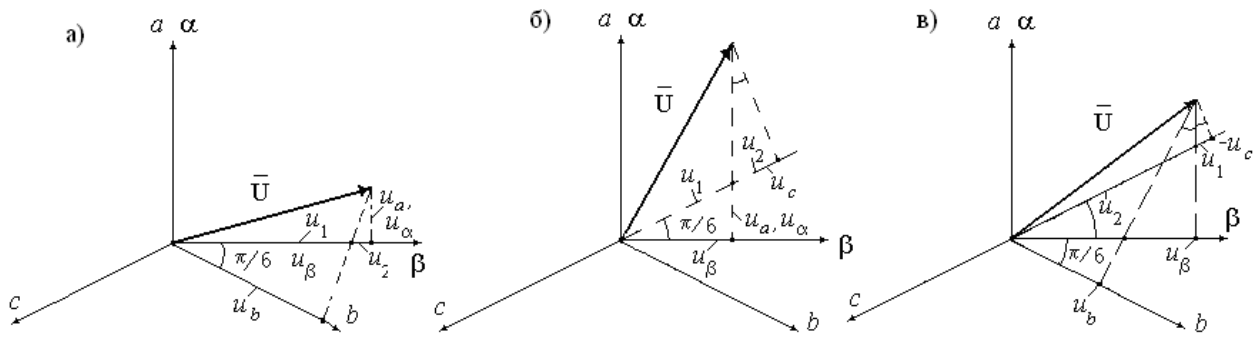


Рис. 3.12. Визначення проекції вектору напруги \bar{U} на вісь β

Підставимо значення тригонометричних функцій аргументу $\pi/6$:

$$u_{\beta} = \left(-u_c - \left(u_a - u_{\beta} \frac{1}{\sqrt{3}}\right) \frac{1}{2}\right) \frac{\sqrt{3}}{2} \quad \text{або} \quad 4u_{\beta} = -2\sqrt{3}u_c - (u_a\sqrt{3} - u_{\beta});$$

$$u_{\beta} = (-2u_c - u_a)/\sqrt{3}; \quad u_{\beta} = -\frac{u_a + 2u_c}{\sqrt{3}}.$$

3. За відомими фазними напругами u_b і u_c визначимо проекцію u_{β} , рис.3.12,

в:

$$u_1 = -u_c - u_2 = -u_c - \frac{u_{\beta}}{\cos(\pi/6)} = -u_c - \frac{2u_{\beta}}{\sqrt{3}};$$

$$u_1 = \left(\left(u_{\beta} - \frac{u_b}{\cos(\pi/6)}\right) \operatorname{ctg}(\pi/6) - u_{\beta} \operatorname{tg}(\pi/6)\right) \sin(\pi/6) =$$

$$= \frac{1}{2} \left(u_{\beta} - \frac{2u_b}{\sqrt{3}}\right) \sqrt{3} - u_{\beta} \frac{1}{2\sqrt{3}} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2\sqrt{3}}\right) u_{\beta} - u_b;$$

$$\text{Звідки знаходимо} \quad \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2\sqrt{3}}\right) u_{\beta} - u_b = -u_c - \frac{2u_{\beta}}{\sqrt{3}};$$

$$u_b - u_c = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} + \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2\sqrt{3}}\right) u_{\beta} = \sqrt{3}u_{\beta} \quad \text{або} \quad u_{\beta} = \frac{u_b - u_c}{\sqrt{3}}.$$

В залежності від двох фазних проекцій напруги проекції вектору напруги на перпендикулярні осі α і β дорівнюють:

$$u_{\alpha} = u_a; \quad u_{\beta} = \frac{u_a + 2u_b}{\sqrt{3}} \quad \text{або} \quad u_{\beta} = -\frac{u_a + 2u_c}{\sqrt{3}} \quad \text{або} \quad u_{\beta} = \frac{u_b - u_c}{\sqrt{3}} = \frac{u_{bc}}{\sqrt{3}}.$$

Аналогічні вирази пов'язують проекції вектору струму \bar{I} на осі α і β з проекціями на осі фаз A , B і C :

$$i_\alpha = i_a; \quad i_\beta = \frac{i_a + 2i_b}{\sqrt{3}} \quad i_\beta = -\frac{i_a + 2i_c}{\sqrt{3}} \quad i_\beta = \frac{i_b - i_c}{\sqrt{3}} = \frac{i_{bc}}{\sqrt{3}}.$$

За проекціями векторів напруги і струму на перпендикулярні осі α і β легко визначити їх амплітудні значення U_m і I_m кут між ними, рис. 3.13:

$$\varphi(t) = \varphi_u(t) - \varphi_i(t) = \arctg\left(\frac{u_\beta}{u_\alpha}\right) - \arctg\left(\frac{i_\beta}{i_\alpha}\right).$$

Отже, поточні значення довжин векторів напруги $U_m(t)$ і струму $I_m(t)$, а також кута $\varphi(t)$ між ними дозволяють розрахувати миттєве значення реактивної провідності кола змінного струму $Y(t)$.

Для цієї мети можливе використання контролера з чотирма аналого-цифровими перетворювачами двох напруг (u_a, u_{bc}) і двох струмів (i_a, i_{bc}), знання яких дозволяє за наведеними вище виразами обчислити поточне значення реактивної провідності $Y(t)$.

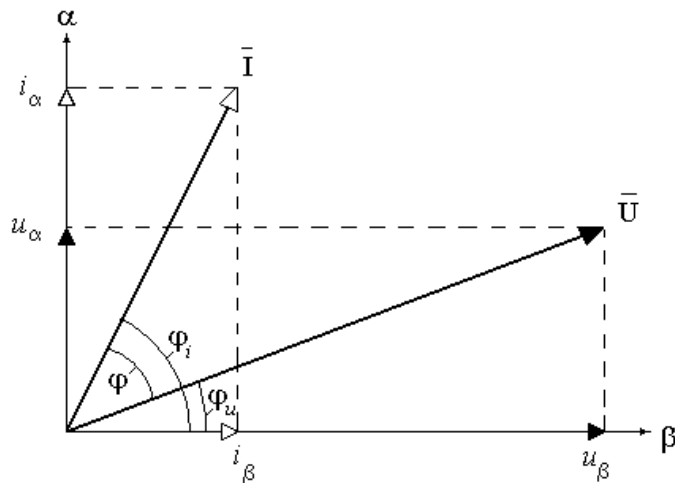


Рис. 3.13. Визначення кута між векторами напруги і струму

Таким чином, для обробки інформації, необхідної для вимірювань, контролю та керування реактивною потужністю в колі трифазного змінного струму можливе використання контролера з чотирма аналого-цифровими перетворювачами двох

напруг і двох струмів, знання яких дозволяє за наведеними вище виразами обчислити поточне значення провідності.

3.4 Фільтрація регульованої координати в системі керування реактивною потужністю

Після ступеневої зміни навантаження в судновій електроенергетичній системі відбуваються перехідні процеси встановлення нових сталих значень параметрів. Протягом двох-п'яти періодів генерованого струму загасають гармонійні коливання по шляху не основного електромагнітного потоку, див. рис.3.4 – 3.5.

При динамічному керуванні реактивною потужністю необхідно мати об'єктивну інформацію про зміну регульованої координати протягом кожного періоду струму T_0 . Якщо регульована координата за період T_0 не досягає усталеного стану, тобто тривають її коливання, то необхідно виконати фільтрацію коливань і виділити або обчислити середнє значення змінної Y_n за період:

$$Y_{dat} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_{ni}$$

При аналоговому вимірюванні регульованої координати фільтр повинен забезпечити придушення її високочастотних коливань на рівні допустимих пульсацій і не затримувати середнє значення вимірюваної змінної більше ніж на період струму T_0 .

Якщо вимірювання регульованої координати виконуються з подальшим аналого-цифровим перетворенням та обробкою в контролері, то доцільно обчислювати середнє значення реактивної потужності за період часу T_0 , попередній за моментом зміни регулюючого впливу – реактивного компенсуючого струму.

На рис. 3.14 показано фактичне Y_n і обчислене середнє значення реактивної провідності Y_{dat} , що актуальне в кінці вимірюваного періоду T_0 і незмінне протягом часу T_0 . З рис. 3.14 видно, що значення реактивної провідності Y_{dat} затримано щодо фактичного значення Y_n на один період часу T_0 .

Технічні можливості сучасної апаратури дозволяють вимірювати параметри електроенергії багато разів за період струму, проте в даному випадку такої необхідності немає, оскільки керування компенсуючими конденсаторами в кожній фазі зсунуті як мінімум на одну шосту періоду. Це пов'язано з забезпеченням безударного включення конденсаторів в моменти збігу напруги в мережі і на відповідному конденсаторі.

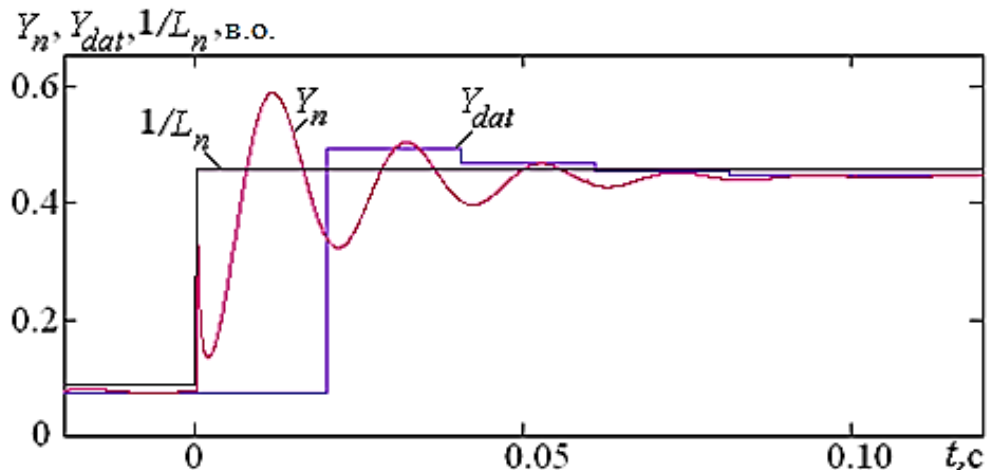


Рис. 3.14. Зміна реактивної провідності статичного індуктивного навантаження синхронного генератора при його включенні

При цьому виникає питання, на скільки затримка у вимірюванні координати реактивної потужності може вплинути на якість керування в перехідному процесі?

Оцінимо вплив затримки вимірюваного сигналу на один період за допомогою моделі перехідного процесу встановлення напруги генератора при включенні навантаження в системі компенсації реактивної провідності, рис. 3.15.

Порівняння процесів 1 і 2 на рис.3.15 показує, що цифрова фільтрація або усереднення вимірюваної реактивної провідності несуттєво впливає на якість керування напругою генератора.

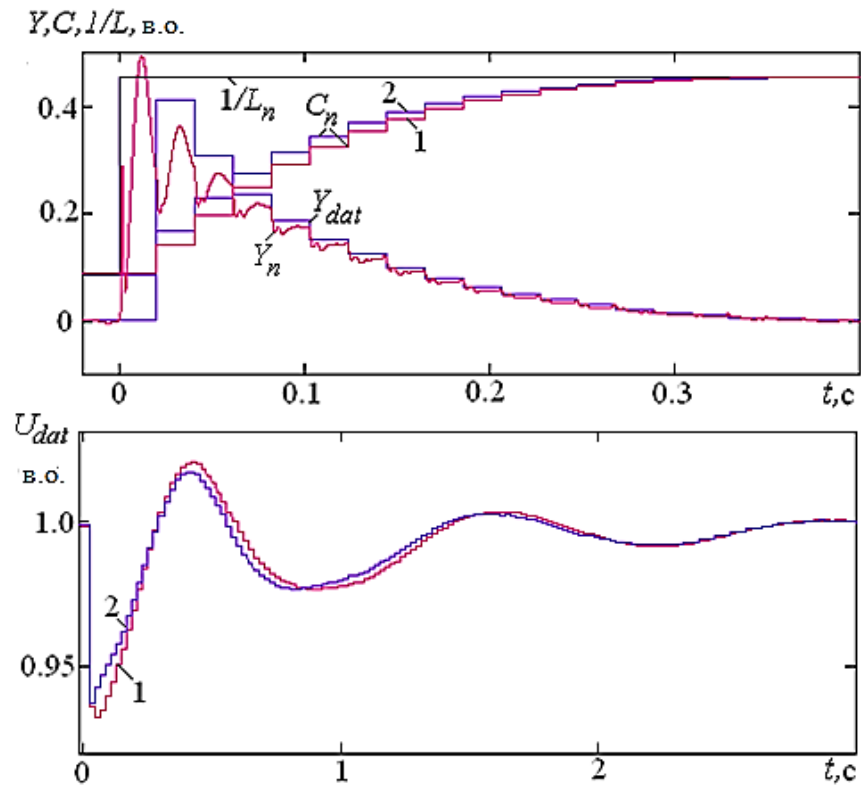


Рис. 3.15. Перехідні процеси в системі регулювання напруги з компенсацією реактивної потужності при використанні сигналів фактичної реактивної провідності Y_n (1) або усередненої провідності Y_{dat} (2)

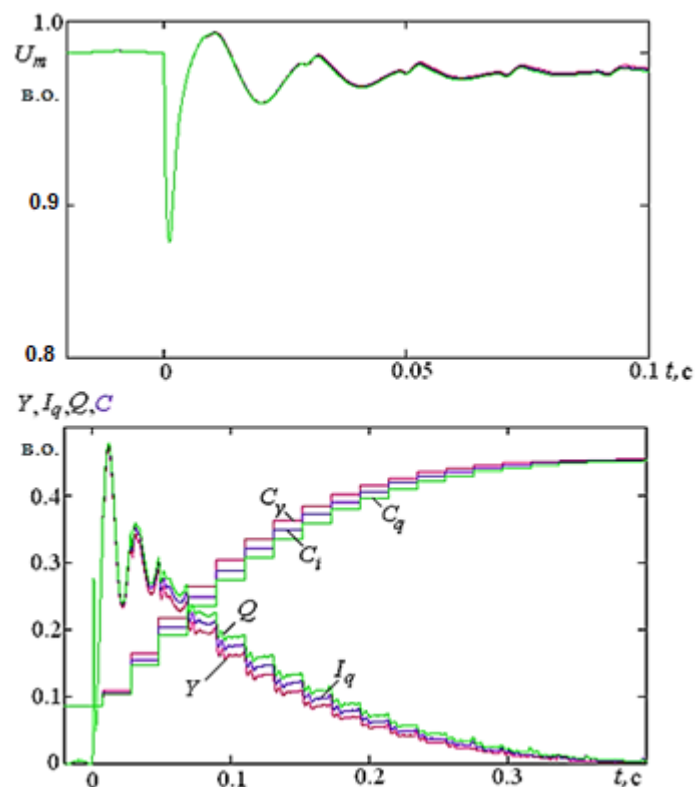


Рис. 3.16. Перехідні процеси стабілізації напруги і компенсації реактивної потужності при використанні різних координат реактивної потужності

Розглянемо на математичній моделі автономної системи, наведеної на рис. 3.1, яким чином впливає вибір вимірюваної координати реактивної потужності Y, I_q, Q на процес керування напругою генератора.

На рис. 3.16 наведені процеси встановлення напруги при включенні 50 % статичного навантаження з $\cos \varphi = 0,8$ в системах з компенсацією реактивної потужності при використанні різних вимірюваних координат реактивної потужності Y, I_q, Q . Керуючим параметром в цих системах являється ємність конденсаторів відповідно C_Y, C_I, C_Q .

Отже, затримка усередненого значення вимірюваної координати на один період і використання в якості регульованих координат реактивної провідності, реактивного струму або реактивної потужності несуттєво впливають на процеси регулювання напруги.

3.5 Аналогове вимірювання параметрів трифазного змінного струму в системі компенсації реактивної потужності

Найпростіший і традиційний спосіб вимірювання діючого значення змінної напруги або струму реалізується шляхом випрямлення з подальшою фільтрацією. Можливість використання такого способу вимірювання реактивної провідності в системі динамічної компенсації через параметри змінного струму (діючі значення напруги, струму та кута між їх векторами)

$$Y(t) = \frac{I(t) \sin \varphi(t)}{U(t)} = \frac{I_m(t) \sin \varphi(t)}{U_m(t)}$$

накладає два обмеження на аналоговий фільтр випрямленої напруги. По-перше, амплітуда пульсацій після фільтра не повинна перевищувати необхідної точності вимірювання параметра, по-друге, затримка сигналу, тобто загасання перехідного процесу, не повинно бути більше одного періоду змінного струму, тобто рівного 0.02 секунди при частоті струму 50 Гц.

Якщо використовується цифрове обчислення середнього значення напруги за попередній період, то його значення повинно множитися на масштабний

коефіцієнт, що зв'язує середньо випрямлене u_{vdat} і діюче або амплітудне значення напруги U_{dat} , рис. 3.17.

Розглянемо три способи випрямлення змінної напруги: однофазне двоівперіодне (двопульсне), трифазне одноівперіодне (трипульсне) і трифазне двоівперіодне (шестипульсне)[121].

Випрямлена напруга як періодична може бути представлена розкладанням у ряд Фур'є, [18].

$$U_B(t) = U_{cp} + \sum_{n=1}^{\infty} (U_{an} \cos n\omega t + U_{bn} \sin n\omega t), \text{ де}$$

$$U_{cp} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} U_B(t) dt; U_{an} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} U_B(t) \cos(n\omega t) dt; U_{bn} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} U_B(t) \sin(n\omega t) dt.$$

1. Розглянемо випрямлення однофазного сигналу $U_B(t) = U_m \cos \omega t$, рис. 3.18.

Знайдемо амплітуду другої гармоніки на ділянці $-\pi/2 \leq \omega t \leq \pi/2$, скориставшись відомим виразом:

$$\int \cos \beta t \cdot \cos \alpha t dt = \frac{\sin(\alpha - \beta)t}{2(\alpha - \beta)} + \frac{\sin(\alpha + \beta)t}{2(\alpha + \beta)} + C$$

Тоді при $U_m = 1$ одержимо:

$$U_2 = \frac{2}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos t \cdot \cos 2t \cdot dt = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sin t}{2 \cdot 1} + \frac{\sin 3t}{2 \cdot 3} \right) \Big|_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} =$$

$$= \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sin \frac{\pi}{2}}{2} - \frac{\sin -\frac{\pi}{2}}{2} + \frac{\sin \frac{3\pi}{2}}{6} - \frac{\sin -\frac{3\pi}{2}}{6} \right) = \frac{4}{3\pi} \approx 0.425$$

Визначимо середнє значення випрямленого сигналу:

$$U_{cp2} = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos t dt = \frac{1}{\pi} \sin t \Big|_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} = \frac{2}{\pi} = 0.637, \text{ см. рис.3.18.}$$

2. Одноівперіодне випрямлення трифазного сигналу, рис.3.19.

Знайдемо амплітуду третьої гармоніки:

$$U_3 = \frac{3}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} \cos t \cdot \cos 3t \cdot dt = \frac{3}{\pi} \left(\frac{\sin 2t}{2 \cdot 2} + \frac{\sin 4t}{2 \cdot 4} \right) \Big|_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} = \frac{3\sqrt{3}}{8\pi} \approx 0.207$$

Середнє значення випрямленого трифазного сигналу

$$U_{\text{срз}} = \frac{3}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} \cos t \, dt = \frac{3}{2\pi} \sin t \Big|_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \approx 0.827, \text{ см. рис.3.19.}$$

3. Двопівперіодне випрямлення трифазного сигналу, рис. 3.20.

Амплітуда пульсацій шостої гармоніки випрямленої напруги

$$U_6 = \frac{3}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} \cos t \cdot \cos 6t \cdot dt = \frac{6}{\pi} \left(\frac{\sin 5t}{2 \cdot 5} + \frac{\sin 7t}{2 \cdot 7} \right) \Big|_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} = \frac{6}{35\pi} \approx 0.0546$$

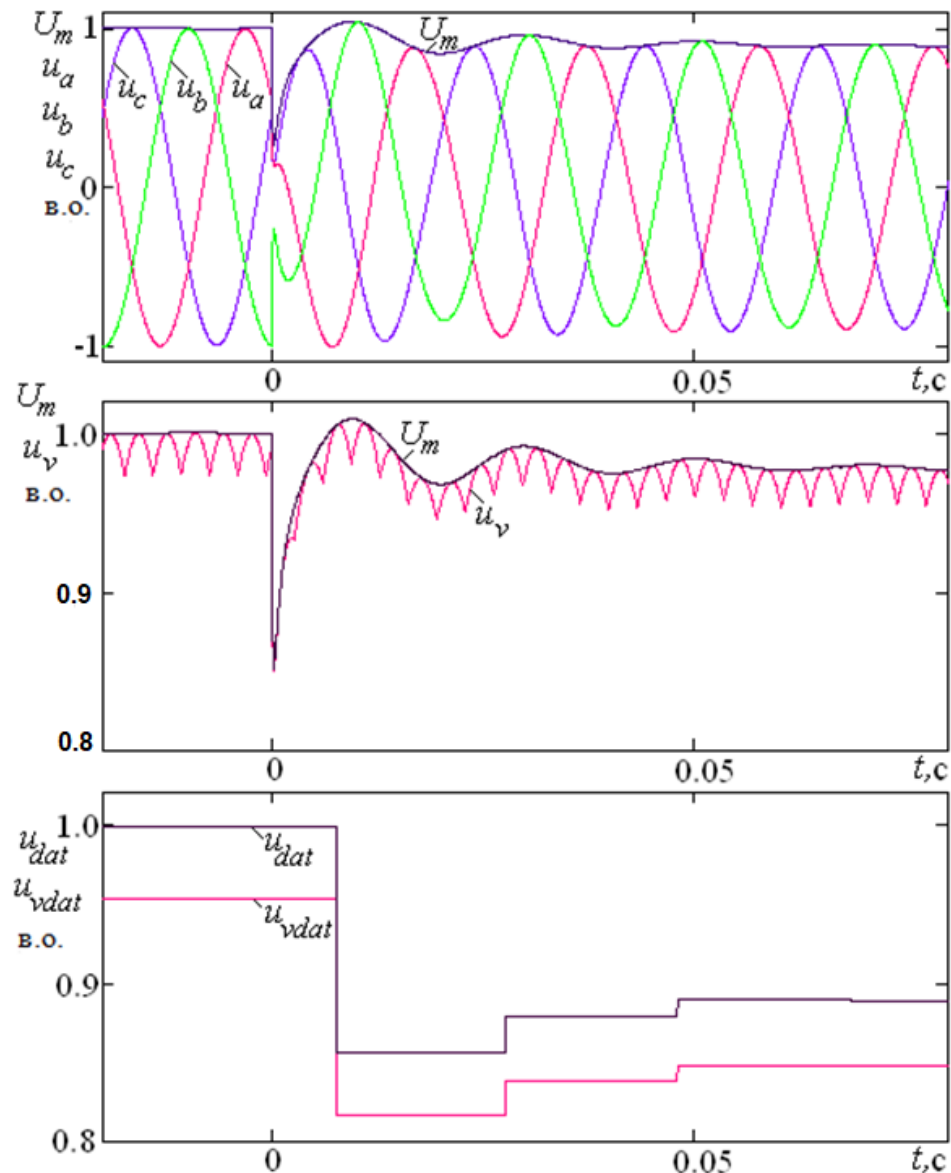


Рис.3.17. Зв'язок між миттєвим, амплітудним і середнім за період значеннями трифазної напруги

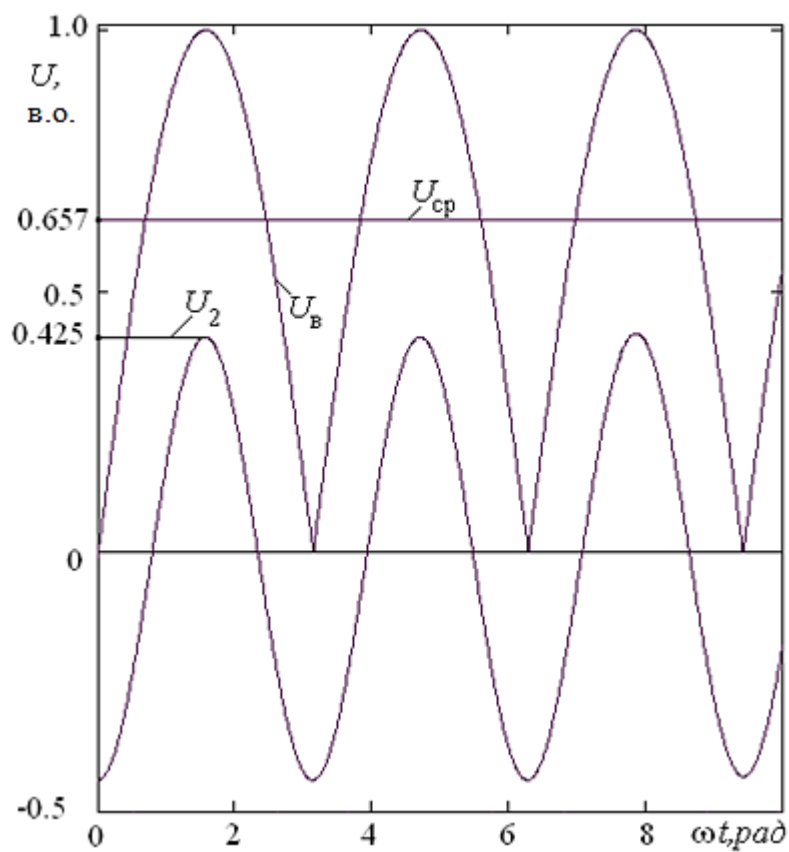


Рис. 3.18. Випрямлена однофазна напруга та її друга гармоніка

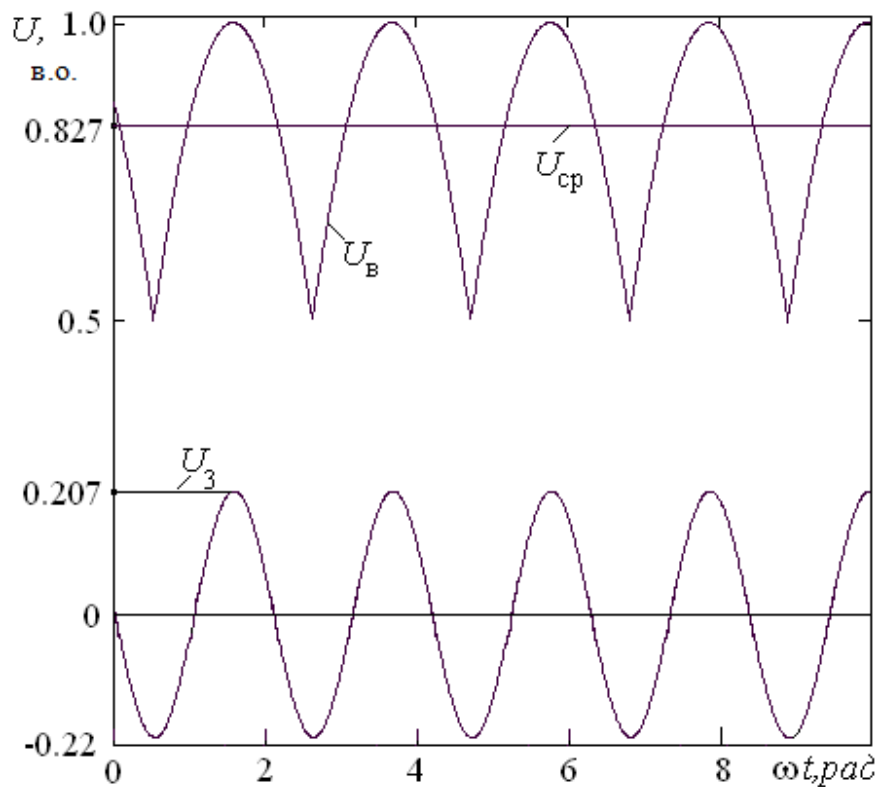


Рис. 3.19. Однопівперіодне випрямлення трифазної напруги і її третя гармоніка

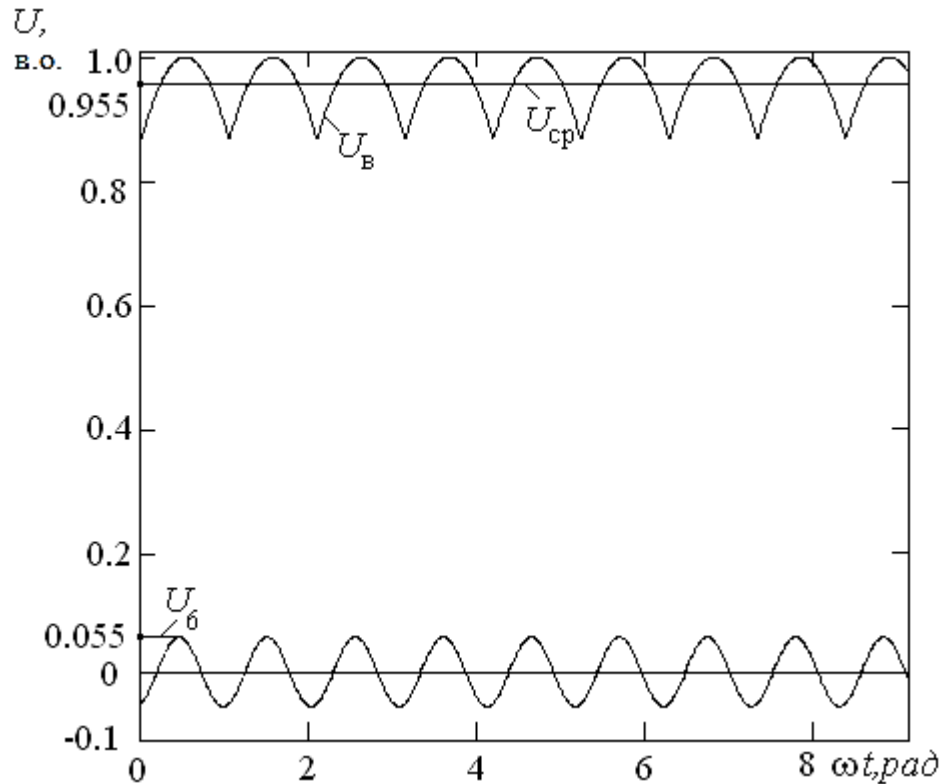


Рис. 3.20. Двопівперіодне випрямлення трифазної напруги і її шоста гармоніка

Середнє значення випрямленого трифазного сигналу:

$$U_{\text{ср6}} = \frac{3}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} \cos t \, dt = \frac{3}{\pi} \sin t \Big|_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} = \frac{3}{\pi} \approx 0.955, \text{ див. рис.3.20.}$$

Отже, середнє значення випрямленого гармонічного сигналу в розглянутих способах випрямлення становить 63.7 %, 82.7 % і 95.5 % відповідно, а амплітуда основної гармоніки у випрямленому сигналі дорівнює 42.5 %, 20.7 % і 5.5 %. При цьому частоти основної гармоніки пульсацій в два, три і шість разів більше частоти мережі.

Розглянемо можливості використання найпростішого аналогового фільтра першого порядку $W_{\phi}(p) = \frac{K_{\phi}}{T_{\phi}p+1}$ для зниження випрямлених пульсацій U_{ϕ} до величини меншої, ніж необхідна точність вимірювань $\varepsilon_{\text{тр}} \geq U_{\phi}$. Тут коефіцієнт підсилення фільтра $K_{\phi} = \frac{U_m}{U_{\text{ср}}}$ відновлює зниження середнього значення випрямленого

сигналу до одиниці. Для розглянутих схем випрямлення ці коефіцієнти відповідно дорівнюють:

$$K_{2\phi} = \frac{1}{0.637} = 1.57; K_{3\phi} = \frac{1}{0.827} = 1.21; K_{6\phi} = \frac{1}{0.955} = 1.05.$$

Амплітудно-частотна характеристика фільтра першого порядку має вигляд $A_{\phi}(\omega_n) = \frac{K_{\phi}}{\sqrt{1+\omega_n^2 T_{\phi}^2}}$, де ω_n – частота гармонічного сигналу. Для n -ї гармоніки $\omega_n = n \cdot 2\pi \cdot f$. Тоді амплітуда пульсацій від n -ї гармоніки на виході фільтра буде зменшена до величини $U_{n\phi} = A(\omega_n) \cdot U_n$.

Нехай точність змін ε обмежується тільки величиною пульсацій основної гармоніки, тоді

$$\varepsilon = U_{n\phi} = A(\omega_n) \cdot U_n = \frac{K_{n\phi} U_n}{\sqrt{1 + \omega_n^2 T_{n\phi}^2}}.$$

Як видно з цього виразу, пульсації $U_{n\phi}$ або точність ε залежать від сталої часу фільтра $T_{n\phi}$. Якщо задатися точністю ε , то легко визначити необхідну сталу часу $T_{n\phi}$ для вибраного випрямляча:

$$T_{n\phi} = \frac{\sqrt{K_{n\phi}^2 U_n^2 - \varepsilon^2}}{\omega_n \cdot \varepsilon} = \frac{\sqrt{K_{n\phi}^2 U_n^2 - \varepsilon^2}}{n \cdot 2\pi \cdot f \cdot \varepsilon}$$

Підставивши отримані раніше значення коефіцієнтів, отримаємо вирази, які справедливі для обраних способів випрямлення з подальшою фільтрацією:

$$T_{2\phi} = \frac{\sqrt{1.57^2 \cdot 0.425^2 - \varepsilon^2}}{2 \cdot 100 \cdot \pi \cdot \varepsilon};$$

$$T_{3\phi} = \frac{\sqrt{1.21^2 \cdot 0.207^2 - \varepsilon^2}}{3 \cdot 100 \cdot \pi \cdot \varepsilon};$$

$$T_{6\phi} = \frac{\sqrt{1.05^2 \cdot 0.055^2 - \varepsilon^2}}{6 \cdot 100 \cdot \pi \cdot \varepsilon}.$$

Ці залежності наведено на рис. 3. 21 в різних масштабах по вертикальній осі.

Зв'язок між сталою часу і точністю визначення параметра обумовлена ступенем придушення основної гармоніки пульсацій у випрямленій напрузі (струмі).

З іншого боку, стала часу визначає тимчасову затримку вимірюваного сигналу. Для систем динамічної компенсації реактивної потужності, що змінюють величину компенсуючого реактивного струму в кожен період за інформацією в попередній період необхідно, щоб фільтр не затримував сигнал більш ніж на період. А якщо комутація фазних конденсаторів здійснюється в різний час протягом половини періоду, то допустима затримка фільтра становить півперіоду змінного струму.

Реалізація схеми давача змінної трифазної напруги наведена на рис. 3.22, а перехідні процеси при ступінчастій зміні напруги – на рис. 3.23.

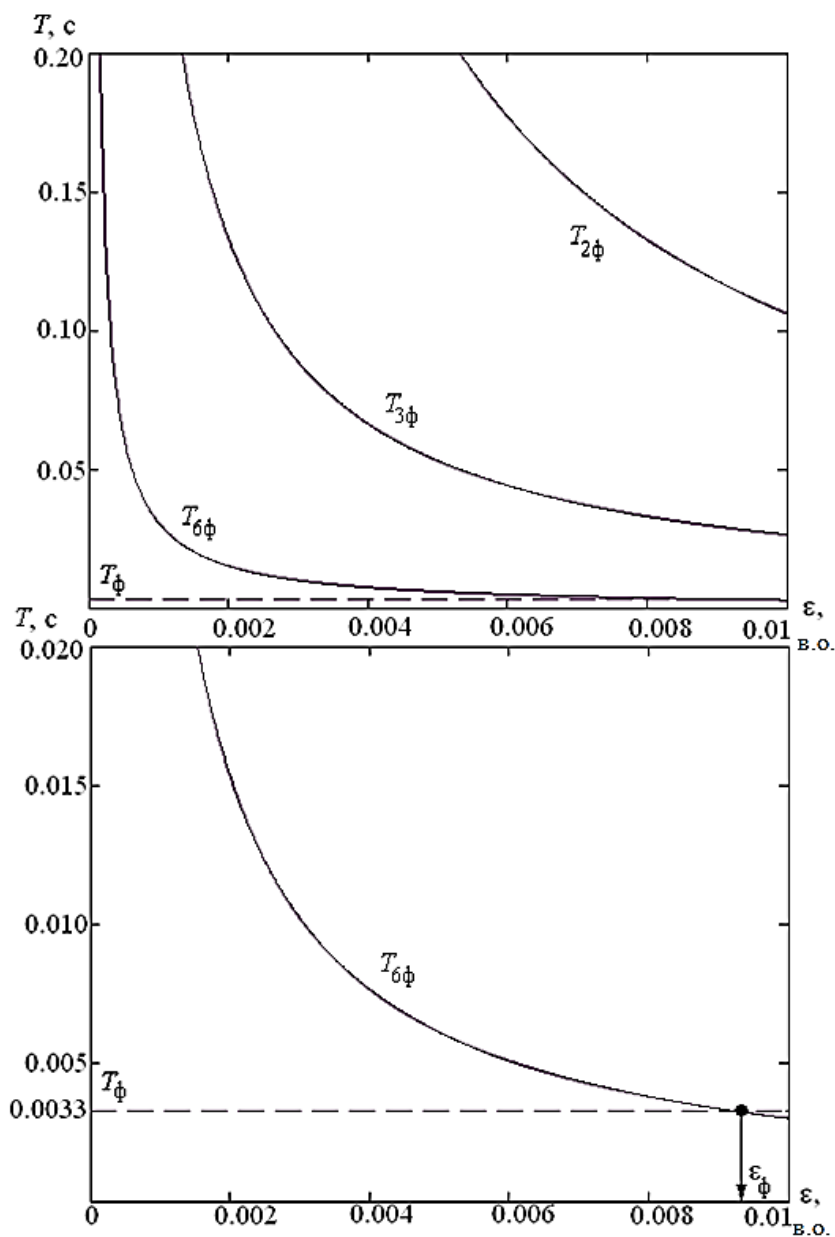


Рис. 3.21. Залежність сталої часу фільтра від необхідної точності

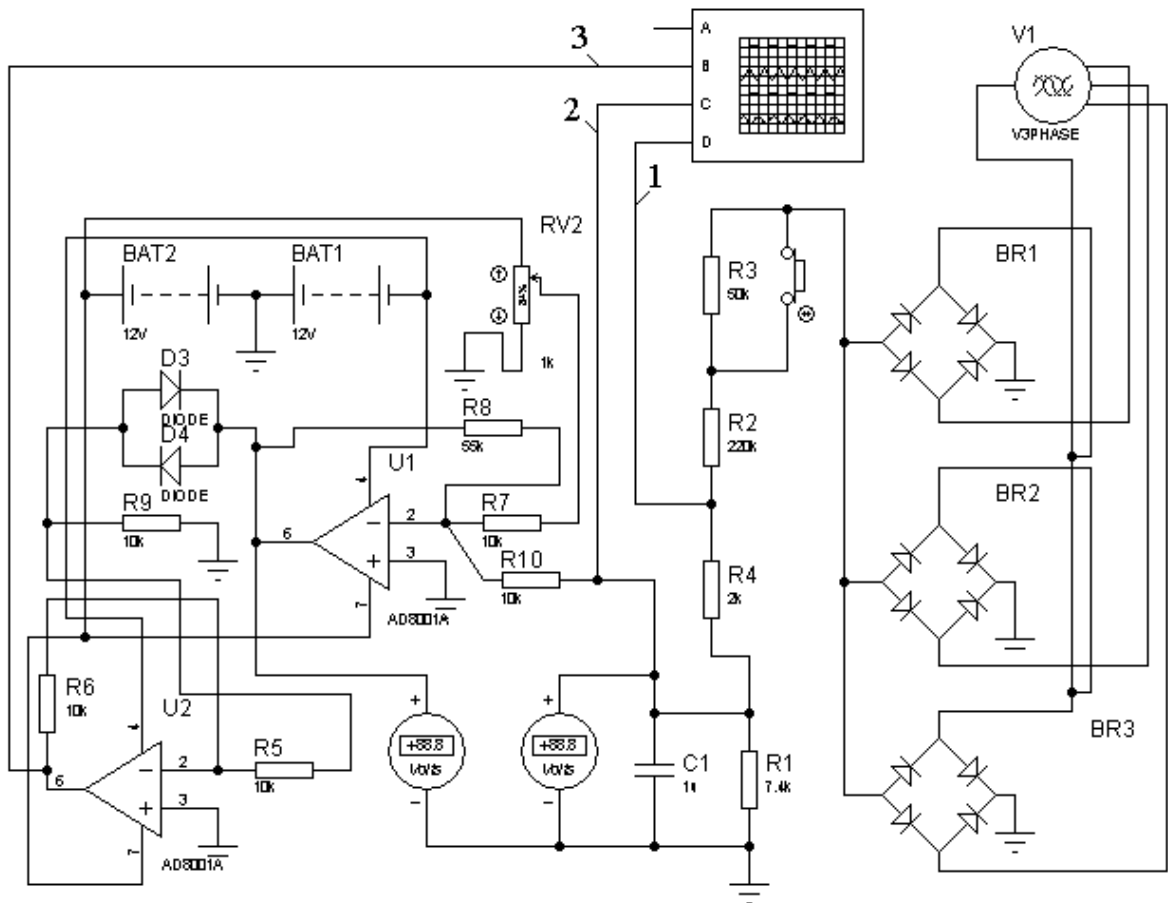
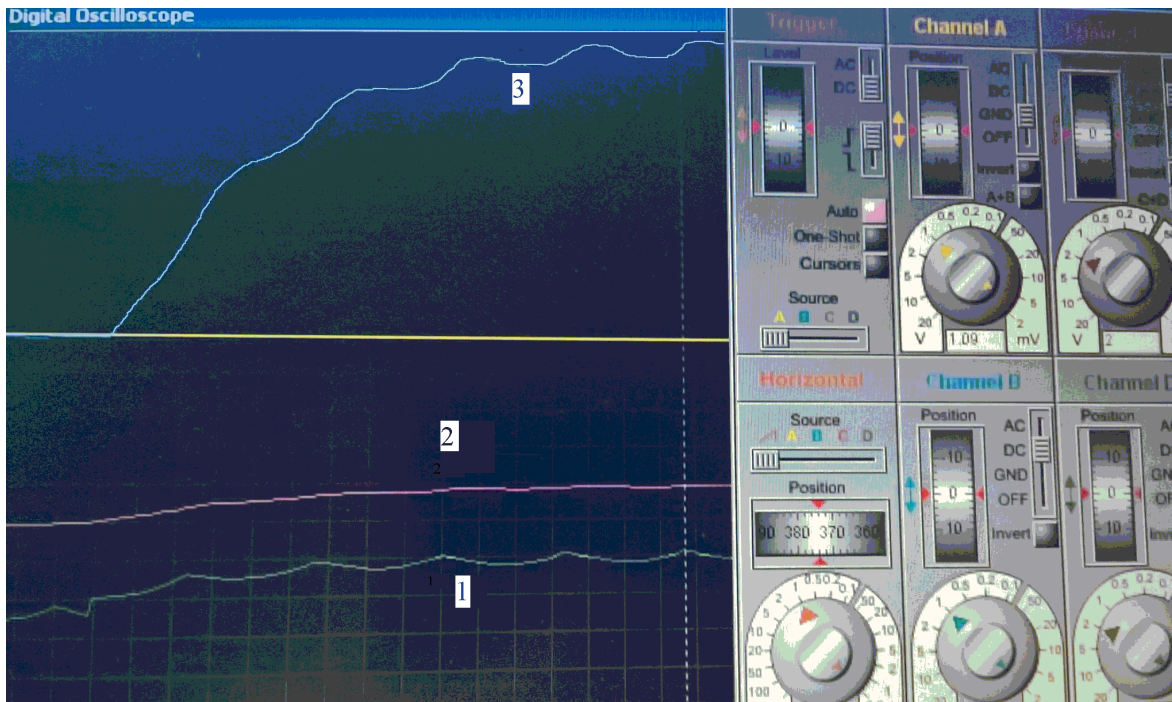


Рис. 3.22. Двопівперіодний давач трифазної напруги



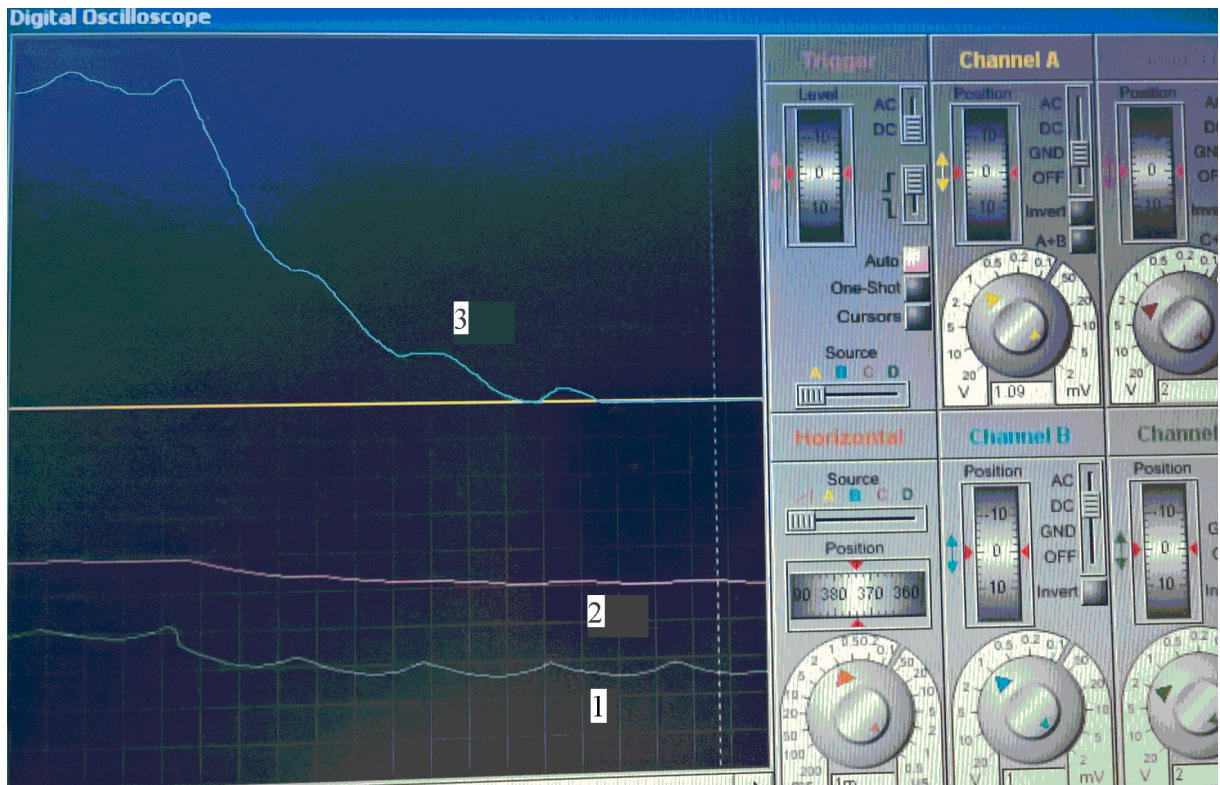


Рис. 3.23. Перехідні процеси в двопівперіодному давачеві трифазної напруги

Будемо вважати, що перехідний процес в фільтрі першого порядку закінчується за три сталих часу, при частоті струму 50 Гц стала часу повинна становити

$$T_{6\phi} = \frac{T_0}{2 \cdot 3} = \frac{0.02}{6} = 0.0033 \text{ с.}$$

Тоді амплітуда пульсацій в шестипульсному фільтрі складе $\varepsilon = 0.0093$ або 0.93%, див. рис. 3.21.

Таким чином [121, 122], використання двопівперіодного трифазного випрямлення з подальшою аналоговою фільтрацією інерційною ланкою першого порядку дозволяє досягти точності вимірювання більше 1 % з затримкою сигналу не більше половини періоду змінного струму.

3.6 Давач реактивної провідності навантаження

Для суднової електроенергетичної системи з допустимими нелінійними мережевими спотвореннями [154, 175] для динамічної компенсації реактивної

момент переходу напруги живлення через «0». При цьому активна складова струму дорівнює нулю і струм навантаження визначається тільки реактивною складовою, тобто i_p ; U_m – амплітудне значення напруги; I_m – амплітудне значення повного струму навантаження; b_L – реактивна провідність навантаження (вимірюється двічі за півперіод), яка дорівнює: $b_L = i_p/U_m$.

Рис. 2.25 пояснює принцип отримання реактивної складової провідності навантаження.

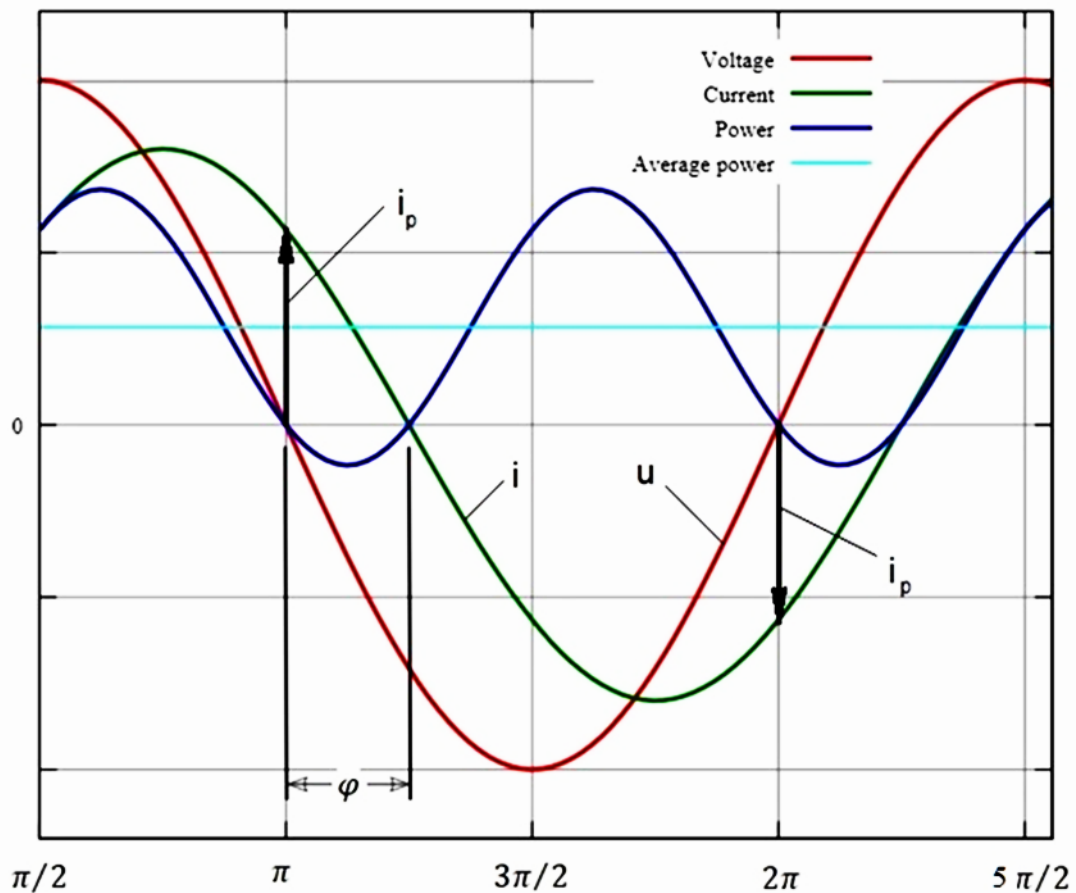


Рис.2.25 – Принцип вимірювання реактивної провідності навантаження b_L

Так як повний струм i відстає від напруги u на кут φ , то в момент виміру (на рис. 2.25 момент часу π) коли $u = U_m \cdot \sin(\pi) = 0$ миттєве значення i_p буде дорівнювати: $i_p = I_m \cdot \sin(\pi - \varphi) = -I_m \cdot \sin \varphi$, тобто в момент переходу напруги живлення через «0» (контролюється визначником нульового значення напруги В «0»Н) активна складова струму дорівнює нулю, а повний струм навантаження буде

визначатись тільки реактивною складовою i_p . В дільнику D виконується операція ділення реактивного струму i_p на амплітудне значення U_m , в результаті якої буде знайдено миттєве значення реактивної провідності навантаження, тобто:

$$i_p/U_m = I_m \cdot \sin \varphi / U_m = (I_m/U_m) \cdot \sin \varphi = Y \cdot \sin \varphi = b_L,$$

де Y – повна реактивна провідність навантаження.

Як видно із рис. 2.25 реактивна провідність навантаження b_L вимірюється двічі за півперіод, та має різний знак, що може бути використано конкретною системою керування в умовах дії активно-індуктивно-ємнісного характеру навантаження.

3.6 Висновки до розділу 3

1. При включенні статичного активно-індуктивного навантаження, що призводить до динамічного провалу напруги і частоти суднової мережі, зміна фізичних величин реактивної потужності Q, I_q, Y в навантаженні буде відбуватися по-різному. Аналіз перехідного процесу комутації навантаження показує, що тільки зміна *реактивної провідності* Y після загасання коливань в контурах розсіювання генератора визначає фактичну величину навантаження $1/L_n$ за винятком високочастотних процесів, загасаючих в контурах розсіювання генератора. Динаміка зміни реактивного струму I_q і реактивної потужності Q повторює характер зміни напруги, але в різних масштабах (1:2).

2. У режимі пуску асинхронного електродвигуна співвимірної з генератором потужності та споживанні великої кількості реактивної потужності виникає динамічний провал напруги $U(t)$ автономного генератора, що викликає запізнювання сигналу реактивної потужності $Q(t)$ та відповідного зниження швидкодії системи компенсації реактивної потужності двигуна. Тому, в системі компенсації реактивної потужності при пуску від синхронного дизель-генератора асинхронного двигуна співвимірної потужності доцільно використовувати в якості вимірювальної та регульованої координати *реактивну провідність навантаження* $Y(t)$.

3. На основі аналізу і зіставлення перехідних процесів комутації активно-індуктивного навантаження і пуску асинхронного двигуна, характерних для автономних СЕЕС, в якості керуючого параметру в системі динамічної компенсації реактивної потужності доцільно використовувати *реактивну провідність навантаження*, що буде визначати технічну реалізацію чутливих елементів системи регулювання реактивної потужності та дозволить в перехідних процесах комутації статичного та електродвигунного навантаження комплексно враховувати зміну напруги та реактивного струму і створювати швидкодіючі системи компенсації реактивної потужності. У відомих системах динамічної компенсації реактивної потужності в якості керуючого параметру використовувались реактивний струм або реактивна потужність.

4. Для вимірювань, контролю та керування реактивною потужністю в колах трифазного змінного струму можливе використання контролера з чотирма аналого-цифровими перетворювачами двох напруг і двох струмів, знання яких дозволяє за наведеними вище виразами обчислити поточне значення реактивної провідності навантаження.

5. В роботі пропонується схемне рішення давача миттєвого значення реактивної провідності навантаження, що може бути застосовано при динамічній компенсації реактивної потужності навантаження у судновій електроенергетичній установці з допустимими нелінійними спотвореннями силової мережі.

4. ЗАКОНИ КЕРУВАННЯ СИНХРОННОЮ ГЕНЕРАТОРНОЮ УСТАНОВКОЮ З КОМПЕНСАЦІЄЮ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

4.1 Аналогові закони керування синхронною генераторною установкою

Розглянемо систему керування синхронною генераторною установкою з компенсацією реактивної потужності навантаження як дві взаємопов'язані системи, рис.4.1[53, 56, 122]:

- стабілізації напруги синхронного генератора;
- компенсації реактивної потужності навантаження.

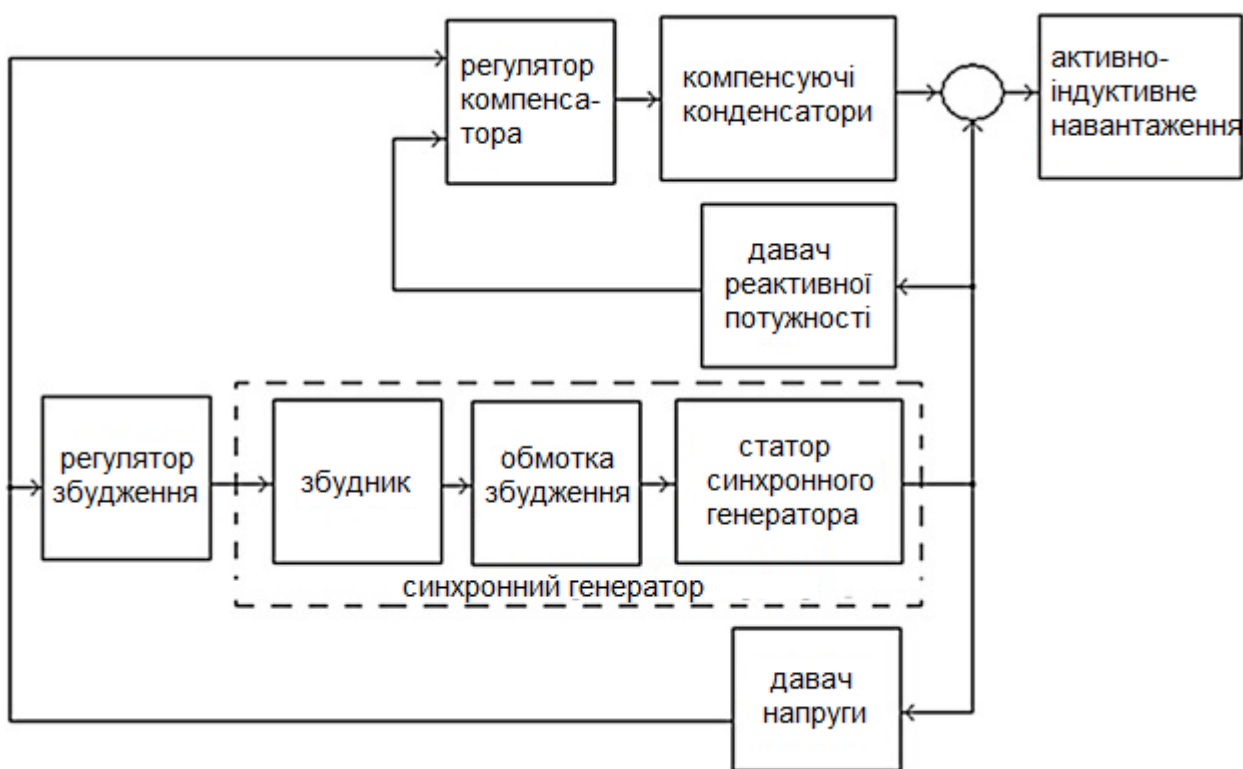


Рис. 4.1. Система керування синхронним генератором з компенсацією реактивної потужності

Навантаження синхронного генератора являється збуджуючим впливом для системи стабілізації напруги генератора, в той же час навантаження стає керованим, так як в ньому компенсується реактивна складова, яка істотно впливає на величину генеруючої напруги.

Робота компенсуючого пристрою істотно впливає на контур регулювання напруги синхронного генератора, тому синтез оптимальних законів керування генераторної установки з компенсацією реактивної потужності потрібно виконувати як в єдиній динамічній системі.

Порівняння законів керування та вибір їх оптимальних параметрів будемо здійснювати шляхом їх поступового ускладнення. В якості базової системи виберемо оптимальну систему автоматичної стабілізації напруги генераторної установки без компенсації реактивної потужності.

Вираз критерію оптимізації має вигляд суми модулів відхилення напруги:

$$I_D = \sum_{n=1}^{E(T_{кр}/T_0)} |U_n - U_{cp}(nT_0)|, \quad (4.1)$$

де $E(T_{кр}/T_0)$ – ціла частина періодів T_0 за час розрахунку перехідного процесу $T_{кр}$. Середня напруга обчислюється один раз за період як середнє арифметичне модуля вектору напруги на кожному кроці вирішення:

$$U_{cp}(nT_0) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\bar{U}_m(k \cdot \Delta t)|,$$

де N – кількість кроків чисельного інтегрування у періоді змінного струму T_0 .

Найпростішим законом керування напруги синхронного генератора є пропорційний закон з коефіцієнтом підсилення k_p :

$$U_f(t) = k_p (U_n - U_m(t)). \quad (4.2)$$

Показники якості системи стабілізації напруги синхронного генератора з II та III регуляторами, такі як максимальна статична помилка $\Delta U_m(\infty)$ (статизм системи) та інтегральна оцінка динамічної помилки I_{Du} (4.1), розраховані і наведені на рис. 4. 2.

Інтегральний критерій на рис. 4.2 розраховувався при моделюванні включення 50 % активно-індуктивного навантаження з $\cos \varphi = 0.7$. Його значення I_D при використанні II - і III – регуляторів не перевищує значення 2.7, тобто динамічні властивості перехідного процесу являються задовільними.

В системі з пропорційним регулятором при $k_p > 60$ статизм не перевищує 2 %, що відповідає вимогам до точності для суднових генераторів [214].

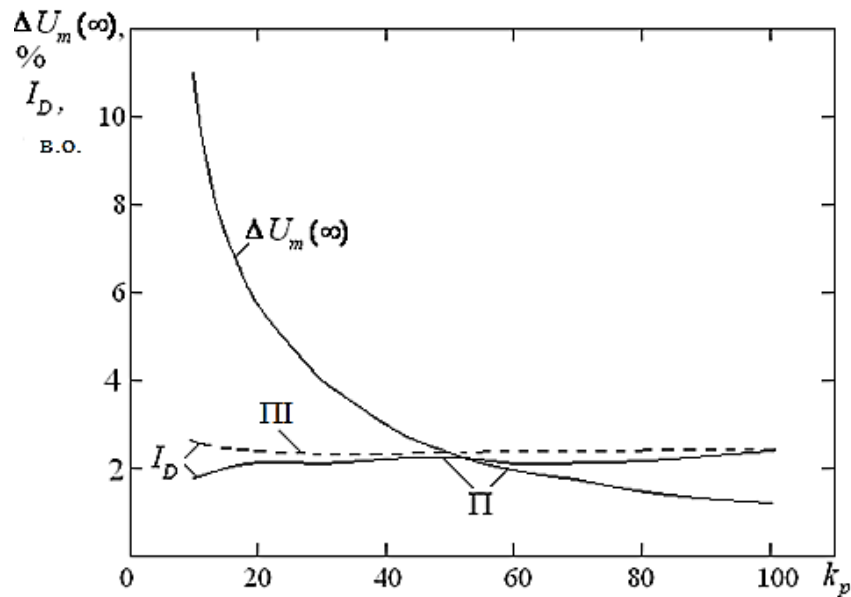


Рис. 4.2. Показники якості системи стабілізації напруги синхронного генератора з II – і III – регуляторами

Додаткове введення в закон керування напругою генератора інтегральної складової

$$U_f(t) = k_p \cdot \Delta U_m(t) + \frac{k_p}{T_i} \int_0^t \Delta U_m(t) dt \quad (4.3)$$

дозволяє отримати нульову помилку регулювання $\Delta U_m(\infty) = 0$. Значення функціоналу якості I_D в системі з III–регулятором при цьому збільшується незначно $I_D(\infty) < 2.7$, див. рис. 4.2.

Таким чином, система регулювання напруги синхронного генератора без УКРП з III – регулятором цілком задовольняє висунутим до неї вимогам і може розглядатися в якості базової схеми.

Доповнимо систему аналоговим контуром компенсації реактивної потужності. Величина компенсуючої ємності C_k , яка буде підключатися до генератора, визначається законом компенсації F_k :

$$C_k(t) = F_k [P_q(t)], \quad (4.4)$$

де $P_q(t)$ – координата, що характеризує реактивну потужність навантаження.

Далі в математичну модель синхронного дизель-генератора на додаток до ПІ – регулятора напруги (4.3) введемо пропорційний контур компенсації реактивної потужності:

$$C_k = k_q \cdot P_q(t), \quad (4.5)$$

де k_q – коефіцієнт пропорційності ПІ – компенсатора.

На рис. 4.3 наведені розрахунки величини скомпенсованого коефіцієнта потужності $\cos \varphi$ та інтегрального показника якості перехідного процесу I_D від налагоджувального параметра k_q .

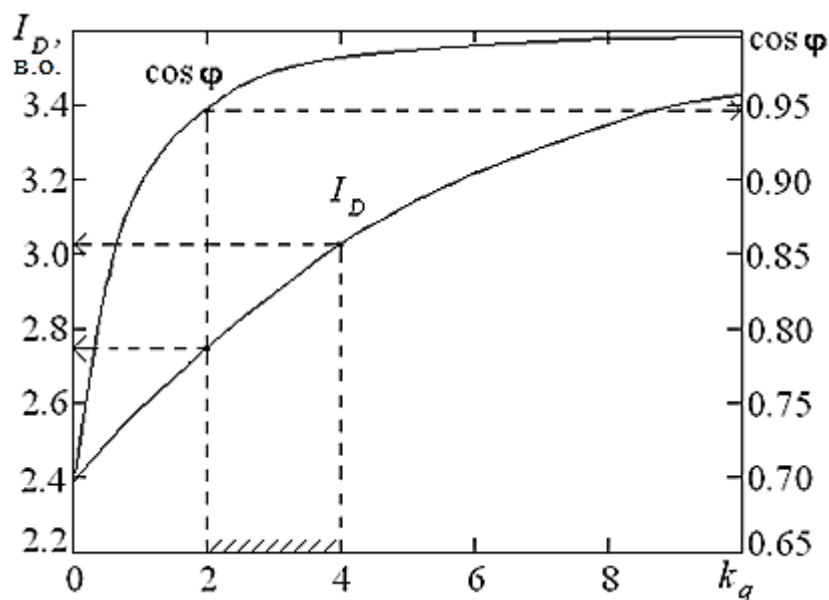


Рис. 4.3. Залежність величини коефіцієнта потужності $\cos \varphi$ і показника якості перехідного процесу I_D від налагоджувального параметра k_q

Аналіз пропорційного закону компенсатора показує, що ефективна компенсація реактивної потужності буде при $k_q > 2$, оскільки коефіцієнт потужності $\cos \varphi > 0.95$. Значення інтегрального показника якості при $k_q = 2 \dots 4$ дорівнює $I_D = 2.75 \dots 3.0$, що визначає допустимі налагоджувальні параметри пропорційного компенсатора.

Використання у пропорційному компенсаторі в якості регульованих координат реактивної потужності навантаження, таких як величини реактивної

потужності Q , реактивного струму I_q , реактивної провідності Y_Q або кута між струмом і напругою навантаження φ , дають різні результати якості перехідного процесу, $I_{DQ}(k_q)$, $I_{DI}(k_q)$, $I_{DY}(k_q)$, $I_{D\varphi}(k_q)$, рис. 4.4. З точки зору коливальності ($I_D < 3.0$) допустимі коефіцієнти пропорційного компенсатора повинні бути менше, ніж $k_{qI} < 1.5$; $k_{qQ} < 0.5$; $k_{q\varphi} < 3.7$; $k_{qY} < 5.4$.

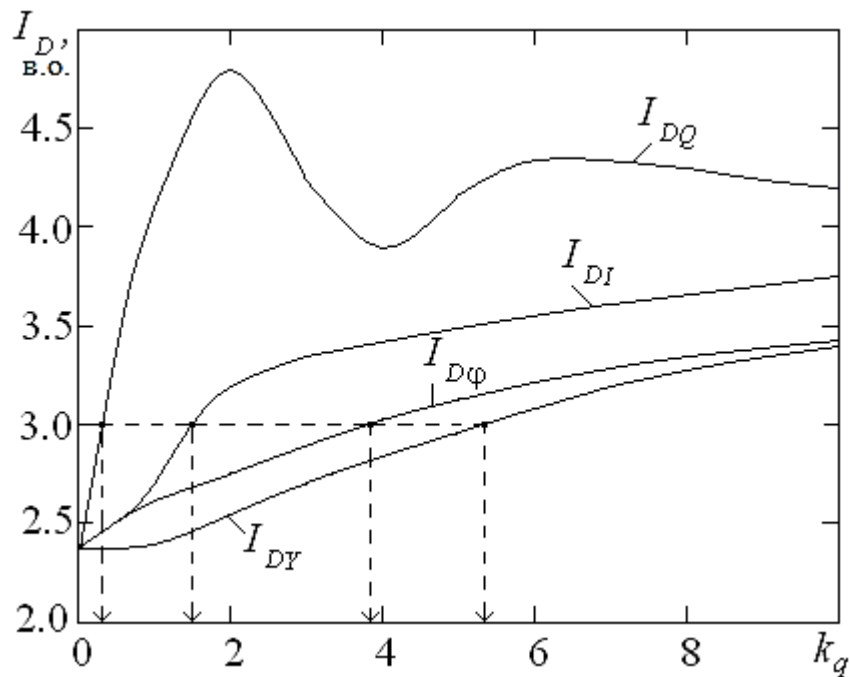


Рис. 4.4. Залежність інтегрального показника якості перехідного процесу I_D від налагоджувального параметра k_q

Ефективна компенсація реактивної потужності з $\cos \varphi > 0.95$ і задовільними динамічними характеристиками в пропорційному компенсаторі спостерігається при $k_q > 2$, тому його можна реалізувати шляхом використання в якості компенсуючих параметрів реактивну провідність Y_Q , див. рис. 4.4.

Розглянемо пропорційно-інтегральний (ПІ) закон керування компенсатором реактивної потужності:

$$C_k = k_q \cdot P_q(t) + \frac{k_q}{T_q} \int_0^t P_q(t) dt, \quad (4.6)$$

де k_q, T_q – коефіцієнт пропорційності та стала інтегрування.

Дослідження динамічних властивостей системи керування напругою синхронного дизель-генератора з ПІ – регулятором напруги і ПІ – компенсатором реактивної потужності (4.6) показують, що введення інтегральної складової в керування компенсатора збільшує коливальні властивості системи, рис. 4.5.

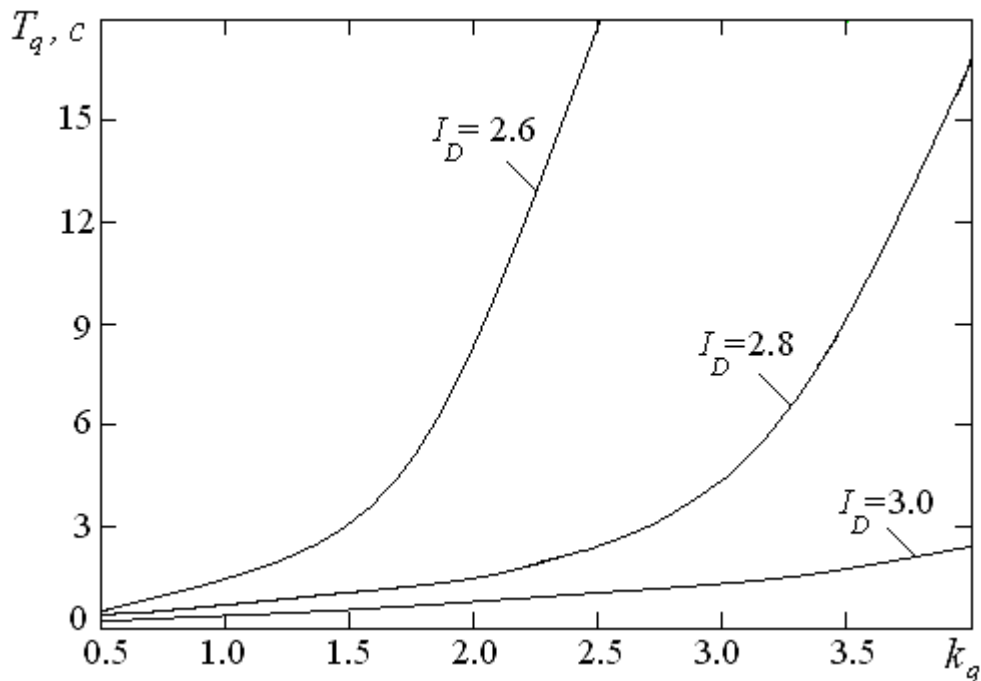


Рис. 4.5 Лінії рівного значення інтегрального показника якості I_D в області налагоджувальних параметрів компенсатора реактивної потужності k_q, T_q

Для зменшення динамічного відхилення коефіцієнта потужності $\cos \varphi$ від одиничного значення сталу інтегрування T_q компенсатора потрібно зменшувати, що призводить до збільшення коливальності в системі стабілізації напруги, рис. 4.6.

На рис. 4.6 площа під кривою коефіцієнта потужності $\cos \varphi$ розраховується аналогічно площі I_{Du} відхилення напруги (4.1):

$$I_{Dq} = \sum_{n=1}^{E(T_{кр}/T_0)} |1 - \cos \varphi_{ср}(nT_0)| \quad (4.7)$$

Значення $I_{Dq}(\infty)$ являється інтегральною оцінкою якості перехідного процесу компенсації коефіцієнта потужності $\cos \varphi$.

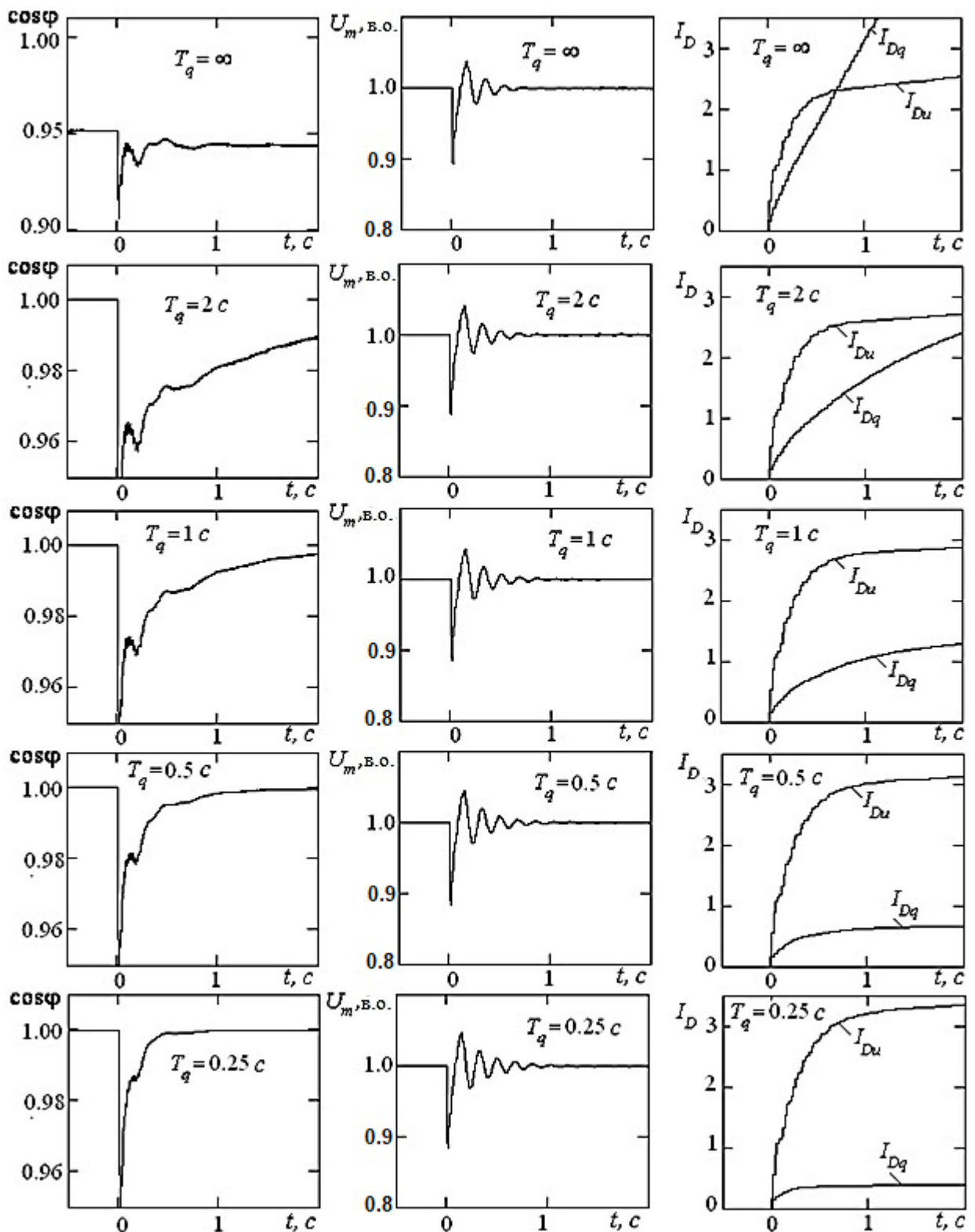


Рис. 4.6. Процеси комутації навантаження при $k_q = 2$ і $T_q = 0.25 \dots \infty$

Сума функціоналів, які оцінюють перехідні процеси напруги I_{Du} і коефіцієнта потужності I_{Dq} , може бути прийнята як комплексна оцінка динаміки і точності системи стабілізації напруги з компенсацією реактивної потужності, рис. 4.7:

$$I_{D\Sigma} = I_{Du} + I_{Dq} \quad (4.8)$$

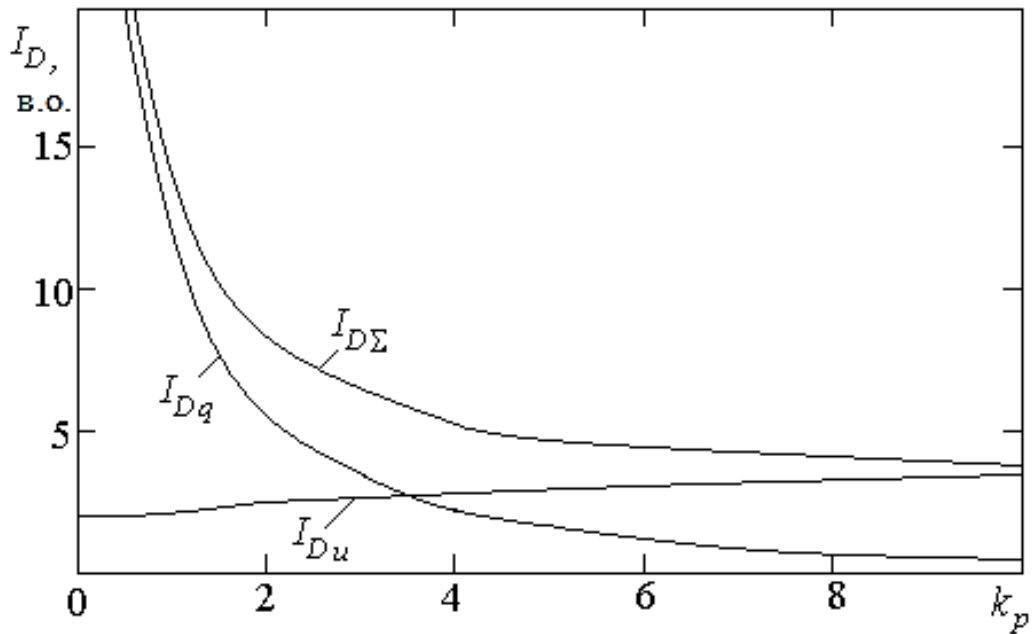


Рис. 4.7. Інтегральні показники якості процесу стабілізації напруги I_{Du} і компенсації коефіцієнта потужності I_{Dq} від коефіцієнта пропорційного регулятора напруги

Як видно із наведених на рис. 4.7 залежностей, збільшення коефіцієнта підсилення пропорційного регулятора зменшує відхилення коефіцієнта потужності від одиниці, але збільшує коливальність в системі стабілізації напруги.

Система керування синхронним генератором з компенсацією реактивної потужності, що показана на рис. 4.1, має два ПІ – регулятора напруги та реактивної потужності з двома парами налагоджувальних параметрів, k_p, T_i та k_q, T_q .

Критерієм для налаштування системи може бути обраний сумарний інтегральний критерій $I_{D\Sigma}$ (4.8). При доповненні традиційної системи стабілізації напруги синхронного генератора системою компенсації реактивної потужності налагоджувальні параметри ПІ – регулятора напруги k_p, T_i , які були оптимальними, повинні бути змінені, оскільки задача оптимізації в системі з двома ПІ – регуляторами вирішується в області чотирьох параметрів k_p, T_i, k_q, T_q .

Оптимізація системи пошуковими методами шляхом побудови залежності $I_{D\Sigma}$ в області параметрів k_p, T_i, k_q, T_q дозволяє визначити оптимальні параметри ПІ –

регуляторів. Методом покоординатного спуску в чотиривимірному просторі налагоджувальних параметрів знайдені оптимальні параметри: $k_p = 8$, $T_i = 0.05$ с, $k_q = 6$, $T_q = 0.5$ с.

Наприклад, для фіксованих значень $T_i = 0.05$ с і $T_q = 0.5$ с на рис. 4.8 побудовані залежності критерію $I_{D\Sigma}$ в області параметрів k_p і k_q .

Матриця значень функціоналу $[I_{D\Sigma}(\infty)]$ дорівнює:

$$I_{D\Sigma} = \begin{bmatrix} 3.28 & 3.16 & 3.09 & 3.07 & 3.03 & 3.05 & 3.08 & 3.09 \\ 3.1 & 2.99 & 2.93 & 2.91 & 2.92 & 2.93 & 2.94 & 2.95 \\ 3.18 & 3.09 & 3.02 & 3.02 & 3.0 & 3.03 & 3.07 & 3.08 \end{bmatrix}$$

Мінімальне значення функціоналу $I_{D\Sigma}$ досягається при оптимальних налагоджувальних параметрах регуляторів k_p, T_i, k_q, T_q .

На рис. 4.8 побудовані поверхні значень критерію у вигляді поверхонь Surface (а) і Contour Plot (б). Оптимальні налагоджувальні параметри відзначені жирною крапкою.

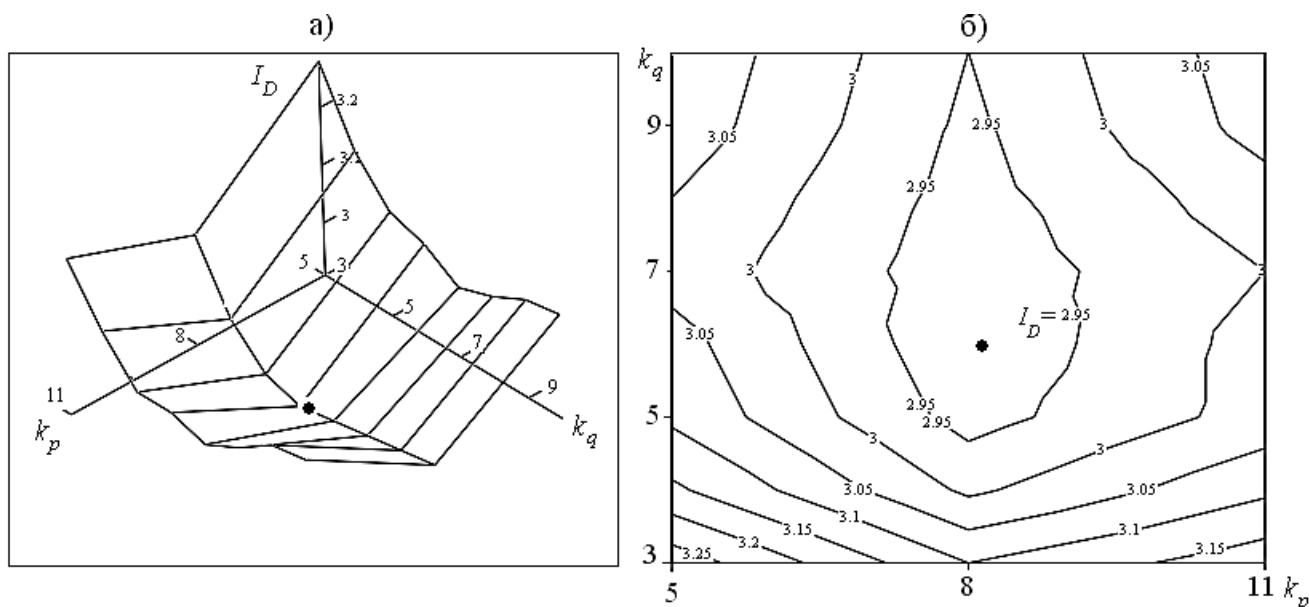


Рис. 4.8. Визначення оптимальних налагоджувальних параметрів системи керування напругою синхронного генератора з компенсацією реактивної потужності

4.2 Використання додаткового зворотного зв'язку між регулятором напруги та компенсатором реактивної потужності

Як показали дослідження системи керування синхронної генераторної установки з компенсацією реактивної потужності, радикальним способом поліпшення динамічних властивостей системи являється введення додаткового зворотного зв'язку між регулятором напруги та компенсатором реактивної потужності [53, 122].

Крім координат реактивної потужності для керування величиною компенсуючої ємності пропонується додатково використовувати інформацію про відхилення напруги синхронного генератора. Закон керування величиною компенсуючої ємності представимо у вигляді:

$$C_k = k_u(U_n - U_m(t)) + k_q \cdot P_q(t) + \frac{k_q}{T_q} \int_0^t P_q(t) dt, \quad (4.9)$$

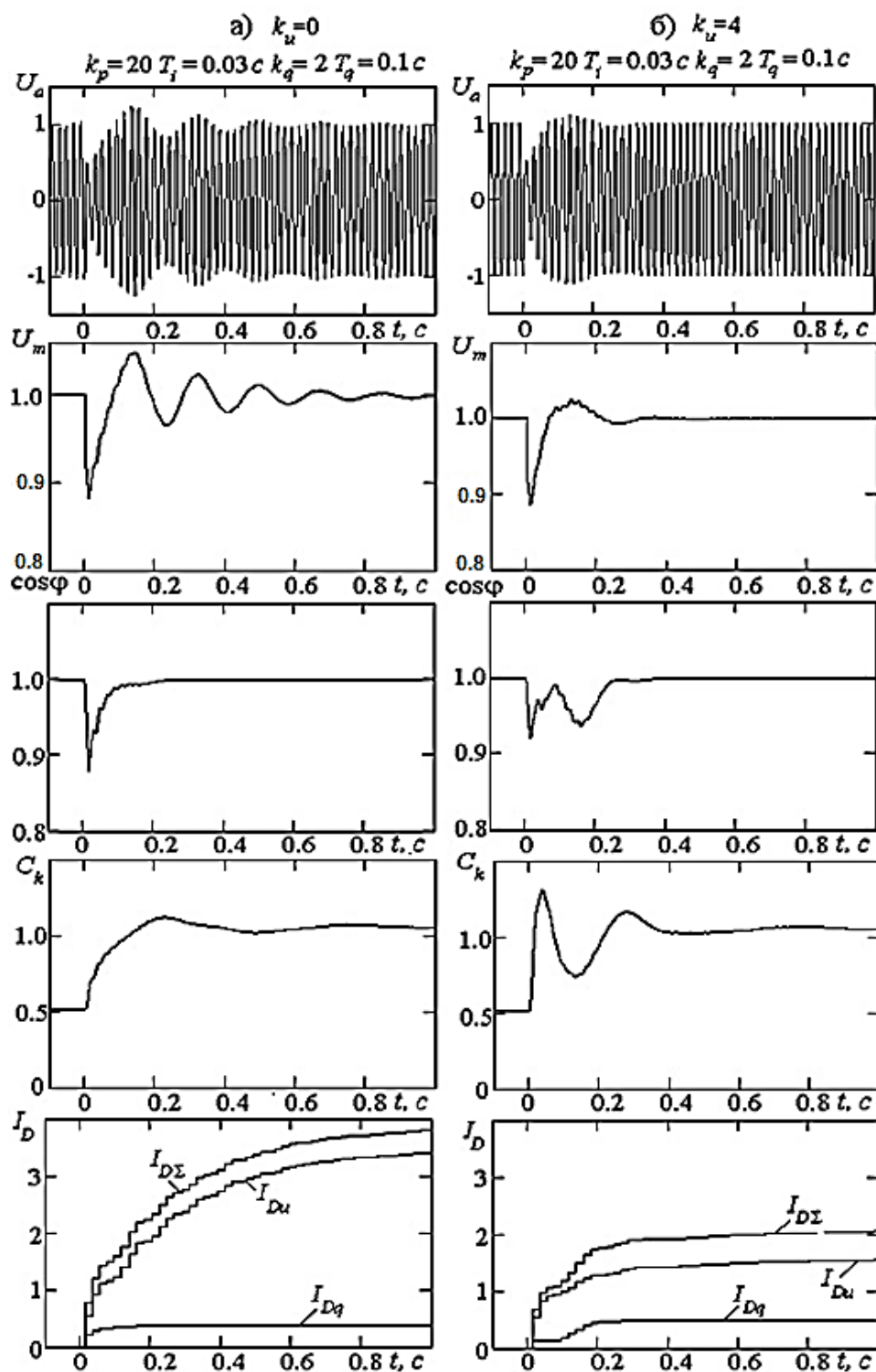
де k_u – коефіцієнт пропорційності за напругою.

Порівняння динамічних процесів у системі без використання (а) та з використанням (б) зворотного зв'язку по відхиленні напруги наведено на рис. 4.9. При миттєвому включенні навантаження на шини синхронного генератора виникає різкий провал напруги на істотну величину, що досягає 2 десятків відсотків від номінального значення. Так, при включенні 50 % номінального активно-індуктивного навантаження провал напруги в перший період струму становить понад п'ятнадцяти відсотків.

Величина динамічного відхилення напруги залежить від величини та характеру навантаження, тому може бути використана в якості інформації в системі компенсації реактивної потужності. На других зверху графіках перехідного процесу рис. 4.9 показано зміну модуля або огибаючої статорної напруги генератора.

Відхилення напруги $U_m(t)$ від номінального значення U_n вводиться в закон керування компенсуючої ємності C_k (4.9). Як видно з перехідних процесів, показаних на рис. 4.9, а та рис. 4.9, б, динамічні властивості системи стабілізації напруги істотно поліпшуються. Процес встановлення напруги містить не більше одного

коливання з перерегулюванням не більше 10%. Тривалість провалу напруги становить чотири періоди змінного струму, тобто 0.08 с, а тривалість всього перехідного процесу напруги – 0.3 с.



Форма динамічного провалу коефіцієнта потужності $\cos \varphi$ і динамічної зміни компенсуючої ємності $C_k(t)$ при введенні зворотного зв'язку по напрузі істотно змінюється, рис. 4.9. Величина провалу $\cos \varphi$ зменшується, але з'являється другий провал на величину приблизно 0.06 від одиниці. Тривалість перехідного процесу $\cos \varphi$ становить не більше 0.3 с. Пропорційний зворотний зв'язок викликає інтенсивну зміну ємності в момент комутації навантаження, рис. 4.9.

Форсована зміна ємності дозволяє істотно вплинути на перехідний процес встановлення напруги і коефіцієнта потужності. Інтегральні показники якості перехідних процесів I_{Du} , I_{Dq} , і $I_{D\Sigma}$ стають істотно меншими. Так, показник перехідного процесу за напругою в системі без зворотного зв'язку дорівнює $I_{Du} = 3.4$, а при введенні такого зв'язку зменшується в два рази $I_{Du} = 1.6$.

Далі проаналізуємо різні структури системи керування синхронною генераторною установкою з компенсацією реактивної потужності за різними складовими в законах керування. Перехідний процес напруги генератора при включенні навантаження з різними законами наведено на рис. 4.10. На рис. 4.10, а і б показані процеси в системі без компенсації реактивної потужності для активно-індуктивного (а) та чисто активного (б) навантаження. Миттєва компенсація реактивної потужності з одночасним включенням конденсаторів та активно-індуктивного навантаження призводить до підвищення коливальності перехідного процесу, рис.4.10, в.

Введемо додатковий зворотний зв'язок по відхиленні напруги, тобто здійснимо U – компенсацію: $C_k = k_u(U_n - U_m(t))$. В результаті цього отримаємо суттєве зменшення коливальності перехідного процесу, рис.4.10, г. Якщо цей зв'язок не використовується, а компенсація проводиться за пропорційним (рис.4.10, д), інтегральним (рис.4.10, е) або ПІ - законом (рис.4.10, ж) від координат реактивної потужності $P_q(t)$, то коливальність перехідного процесу залишається досить високою. Застосування змішаних законів керування (4.9) з УП -, УІ - або УПІ - компенсацією потужності дозволяє отримати короточасні перехідні процеси з загасанням за 0.3 с та з перерегулюванням до 15 %, рис. 4.10, з, і, к.

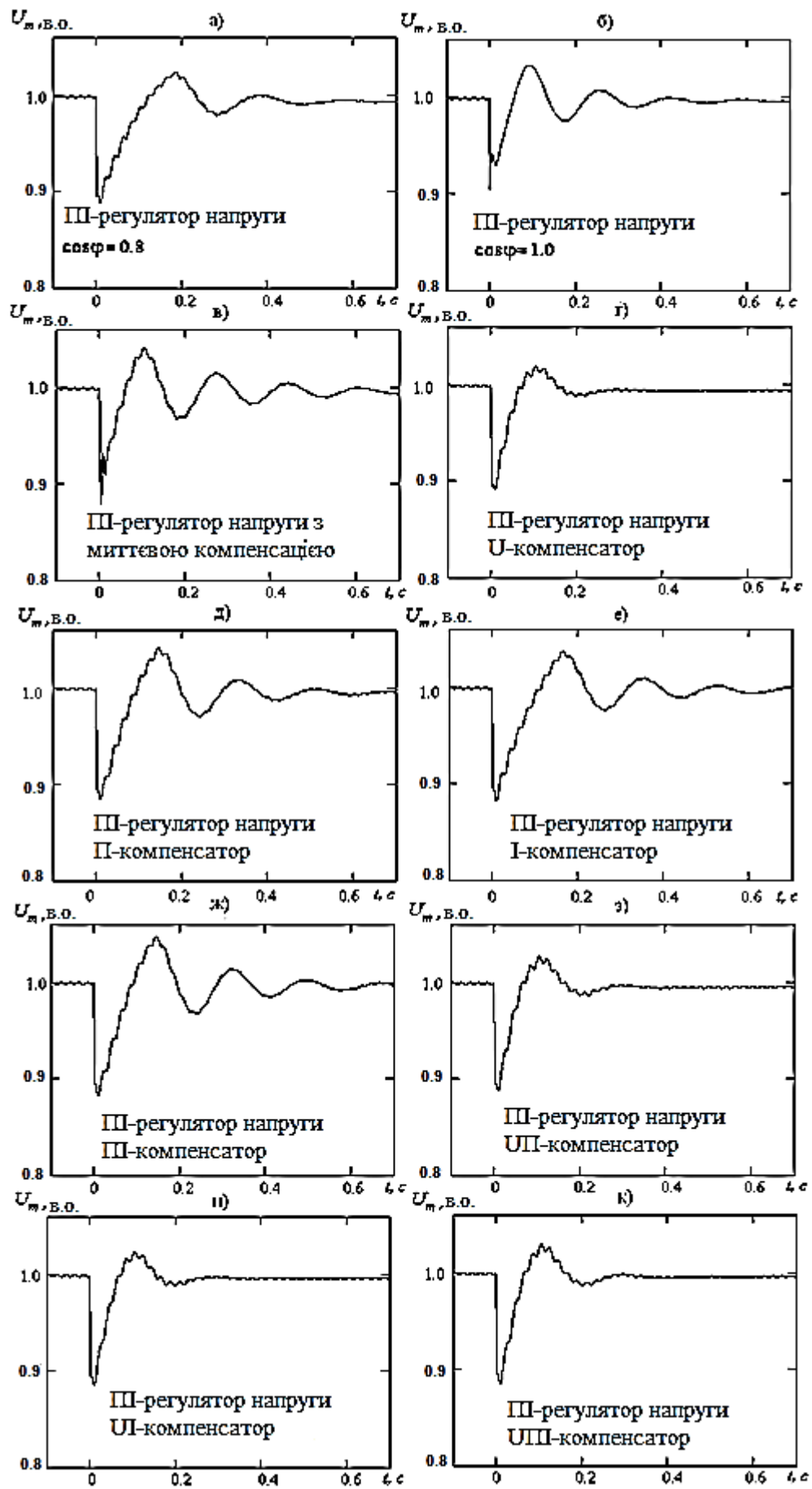


Рис. 4. 10. Включення навантаження в системі з різними законами керування

Введення в закон компенсації реактивної потужності сигналу по відхиленні напруги значно змінює характер перехідного процесу в системі стабілізації напруги синхронного генератора.

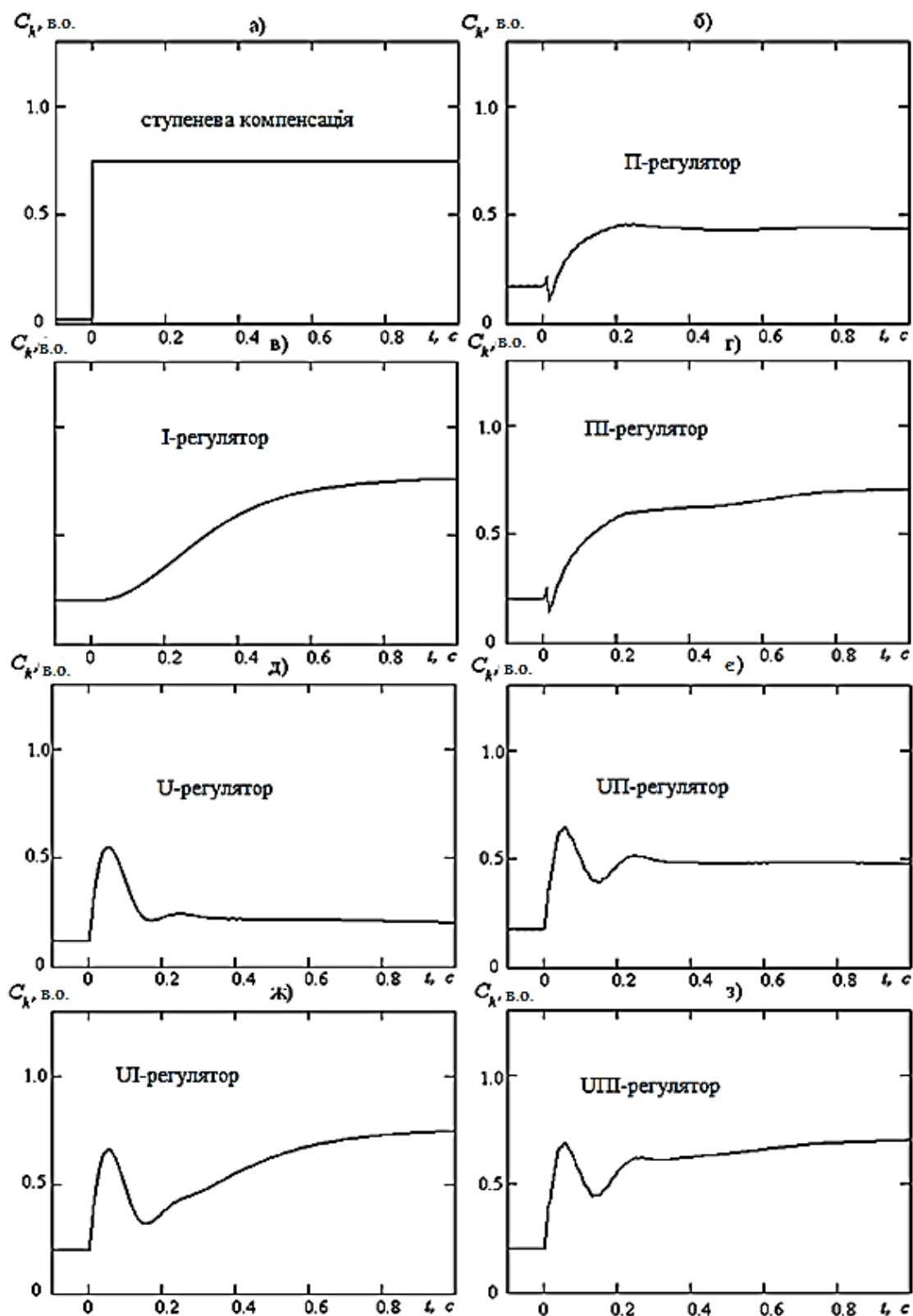


Рис. 4. 11 Зміна ємності в системі з різними законами керування

При різних законах компенсації величина ємності $C_k(t)$ змінюється по-різному. При миттєвій компенсації ємність змінюється ступінчасто на величину, яка визначається комутованим навантаженням, рис. 4.11, а. Величина ємності повинна бути розрахована заздалегідь. Як показано раніше, ступенева компенсація значно збільшує коливальність системи.

Застосування аналогових регуляторів з П – , І – і ПІ – законами компенсації реактивної потужності змінює ємність монотонно, рис. 4.11, б, в, г. Пропорційна складова не забезпечує повну компенсацію реактивної потужності та більш інтенсивно збільшує її величину, ніж інтегральна складова. ПІ – закон компенсації забезпечує рівність одиниці коефіцієнта потужності в сталому режимі.

Введення додаткового зворотного зв'язку по відхиленні напруги в закон компенсації реактивної потужності призводить до імпульсного сплеску компенсуючої ємності на початку перехідного процесу, рис. 4.11, д. Цей форсований керуючий вплив накладається на процес керування, викликаний лінійними складовими П – , І – або ПІ – законів керування за координатою реактивної потужності $P_k(t)$, рис. 4.11, е, ж, з.

Із перелічених законів компенсації реактивної потужності найбільш повним законом є УПІ – закон, (4.9), налагоджувальними параметрами якого є коефіцієнти цього закону: k_u, k_q, T_q .

Вибір оптимальних налагоджувальних значень УПІ – компенсатора може бути виконано шляхом мінімізації сумарного інтегрального показника якості перехідного процесу $I_{D\Sigma} = I_{Du} + I_{Dq}$, який враховує динамічні відхилення напруги (I_{Du}) і коефіцієнти потужності (I_{Dq}) в перехідному процесі.

Наприклад, для фіксованого значення коефіцієнта пропорційного закону $k_q = 2.0$ розрахуємо матрицю значень інтегрального показника $I_{D\Sigma}$ в області змінюваних параметрів k_u, T_q . Виберемо діапазон зміни коефіцієнта підсилення по напрузі $k_u = 0 \dots 8$ і сталої інтегрування $T_q = 0.1 \dots 0.45$ с. Матриця $I_{D\Sigma}$ дорівнює:

$$I_{D\Sigma} = \begin{bmatrix} 3.1 & 2.5 & 2.33 & 2.36 & 2.5 & 2.65 & 2.81 & 2.95 \\ 3 & 2.44 & 2.27 & 2.25 & 2.34 & 2.44 & 2.51 & 2.6 \\ 3 & 2.5 & 2.29 & 2.25 & 2.32 & 2.42 & 2.47 & 2.54 \\ 3 & 2.55 & 2.32 & 2.29 & 2.35 & 2.43 & 2.5 & 2.55 \\ 3.1 & 2.6 & 2.4 & 2.35 & 2.4 & 2.48 & 2.55 & 2.6 \\ 3.25 & 2.65 & 2.47 & 2.44 & 2.47 & 2.55 & 2.6 & 2.65 \\ 3.35 & 2.72 & 2.55 & 2.55 & 2.55 & 2.63 & 2.65 & 2.7 \\ 3.25 & 2.8 & 2.63 & 2.6 & 2.63 & 2.7 & 2.74 & 2.8 \end{bmatrix}$$

Мінімальне значення критерію оптимізації $I_{D\Sigma}$ досягається в точці $k_q = 2.0, k_u = 3$, і $T_q = 0.2$ с. На рис. 4.12 побудовано поверхні значень критерію $I_{D\Sigma}$ у вигляді поверхонь Surface і Contour Plot.

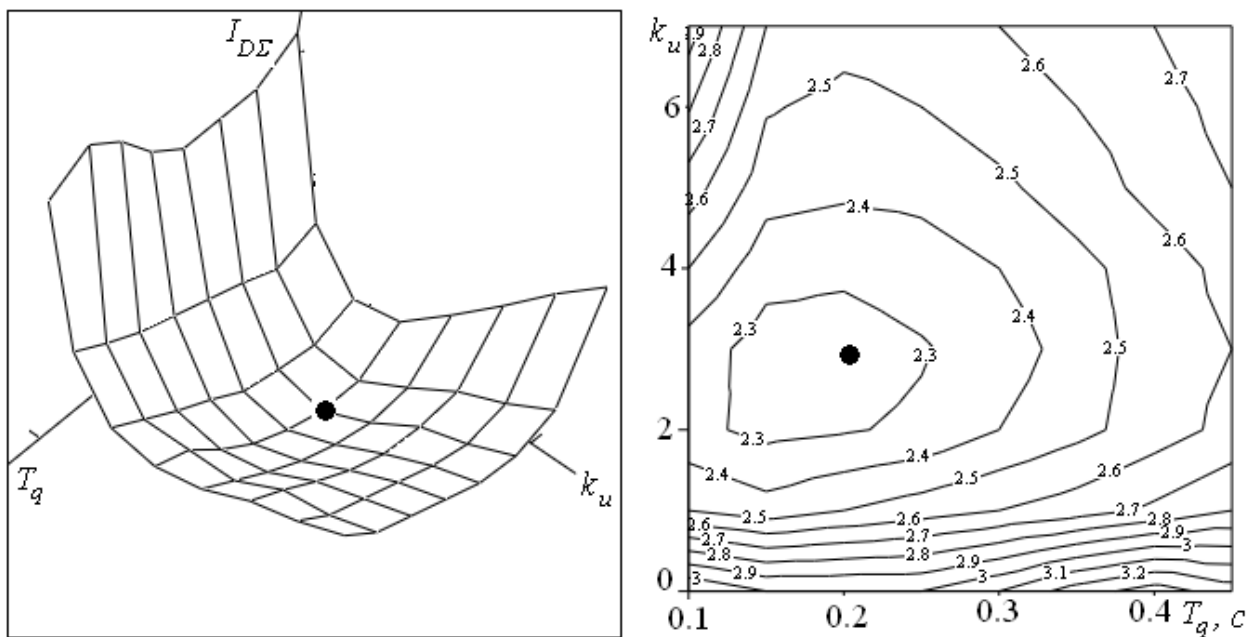


Рис. 4.12. Вибір оптимальних параметрів k_u, T_q системи стабілізації напруги синхронного генератора з компенсацією реактивної потужності

Виконане порівняння динамічних властивостей синхронної генераторної установки з компенсацією реактивної потужності, показало що ПІ-закон керування можна рекомендувати як оптимальний [122].

4.3 Аналіз імпульсних систем керування компенсацією реактивної потужності

Розглянемо процеси в судновій установці компенсації реактивної потужності з урахуванням їх дискретності за часом в елементах цієї системи: в давачах координат реактивної потужності і комутаторах компенсуючих конденсаторів. Процеси в системах УКРП з урахуванням квантування за часом доцільно порівняти з неперервними системами, розглянутими у попередньому розділі.

4.3.1 Вибір періоду комутації компенсуючих конденсаторів

За період дискретизації електронні пристрої комутації конденсаторів повинні встигнути зробити всі перемикання.

Як відомо, для безударного включення конденсаторів в мережу змінного струму, в момент включення миттєві значення напруги на конденсаторах і в мережі повинні бути однаковими [35, 122].

При знятті сигналу керування з тиристора комутуючого ключа, він закриється при зменшенні струму до нуля. У цей момент напруга комутованого конденсатора буде максимальною.

Розглянемо процеси безударного включення трифазної секції конденсаторів з нульовим проводом в трифазну мережу змінного струму за допомогою тиристорних або тиристорно-діодних ключів. З'єднання нульового проводу конденсаторної секції з нулем мережі робить процеси комутації в кожній фазі незалежними. На рис. 4.13 показані процеси періодичної комутації трифазної секції конденсаторів із змінною ємністю один раз за період мережі, $T_0 = 0.02$ с.

Сигнал керування тиристорами U_k синхронізований з початком позитивної півхвилі напруги U_a фази А. Він одночасно використовується для керування включенням тиристорів усіх трьох фаз.

Проте сигнали відмикання кожного тиристорного ключа подаються тільки при рівності напруги мережі та на відповідному конденсаторі: $U_{ca} = U_a$; $U_{cb} = U_b$; $U_{cc} = U_c$.

Моменти закриття тиристорів по фазах зсунуті один відносно одного на 120 градусів. Тиристири по фазах відкриваються також не одночасно. Для керованості комутацією необхідно, щоб всі процеси відпирання та замикання тиристорних ключів завершилися за час, менший, ніж період мережі T_0 . Процеси на рис. 4.13 задовольняють цій умові, тобто здійснювати перемикання компенсуючих конденсаторів можна один раз за період мережі або за більший час.

Вимірювання параметрів електроенергії технічно можливо здійснити і швидше, наприклад, за половину періоду мережі. Розглянемо процес комутації конденсаторів один раз за половину періоду мережі.

Нехай синхронізація управління здійснюється при переході напруги через нуль в позитивному напрямку. Зміна стану ємності необхідно проводити кожні півперіоду мережі. Припустимо, що в початковий момент часу тиристор фази A відкритий і через нього протікає струм. Після зняття сигналу керування струм припиниться через чверть періоду при його зменшенні до нуля. Напруга на конденсаторі фази A при цьому буде максимально негативною. Конденсатор буде розряджатися за експоненціальним законом, залишаючись негативним. У той же час сигнали на відпирання тиристорів приходять під час позитивної напруги фази A , рис. 4.14. Таким чином, порушується умова безударного відмикання тиристорів (при рівності напруги). Робота схеми стає неможливою.

Аналіз і порівняння процесів дискретно-імпульсної зміни керуючої ємності з різними періодами дискретизації, починаючи від половини періоду (див. рис.4.14) до десяти періодів змінного струму, показує, що найбільш ефективною системою являється УКРП із зміною ємності один раз за період мережі, $T_0 = 0.02$ с.

Коливальність в системі стабілізації напруги виявляється не гірше, ніж в неперервній системі, а час повної компенсації реактивної потужності становить не більше 0.4 с.

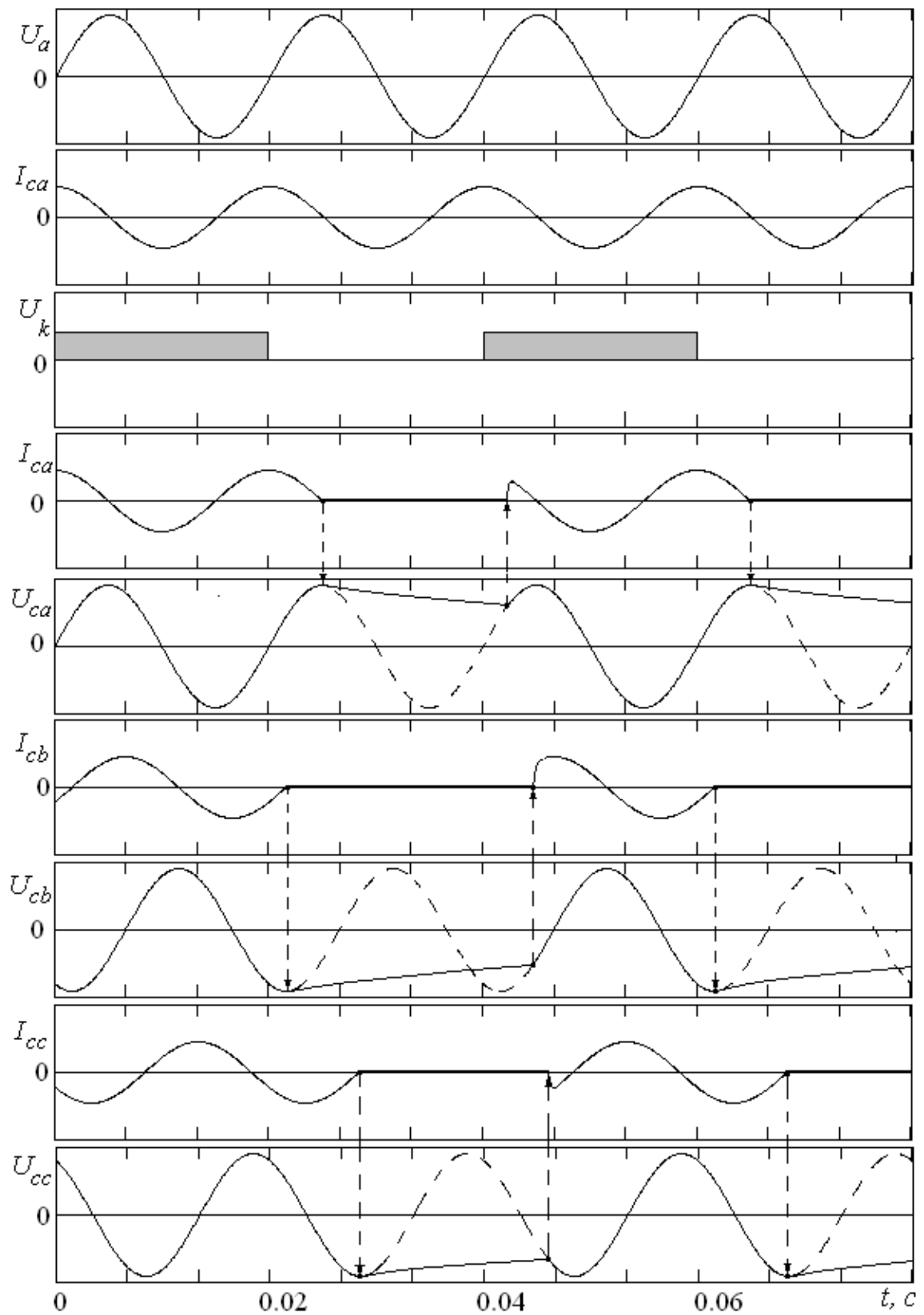


Рис. 4.13. Процеси включення і відключення конденсаторів у трифазній мережі з напівпровідниковими ключами

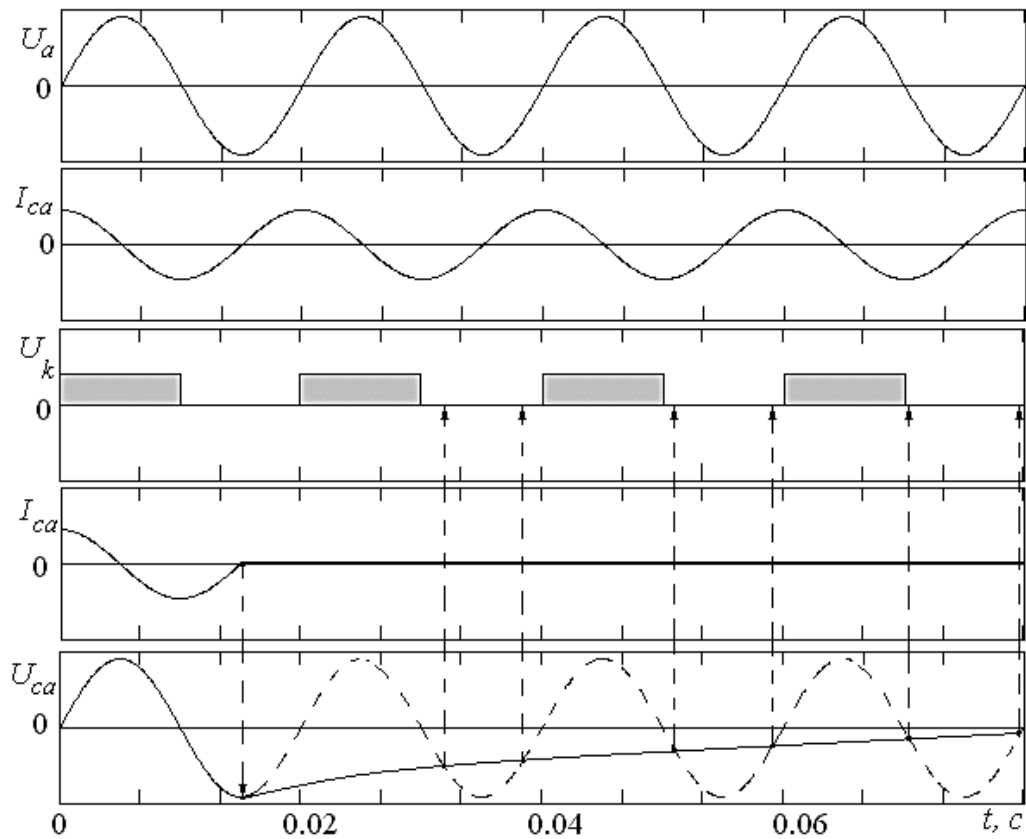


Рис. 4.14. Процеси керування конденсаторами за допомогою напівпровідникових ключів при перемиканні в кожні півперіоду мережі

При моделюванні систем, що містять трифазні секції комутованих конденсаторів потрібно враховувати особливості їх безударного включення за допомогою напівпровідникових тиристорних ключів, тобто моделювання цих процесів необхідно проводити для кожної фази окремо, що як мінімум в три рази збільшує кількість рівнянь моделі конденсаторного пристрою [122].

4.3.2 Реалізація імпульсних законів керування компенсацією реактивної потужності

Розглянемо аналоговий закон компенсації реактивної потужності (4.9) в генераторній установці з синхронним генератором: ПІ – регулятор за координатою реактивної потужності $P_q(t)$ доповнюється пропорційною складовою відхилення модуля вектору напруги генератора $\Delta U_m(t) = U_n - U_m(t)$.

Обробка результатів вимірювання регульованої координати $P_q(t)$ і відхилення напруги $\Delta U_m(t)$ здійснюється протягом певного часу з розрахунком середнього значення за період вимірювання. Безударна комутація трифазних секцій компенсуючих конденсаторів також здійснюється протягом певного часу. Як показано в попередніх розділах, цей період зміни ємності становить не менше періоду електричної мережі T_0 .

Систему керування реактивної потужності генератора доцільно розглядати як імпульсну з періодом дискретності, рівному періоду електричної мережі T_0 [133]. Дискретний закон отримаємо заміною аналогового часу в (4.9) на квантований $t = nT_0$, де n – натуральне число. Отже:

$$C_k(nT_0) = k_u \Delta U_m(nT_0) + k_q \cdot P_q(nT_0) + \frac{k_q}{T_q} \int_0^t P_q(nT_0) dt$$

Введемо позначення дискретних змінних

$$C_n^*(t) = C_k(nT_0); \quad \Delta U_n^*(t) = \Delta U_m(nT_0); \quad P_n^*(t) = P_q(nT_0)$$

Тоді дискретно-імпульсний закон компенсації має вигляд:

$$C_n^*(t) = k_u \Delta U_n^*(t) + k_q \cdot P_n^*(t) + \frac{k_q}{T_q} \int_0^t P_n^*(t) dt \quad (4.10)$$

У виразі (4.10) аналогову інтегральну функцію слід замінити сумою дискретних величин. Позначимо інтегральну складову закону (4.10):

$$C_{in}^*(t) = \frac{k_q}{T_q} \int_0^t P_n^*(t) dt \quad (4.11)$$

На попередньому кроці інтеграл (4.11) дорівнює:

$$C_{i(n-1)}^*(t) = \frac{k_q}{T_q} \int_0^{t-T_0} P_{n-1}^*(t) dt$$

На наступному кроці представимо прирощення інтегралу площею трапеції :

$$\begin{aligned}
C_{in}^*(t) &= \frac{k_q}{T_q} \int_0^t P_n^*(t) dt = \frac{k_q}{T_q} \int_0^{t-T_0} P_{n-1}^*(t) dt + \frac{k_q T_0}{T_q} \cdot \frac{P_{n-1}^*(t) + P_n^*(t)}{2} = \\
&= C_{i(n-1)}^*(t) + \frac{k_q T_0}{T_q} \cdot \frac{P_{n-1}^*(t) + P_n^*(t)}{2}
\end{aligned} \tag{4.12}$$

або площею прямокутника:

$$C_{in}^*(t) = \frac{k_q}{T_q} \int_0^t P_n^*(t) dt = \frac{k_q}{T_q} \int_0^{t-T_0} P_{n-1}^*(t) dt + \frac{k_q T_0}{T_q} \cdot P_n^*(t) = C_{i(n-1)}^*(t) + \frac{k_q T_0}{T_q} \cdot P_n^*(t) \tag{4.13}$$

У виразах (4.12) і (4.13) інтегральна функція замінена на попереднє значення інтегралу (4.11) $C_{i(n-1)}^*(t)$, яке обчислюється на кроці $n - 1$ шляхом підсумовування з регульованою змінною $P_n^*(t)$.

Розрахунок інтегралу за формулою прямокутників (4.13) простіше, оскільки вимагає тільки знання поточного значення $P_n^*(t)$. У формулі з використанням площі трапеції (4.12) необхідне підсумовування поточного $P_n^*(t)$ та попереднього значення $P_{n-1}^*(t)$ регульованої змінної. Однак використання формули (4.13) призводить до більш інтенсивних регулюючих впливів в перехідних процесах, що може збільшити коливальні властивості синтезованої системи.

Далі розрахуємо значення дискретного керуючого сигналу $C_n^*(t)$, замінивши у виразі (4.10) інтеграл на його попереднє значення $C_{n-1}^*(t)$. Для цього використаємо вирази поточного та попереднього значення $C_n^*(t)$.

$$\begin{aligned}
C_n^*(t) &= k_u \Delta U_n^*(t) + k_q P_n^*(t) + \frac{k_q}{T_q} \int_0^t P_n^*(t) dt = k_u \Delta U_n^*(t) + k_q P_n^*(t) + C_{in}^*(t) = \\
&= k_u \Delta U_n^*(t) + k_q P_n^*(t) + C_{i(n-1)}^*(t) + \frac{k_q T_0}{T_q} \cdot \frac{P_{n-1}^*(t) + P_n^*(t)}{2}.
\end{aligned} \tag{4.14}$$

$$C_{n-1}^*(t) = k_u \Delta U_{n-1}^*(t) + k_q P_{n-1}^*(t) + \frac{k_q}{T_q} \int_0^{t-T_0} P_{n-1}^*(t) dt = k_u \Delta U_{n-1}^*(t) + k_q P_{n-1}^*(t) + C_{i(n-1)}^*(t).$$

Виключимо з першого рівняння величину $C_{i(n-1)}^*(t)$, визначивши її з другого рівняння: $C_{i(n-1)}^*(t) = C_{n-1}^*(t) - k_u \Delta U_{n-1}^*(t) - k_q P_{n-1}^*(t)$.

Получимо:

$$\begin{aligned}
C_n^*(t) &= k_u \Delta U_n^*(t) + k_q P_n^*(t) + C_{n-1}^*(t) - k_u \Delta U_{n-1}^*(t) - k_q P_{n-1}^*(t) + \frac{k_q T_0}{T_q} \cdot \frac{P_{n-1}^*(t) + P_n^*(t)}{2} = \\
&= C_{n-1}^*(t) + k_u \Delta U_n^*(t) - k_u \Delta U_{n-1}^*(t) + k_q \left(1 + \frac{T_0}{2T_q}\right) \cdot P_n^*(t) + k_q \left(\frac{T_0}{2T_q} - 1\right) P_{n-1}^*(t)
\end{aligned} \quad (4.15)$$

Вираз (4.15) отримано з використанням формули площі трапеції і містить п'ять дискретних складових змінних на поточному та попередньому кроці керування. Використання формули площі прямокутників не зменшує кількість змінних.

$$C_n^*(t) = k_u \Delta U_n^*(t) + k_q P_n^*(t) + C_{i(n-1)}^*(t) + \frac{k_q T_0}{T_q} \cdot P_n^*(t).$$

$$C_{n-1}^*(t) = k_u \Delta U_{n-1}^*(t) + k_q P_{n-1}^*(t) + C_{i(n-1)}^*(t).$$

$$\text{Звідки отримаємо } C_{i(n-1)}^*(t) = C_{n-1}^*(t) - k_u \Delta U_{n-1}^*(t) - k_q P_{n-1}^*(t).$$

Виключаючи величину $C_{i(n-1)}^*(t)$ з першого рівняння, отримаємо

$$C_n^*(t) = k_u \Delta U_n^*(t) + k_q P_n^*(t) + C_{n-1}^*(t) - k_u \Delta U_{n-1}^*(t) - k_q P_{n-1}^*(t) + \frac{k_q T_0}{T_q} \cdot P_n^*(t)$$

$$C_n^*(t) = C_{n-1}^*(t) + k_u \Delta U_n^*(t) - k_u \Delta U_{n-1}^*(t) + k_q \left(1 + \frac{T_0}{T_q}\right) \cdot P_n^*(t) - k_q P_{n-1}^*(t) \quad (4.16)$$

Вирази дискретного керування (4.15) (4.16) можуть бути спрощені, якщо замість значення керування на попередньому кроці $C_{n-1}^*(t)$ використовувати дискретне значення інтеграла $C_{i(n-1)}^*(t)$.

$$C_n^*(t) = k_u \Delta U_n^*(t) + k_q P_n^*(t) + C_{in}^*(t)$$

$$C_{in}^*(t) = C_{i(n-1)}^*(t) + \frac{k_q T_0}{T_q} P_n^*(t).$$

(4.17)

Підставивши $C_{in}^*(t)$ з другого рівняння в перше, одержимо

$$C_n^*(t) = k_u \Delta U_n^*(t) + k_q \left(1 + \frac{T_0}{T_q}\right) P_n^*(t) + C_{i(n-1)}^*(t) \quad (4.18)$$

Дискретний закон керування містить три дискретні змінні замість п'яти у (4.15) та (4.16).

При отриманні виразу (4.18) використана формула площі прямокутників (4.13). Розрахунок закону керування за формулою площі трапецій (4.12) збільшує кількість змінних до чотирьох, (4.19).

$$C_n^*(t) = k_u \Delta U_n^*(t) + k_q P_n^*(t) + C_{in}^*(t)$$

$$C_{in}^*(t) = C_{i(n-1)}^*(t) + \frac{k_q T_0}{T_q} \cdot \frac{P_{n-1}^*(t) + P_n^*(t)}{2}.$$

Виключаючи $C_{in}^*(t)$, одержимо:

$$C_n^*(t) = k_u \Delta U_n^*(t) + k_q \left(1 + \frac{T_0}{2T_q}\right) P_n^*(t) + k_q \frac{T_0}{2T_q} P_{n-1}^*(t) + C_{i(n-1)}^*(t) \quad (4.19)$$

У загальному вигляді отримані дискретні закони керування можуть бути подані у вигляді дискретного фільтра:

$$C_n^*(t) = \sum_{i=0}^L k_{ui} \Delta U_{n-i}^*(t) + \sum_{i=0}^M k_{qi} P_{n-i}^*(t) + \sum_{i=1}^K C_{n-i}^*(t), \quad (4.20)$$

де k_{ui}, k_{qi} – налагоджувальні коефіцієнти дискретного регулятора.

Конкретний вираз дискретного закону (4.18) буде мати вигляд:

$$C_n^*(t) = k_u \Delta U_n^*(t) + k_q \cdot P_n^*(t) + C_{in}^*(t); C_{in}^*(t) = C_{i(n-1)}^*(t) + k_t \cdot P_n^*(t), \quad (4.21)$$

де k_u, k_q, k_t – сталі коефіцієнти.

Отже, імпульсний закон керування ємністю УКРП

$$C_n^*(t) = k_u \Delta U_n^*(t) + k_q \cdot P_n^*(t) + C_{n-1}^* \quad (4.22)$$

реалізує аналог неперервного UI – закону керування компенсуючою ємністю [133, 138]. При використанні попереднього значення ємності $C_{n-1}^*(t)$ імпульсний закон має тільки два налагоджувальних параметра: k_u, k_q .

4.3.3 Аналіз та оптимізація лінійних імпульсних законів керування компенсацією реактивної потужності

У цьому розділі розглянемо вплив сталих налагоджувальних коефіцієнтів k_u, k_q, k_t імпульсних законів керування компенсацією реактивної потужності (4.21) (4.22) на якісні показники системи.

Використані інтегральні складові в цих законах забезпечують нульовий статизм регулювання, тобто відсутність відхилень напруги від номінального значення і коефіцієнта потужності від одиниці в сталому режимі.

Величину і тривалість динамічних відхилень в перехідному процесі будемо оцінювати за величиною площі під кривими перехідних процесів напруги $U_m(t)$ і коефіцієнта потужності $\cos \varphi$, використовуючи введені раніше інтегральні критерії $I_{Du}, I_{Dq}, I_{D\Sigma}$.

Параметричну оптимізацію проведемо за критерієм мінімізації інтегрального показника якості $I_{D\Sigma}$:

$$I_{\text{опт}} = \min_{k_i} I_{D\Sigma} = \min_{k_i} \left\{ \sum_{n=1}^{E(T_{\text{кр}}/T_0)} |U_n - U_{\text{ср}}(nT_0)| + \sum_{n=1}^{E(T_{\text{кр}}/T_0)} (1 - \cos \varphi_n) \right\} \quad (4.23)$$

Для закону керування (4.21) оптимальними налагоджувальними параметрами будуть значення k_u, k_q, k_t , при яких функціонал $I_{D\Sigma}$ прийме мінімальне значення.

Пошук мінімуму $I_{\text{опт}}$ в просторі трьох параметрів виконаний на комп'ютерній моделі системи з законом керування (4.21) шляхом повного перебору параметрів в підпросторах, близьких до точки екстремуму.

Аналіз градієнтів функціоналу $I_{D\Sigma}$ по кожному з параметрів оптимізації k_u, k_q, k_t показує слабкий вплив коефіцієнта k_q на величину $I_{D\Sigma}$. Так, поблизу точки екстремуму значення критерію $I_{D\Sigma}$ змінюється з 2.60 до 2.69 при зміні k_q від 0 до 0.1, що практично не впливає на перехідні процеси, які побудовані для цих значень, рис. 4.15, б та рис. 4. 15, в.

Процеси, наведені на рис. 4.15 побудовані для наступних точок простору налагоджувальних параметрів k_u, k_q, k_t :

рис. 4.15, а – (0, 0.2, 0);

рис. 4.15, б – (1.3, 0.2, 0);

рис. 4.15, в – (1.3, 0.2, 0.1).

На рис.4.15, а наведені процеси в системі компенсації з інтегральним (І) законом керування за величиною реактивної провідності навантаження $P_q(t) = Y_q$.

На рис. 4.15, б показані процеси в системі з пропорційним (U) законом компенсації за напругою $\Delta U_m(t)$ та інтегральним (I) законом за провідністю навантаження Y_q .

На рис. 4.15, в наведені процеси в системі з пропорційним (U) законом компенсації за напругою $\Delta U_m(t)$ і пропорційно-інтегральним (ПІ) законом за провідністю навантаження Y_q .

Як видно з рис. 4.15, оптимальні процеси в системі з UI – та з UПІ – законами компенсації практично не відрізняються.

Виконаємо параметричну оптимізацію в системі з UI – імпульсним законом компенсації реактивної потужності синхронного генератора, приймаючи в законі (4.21)[138]:

$$C_n^*(t) = k_u \Delta U_n^*(t) + C_{in}^*(t); C_{in}^*(t) = C_{i(n-1)}^*(t) + k_t \cdot P_n^*(t) \quad (4.24)$$

У тривимірному просторі побудуємо залежність $I_{D\Sigma} = f(k_u, k_t)$ за допомогою розробленої комп'ютерної програми. Обираємо наступні діапазони і крок зміни налагоджувальних параметрів $k_u = 1.1 \dots 1.4, k_t = 0.05 \dots 0.20, \Delta k_u = 0.1, \Delta k_t = 0.05$.

Розрахована матриця значень має вигляд:

$$I_{D\Sigma} = \begin{matrix} k_t & 0.05 & 0.10 & 0.15 & 0.20 & k_u \\ & \begin{bmatrix} 3.41 & 4.38 & 4.21 & 4.2 \\ 3.3 & 2.92 & 2.77 & 4.17 \\ 3.2 & 2.83 & 2.68 & 2.73 \\ 3.08 & 2.64 & 2.64 & 2.65 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 1.1 \\ 1.2 \\ 1.3 \\ 1.4 \end{matrix} \end{matrix}$$

Мінімальне значення критерію оптимізації $I_{D\Sigma}$ досягається в точці $k_t = 0.15$ і $k_u = 1.4$.

Проведемо аналогічну процедуру параметричної оптимізації для імпульсного закону компенсації реактивної потужності синхронного генератора виду (4.22) $C_n^*(t) = k_u \Delta U_n^*(t) + k_q \cdot P_n^*(t) + C_{n-1}^*$ в області параметрів (k_u, k_q) .

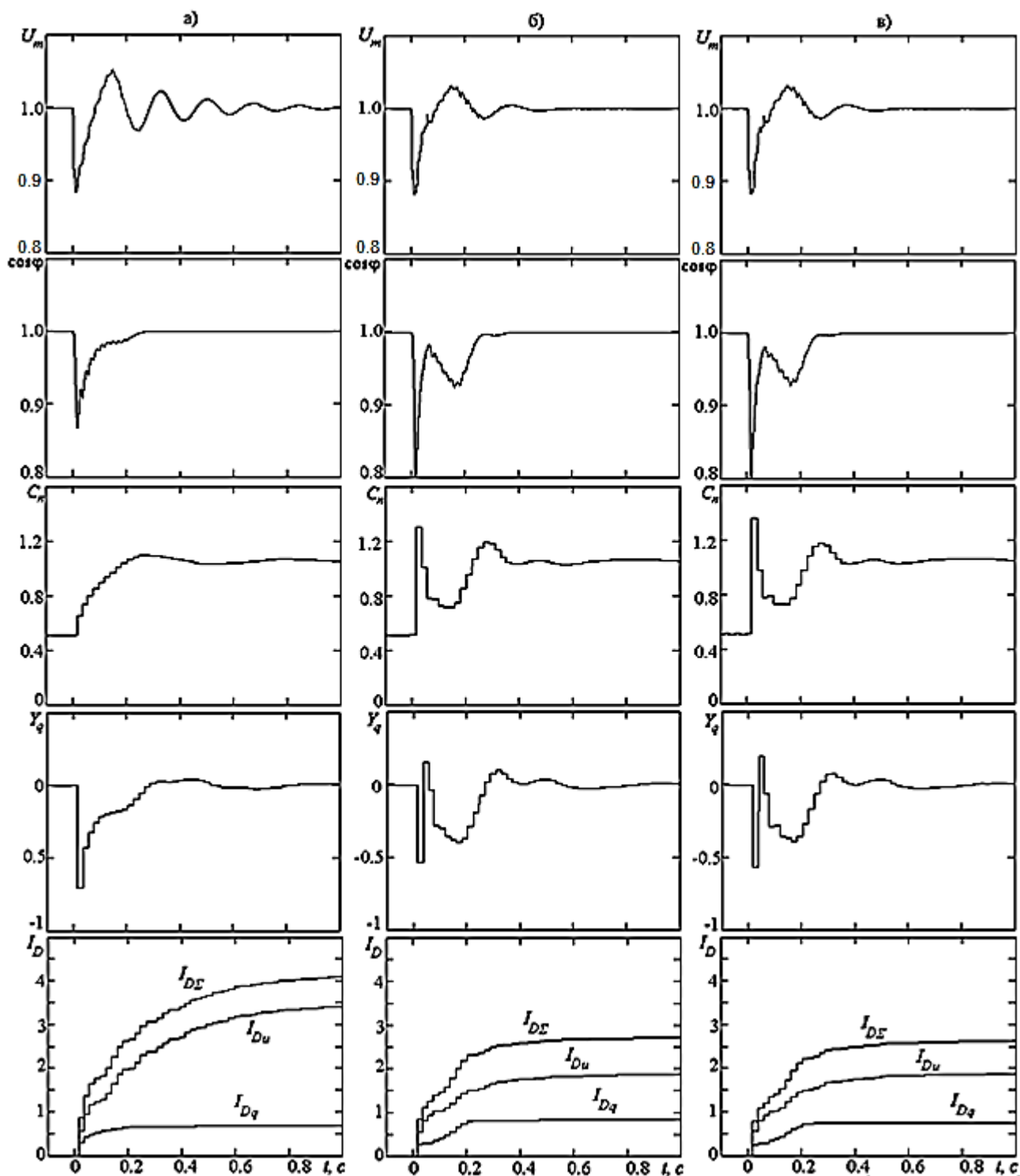


Рис. 4.15. Оптимальні перехідні процеси в системах з різними імпульсними законами компенсації реактивної потужності автономного синхронного генератора: а) I – закон; б) UI – закон; в) UPI – закон

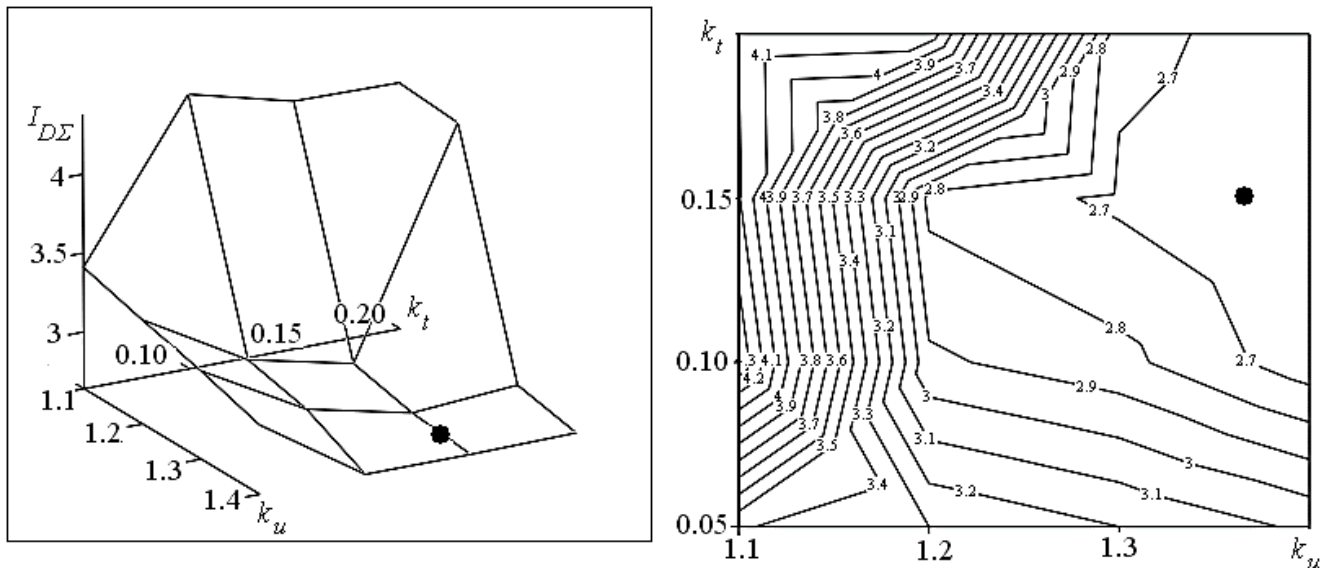


Рис. 4. 16 Значення критерію $I_{D\Sigma}$ у вигляді поверхні Surface та Contour Plot

Виберемо наступні крок та діапазон зміни налагоджувальних параметрів:

$$\Delta k_u = 0.2, k_u = 0.5 \dots 1.3 \text{ і } \Delta k_q = 0.2, k_q = 0.3 \dots 0.9.$$

Матриця розрахованих значень функціоналу $I_{D\Sigma} = f(k_u, k_q)$ дорівнює:

$$I_{D\Sigma} = \begin{array}{c} k_q \\ \begin{array}{cccc} 0.3 & 0.5 & 0.7 & 0.9 \\ \left[\begin{array}{cccc} 3.9 & 3.79 & 3.82 & 3.94 \\ 3.77 & 3.65 & 3.7 & 3.84 \\ 3.77 & 3.62 & 3.7 & 3.83 \\ 3.75 & 3.62 & 3.67 & 3.77 \\ 3.7 & 3.64 & 3.68 & 3.76 \end{array} \right] \\ k_u \\ \begin{array}{c} 0.5 \\ 0.7 \\ 0.9 \\ 1.1 \\ 1.3 \end{array} \end{array}$$

Мінімум функціоналу $I_{D\Sigma}$ досягається в точці $k_q = 0.5$ та $k_u = 1.0$.

Поверхні $I_{D\Sigma} = f(k_u, k_q)$ побудовані на рис. 4. 17.

Виконаємо порівняння імпульсних законів з оптимізованими налагоджувальними параметрами.

Аналіз перехідних процесів у системі з трьома різними структурами регуляторів з оптимізованими параметрами, наведеними на рис. 4.15, дозволяють зробити наступні висновки.

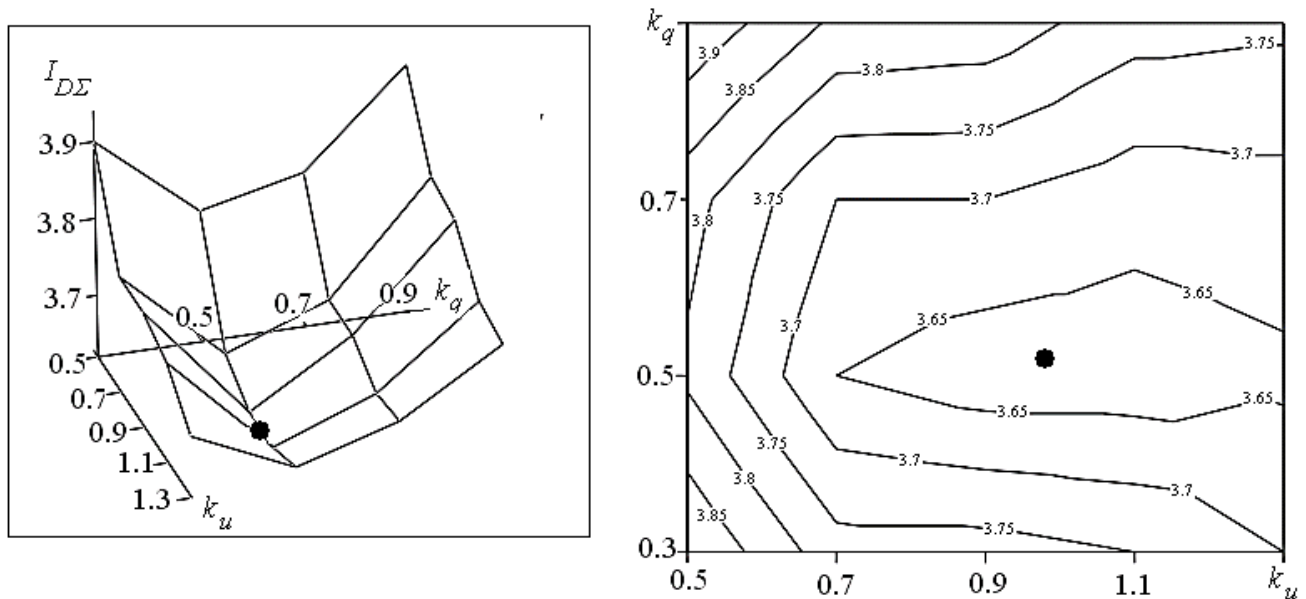


Рис. 4. 17. Тривимірні зображення функціоналу $I_{D\Sigma}$ у вигляді поверхні Surface і Contour Plot

Керування ємністю конденсаторів тільки по одній з координат реактивної потужності $P_q(t)$, рис. 4.15, а, призводить до підвищення коливальних властивостей системи стабілізації напруги генератора. У той же час вдається досягти мінімального часу динамічного відхилення коефіцієнта потужності.

Введення в закон керування ємності компенсуючих конденсаторів додаткового зворотного зв'язку за відхиленням напруги $\Delta U_m(t)$ дозволяє досягти поліпшення коливальних властивостей в каналі регулювання напруги навіть краще, ніж без застосування УКРП. Однак перехідний процес компенсації реактивної потужності трохи затягується: з 0.25 до 0.4 с.

Час відновлення одиничного значення коефіцієнта потужності є цілком прийнятним, тому вирішальним якісним показником при виборі закону керування є коливання в контурі стабілізації напруги синхронного генератора. Введення додаткового зворотного зв'язку за напругою являється виправданим.

Порівняння процесів у системі з UI – законом (рис.4. 15, б) та з UП – законом (рис.4. 15, в) показує зовсім невелику перевагу більш складного закону. Тому використання пропорційної складової координати реактивної потужності на додаток до інтегральної складової є невиправданим.

Всі три розглянутих закони містять інтеграл від координати реактивної потужності. Якщо використовувати тільки пропорційний компенсатор, то задовільних процесів отримати не вдається. Компенсація коефіцієнта потужності до величини, близької до одиниці вимагає великого коефіцієнта підсилення k_q , при якому система стабілізації напруги практично втрачає стійкість.

Порівняння оптимізованих законів керування (4.21) і (4.22) показує перевагу першого. Мінімальне значення інтегрального критерію якості (4.23) при використанні закону (4.21) дорівнює $I_{\text{опт}} = 2.64$, а при використанні закону (4.22) $I_{\text{опт}} = 3.62$.

Таким чином, найкращою структурою являється система компенсації з імпульсним УІ – регулятором реактивної потужності.

4.3.4 Аналіз оптимальних імпульсних законів компенсації реактивної потужності з різним періодом комутації конденсаторів

Період комутації T_0 в імпульсних системах компенсації може становити від одного до десяти періодів змінної напруги. Для кожного значення T_0 оптимальні налагоджувальні параметри будуть різними.

Проведемо порівняння оптимальних імпульсних законів компенсації реактивної потужності з різним періодом комутації конденсаторів в діапазоні від одного до десяти періодів мережі $T_0 = 1 \dots 10T_c$.

На рис. 4.18 і 4.19 приведені перехідні процеси включення 50 % активно-індуктивного навантаження в оптимізованих генераторних установках з імпульсним УІ – регулятором реактивної потужності при різних періодах комутації T_0 . Попередньо для кожного значення T_0 була проведена параметрична оптимізація системи компенсації.

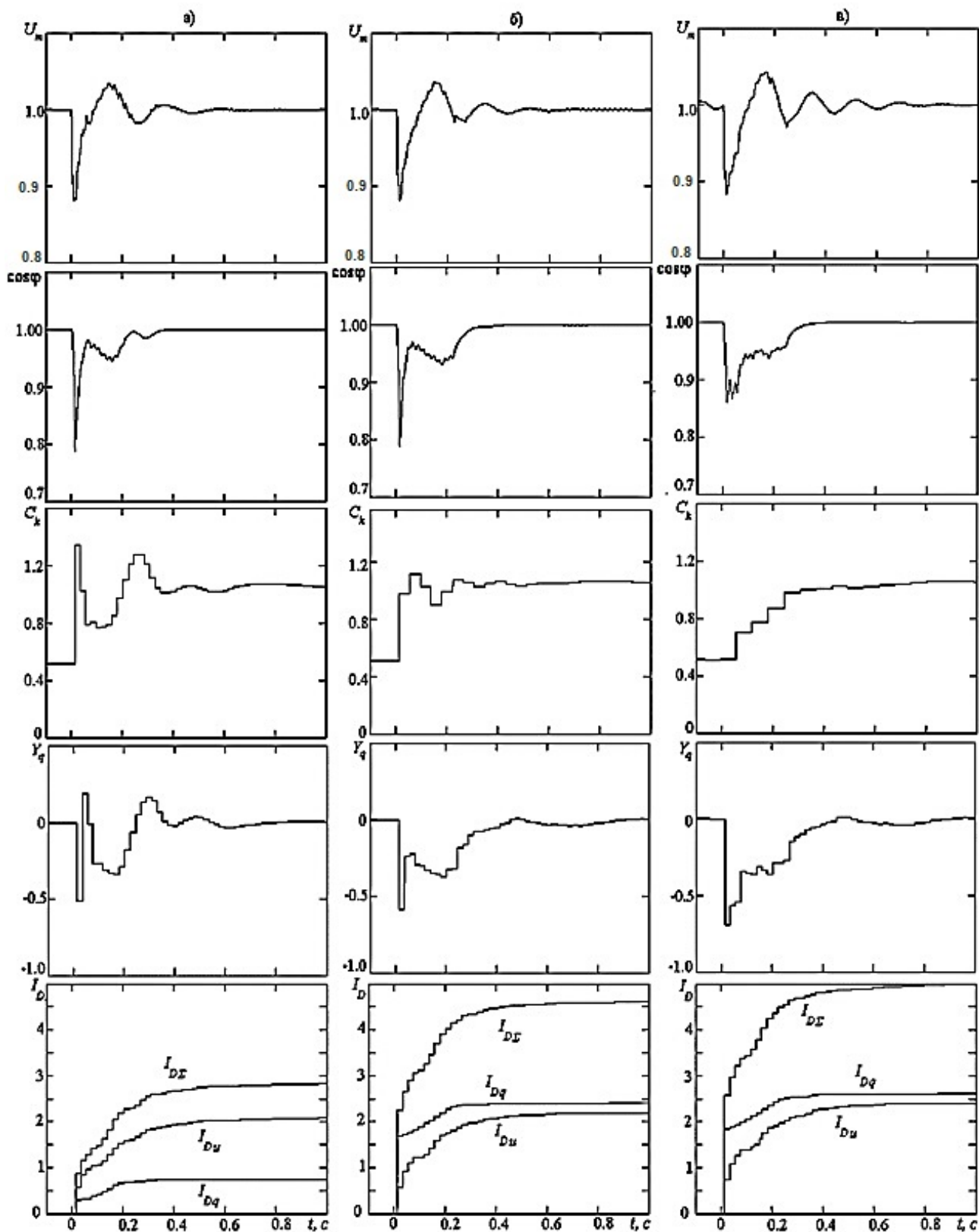


Рис. 4. 18. Оптимальні перехідні процеси в системах з різними періодами дискретизації: а) $T_0 = 0.02$ с; б) $T_0 = 0.04$ с; в) $T_0 = 0.06$ с

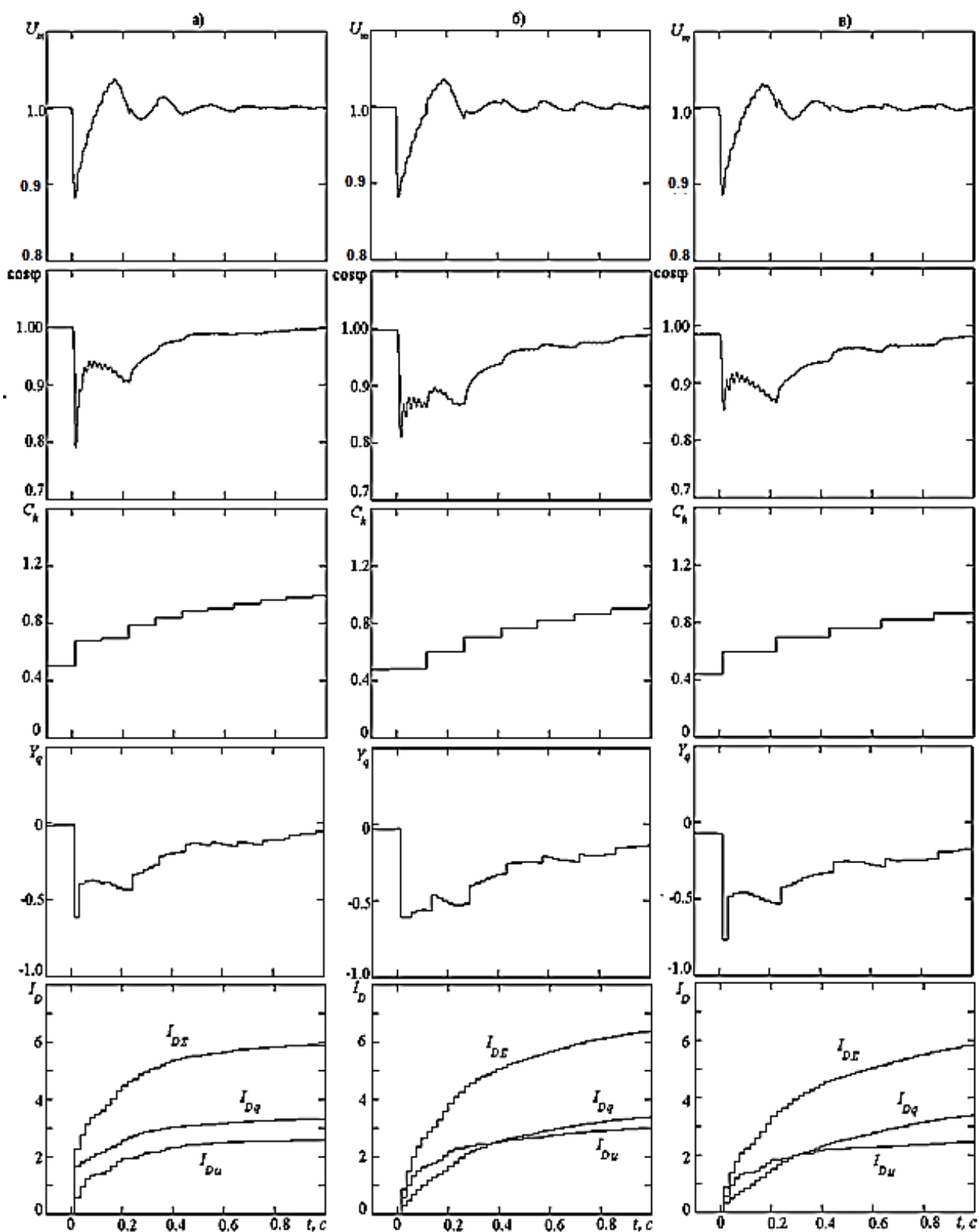


Рис. 4. 19. Оптимальні перехідні процеси в системах з різними періодами дискретизації: а) $T_0 = 0.1$ с; б) $T_0 = 0.14$ с; в) $T_0 = 0.2$ с

Визначено оптимальні налагоджувальні параметри $(k_u, k_t)_{\text{опт}}$ для кожного значення періоду дискретності $T_0 = n_c T_c$. Для кожного значення T_0 оптимальні налагоджувальні параметри суттєво відрізняються. Залежності $(k_u)_{\text{опт}}$ і $(k_t)_{\text{опт}}$ від n_c приведені на рис. 4. 20.

При збільшенні періоду дискретності вплив зворотного зв'язку за напругою генератора зменшується і в подальшому він стає неефективним. Оптимальне значення коефіцієнта зворотного зв'язку за напругою зменшується від 1.3 до нуля при періоді дискретизації більшому, ніж $T_0 \geq 7T_c$.

Коефіцієнт інтегрального зворотного зв'язку за параметром реактивної потужності $(k_t)_{\text{опт}}$ мало залежить від періоду дискретності імпульсної системи T_0 , див. рис. 4. 20.

При збільшенні періоду дискретності $T_0 = 1 \dots 10T_c$ час компенсації коефіцієнта потужності зростає від 0.3 до 1.2 секунд. Ця залежність розрахована і наведена на рис. 4.21.

Час компенсації більше однієї секунди може не задовольнити потреби енергетичних систем у динамічній компенсації реактивної потужності. Особливо це стосується таких динамічних режимів, як пуск потужних електроприводів або режими пульсуючого, змінного навантаження. У таких системах період дискретизації повинен вибиратися мінімально можливим, $T_0 = T_c$.

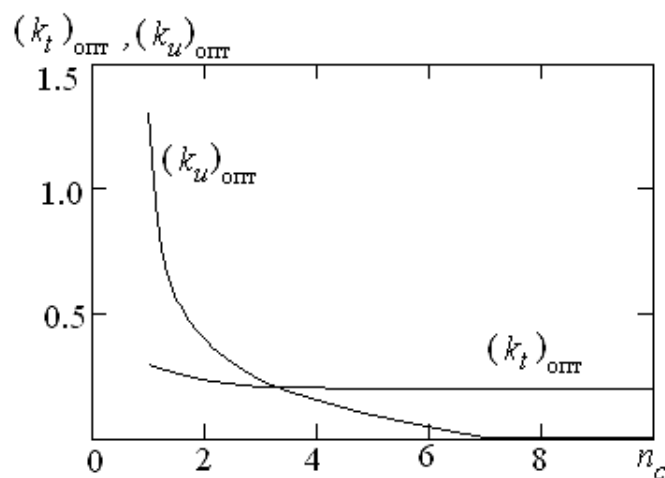


Рис. 4. 20. Залежність оптимальних налагоджувальних параметрів закону компенсації реактивної потужності (4.21) від періоду дискретності імпульсної системи

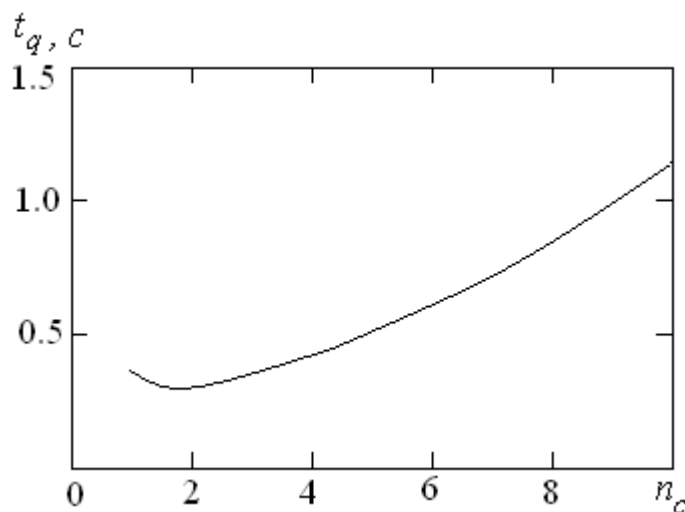


Рис. 4. 21. Залежність часу компенсації реактивної потужності від періоду дискретності імпульсної системи

Мінімальні значення інтегральних критеріїв якості перехідних процесів за напругою I_{Du} і за коефіцієнтом потужності I_{Dq} при різних періодах дискретизації T_0 наведено на рис. 4.22.

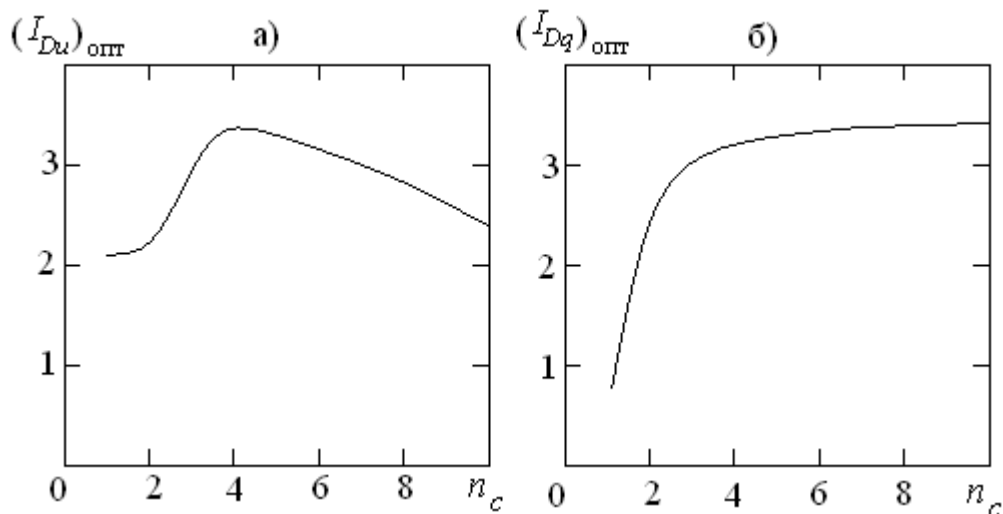


Рис. 4. 22 Залежність оптимальних значень інтегральних критеріїв якості перехідних процесів за напругою I_{Du} та за коефіцієнтом потужності I_{Dq} від періоду дискретності імпульсної системи компенсації реактивної потужності

Збільшення періоду дискретності в промислових УКРП застосовується для зниження коливальних властивостей систем стабілізації напруги, [25, 26, 96].

Таке зниження I_{Du} спостерігається при $T_0 \geq 4T_c$, див. рис. 4.22, а. Однак зниження коливальних властивостей системи стабілізації напруги можна досягти введенням зворотного зв'язку за напругою при мінімальному періоді дискретності $T_0 = T_c$.

Значне збільшення площі під кривою відхилення коефіцієнта потужності від одиниці I_{Dq} спостерігається при збільшенні періоду дискретності від $T_0 = T_c$ до $T_0 = 3T_c$, див. рис. 4.22, б.

Отже, аналіз якісних показників системи компенсації реактивної потужності показує, що найкращі властивості має система з мінімальним періодом дискретності $T_0 = T_c$ та ПІ - законом керування вигляду (4.24)[131, 133]. В якості координати реактивної потужності P_q ефективно використовувати величину реактивної провідності навантаження Y_q .

4.4 Висновки до розділу 4.

1. Система керування синхронною генераторною установкою з компенсацією реактивної потужності навантаження повинна розглядатись в єдиній динамічній системі двох взаємопов'язаних підсистем: стабілізації напруги синхронного генератора та компенсації реактивної потужності навантаження.

2. Якщо така система стабілізації напруги синхронного генератора з компенсацією реактивної потужності має два аналогові ПІ – регулятора напруги та реактивної потужності з двома парами налагоджувальних параметрів, k_p, T_i та k_q, T_q , то критерієм для налаштування системи може бути обраний сумарний інтегральний критерій $I_{D\Sigma}$ (4.8) відхилення напруги генератора від заданої. Оптимізація системи пошуковими методами шляхом побудови залежностей $I_{D\Sigma}$ в області параметрів, що налаштовуються, дозволяє визначити оптимальні параметри ПІ – регуляторів.

3. Введення в закон компенсації реактивної потужності сигналу по відхиленні напруги значно змінює характер перехідного процесу в системі стабілізації напруги синхронного генератора. Так доповнення систем керування додатковим зворотнім зв'язком за напругою (U-компенсація) призводить до імпульсного

сплеску компенсуючої ємності на початку перехідного процесу. Цей форсований керуючий вплив накладається на процес керування, викликаний лінійними складовими II – I – або III – законів керування за координатою реактивної потужності. Вибір оптимальних значень налаштування УП – , UI – і УПІ – компенсаторів може бути виконано шляхом мінімізації сумарного інтегрального критерію $I_{D\Sigma} = I_{Du} + I_{Dq}$, що враховує динамічне відхилення напруги (I_{Du}) та реактивну провідність (I_{Dq}) в перехідному процесі. Порівнюючи динамічні властивості синхронної генераторної установки з компенсацією реактивної потужності, можна рекомендувати UI – закон керування як оптимальний.

4. При моделюванні систем, які містять трифазні секції комутованих конденсаторів потрібно враховувати особливості їх безударного включення за допомогою напівпровідникових тиристорних ключів, тобто моделювання цих процесів необхідно проводити для кожної фази окремо, що як мінімум в три рази збільшує кількість рівнянь моделі конденсаторного пристрою. Аналіз та порівняння процесів імпульсної зміни керуючої ємності з різними періодами дискретизації, починаючи від половини періоду до десяти періодів змінного струму, показує, що найбільш ефективною системою являється УКРП із зміною ємності один раз впродовж періоду мережі. Коливання в системі стабілізації напруги виявляються не гіршими, ніж в неперервній системі, а час повної компенсації реактивної потужності становить не більше 0.4 с.

5. Імпульсний закон керування ємністю УКРП $C_n^*(t) = k_u \Delta U_n^*(t) + k_q P_n^*(t) + C_{n-1}^*(t)$ реалізує аналог неперервного UI – закону керування компенсуючою ємністю. При використанні попереднього значення ємності $C_{n-1}^*(t)$ імпульсний закон має тільки два налагоджувальних параметри.

6. Порівняння процесів у системі з імпульсними UI – і УПІ – законами показує зовсім невелику перевагу більш складного закону. Тому використання пропорційної складової координати реактивної потужності на додаток до інтегральної складової являється невиправданим. Якщо використовувати тільки пропорційний компенсатор, то задовільних процесів отримати не вдається. Компенсація

коефіцієнта потужності до величини, близької до одиниці вимагає великого коефіцієнта підсилення k_q при якому система стабілізації напруги практично втрачає стійкість. Тому найкращою структурою являється система компенсації з імпульсним ПІ – регулятором реактивної потужності.

5. КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ПІД ЧАС ПУСКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

5.1 Моделювання і аналіз пускового режиму асинхронного двигуна з компенсацією реактивної потужності

Досліджуємо режим прямого пуску асинхронного двигуна від мережі співвимірної потужності, в якості якої розглядається суднова автономна електростанція. Як відомо, в режимі пуску асинхронний двигун споживає великий реактивний струм, значно знижуючи загальний коефіцієнт потужності генеруючої мережі, [121, 203-210, 215-217].

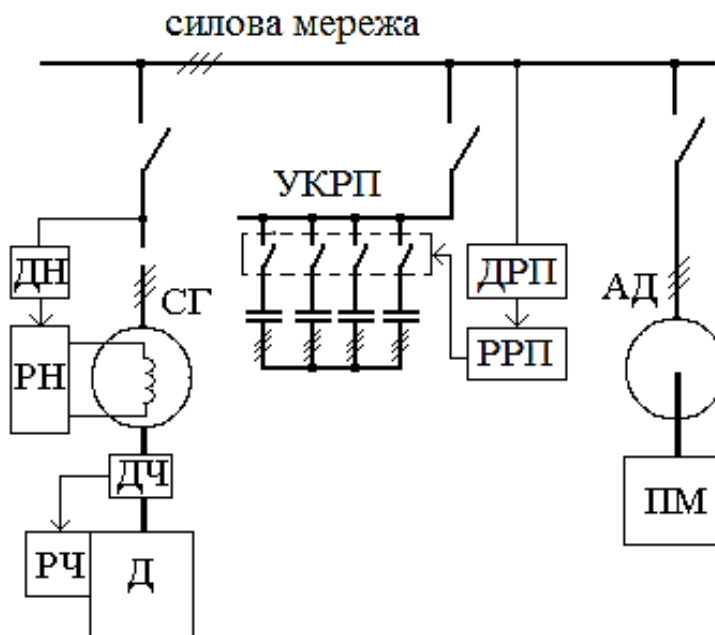


Рис.5.1. Схема суднової електростанції з установкою компенсації реактивної потужності: СГ – синхронний генератор; Д – дизельний двигун; АД - асинхронний двигун; ПМ – механізм, що приводиться АД; ДН, ДЧ, ДРП – давачі напруги, частоти, реактивної потужності; РН, РЧ, РРП – регулятори напруги, частоти обертання, реактивної потужності

Компенсація реактивної потужності двигуна під час пуску дозволяє зменшити загальний споживаний струм від мережі. Для компенсації споживаного

реактивного струму розглянемо застосування регульованого джерела ємнісного струму комутованих конденсаторів, рис.5.1.

Дослідження перехідних процесів виконаємо на математичній моделі, що містить описи синхронного генератора з дизельним приводом, асинхронного двигуна і регульованого конденсаторного джерела реактивного струму.

Моделювана установка включає системи автоматичного регулювання напруги синхронного генератора, частоти обертання приводного дизеля і пристрій компенсації реактивної потужності навантаження.

Проведемо моделювання процесу прямого пуску асинхронного двигуна без компенсації (рис.5.2) та з компенсацією реактивного струму (рис.5.3). Потужність двигуна на рис.5.2 і рис.5.3 становить 20% від потужності дизель-генератора. Початкове навантаження генератора до пуску двигуна становило 12,5% при коефіцієнті потужності $\cos \varphi = 1,0$.

В якості базових значень електромагнітного пускового моменту M_d і струму I_g на рис.5.2 та рис.5.3 прийняті номінальні значення відповідних параметрів генератора, а також номінальна частота обертання електродвигуна ω_d . На рис.5.2 і рис.5.3 наведені зміни кута між напругою та струмом навантаження φ в радіанах і коефіцієнта потужності мережі $\cos \varphi$.

Регулювання ємнісного струму здійснюється регулятором ємнісного струму, який забезпечує близький до нуля кут φ і практично одиничний коефіцієнт потужності навантаження $\cos \varphi$.

Порівняння перехідних процесів на рис.5.2 та рис.5.3 показує, що при компенсації реактивної потужності максимальний пусковий струм I_g зменшується в два рази, пусковий момент зменшується з 3 до 2 в. о., а час розгону електродвигуна скорочується з 1,9 до 1,7 с.

Далі виконаємо аналіз зміни активного і реактивного опору асинхронного двигуна під час прямого пуску без компенсації та з компенсацією реактивної потужності при припущенні про незмінність напруги і частоти суднової мережі.

Для проведення розрахунків пускових струмів асинхронного двигуна скористаємося відомою заступною схемою асинхронного двигуна з приведеним до статорного кола контуру намагнічування, [7-9, 54, 135, 177], рис.5.4,а.

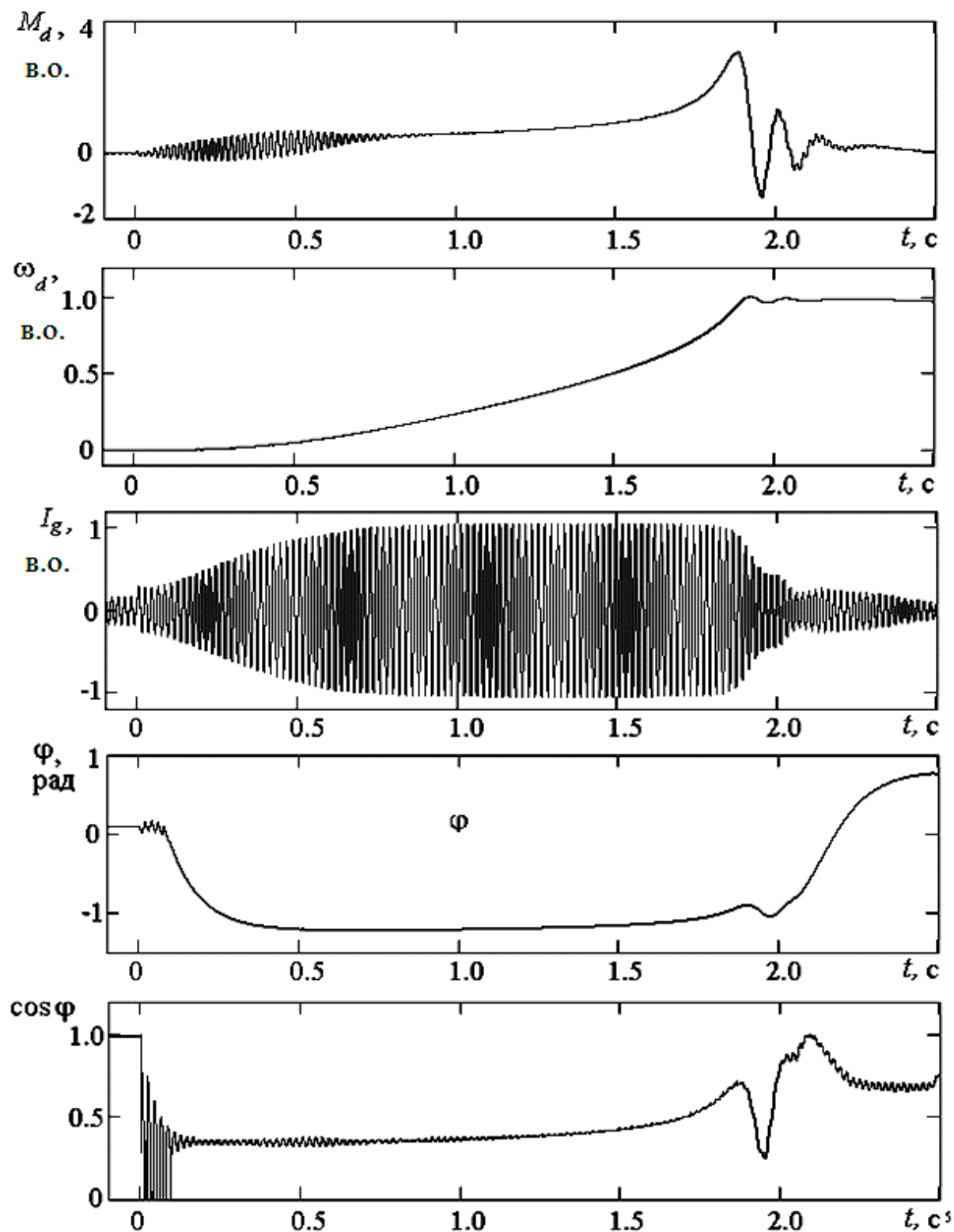


Рис.5.2. Моделювання процесу пуску асинхронного двигуна потужністю 20 % від потужності суднової електростанції

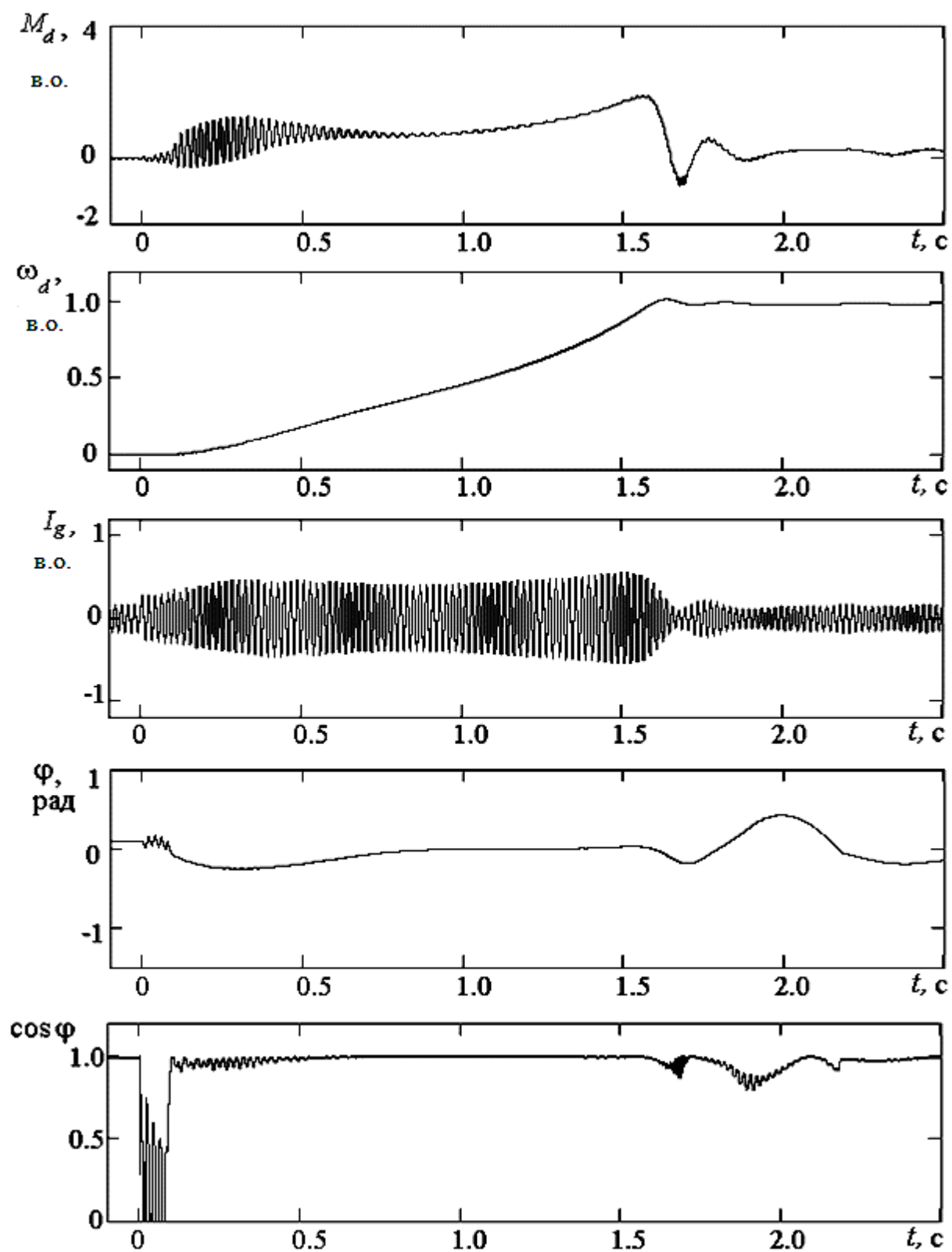


Рис. 5.3. Пуск асинхронного двигуна потужністю 20 % від потужності суднової електростанції з ємнісною компенсацією реактивної потужності

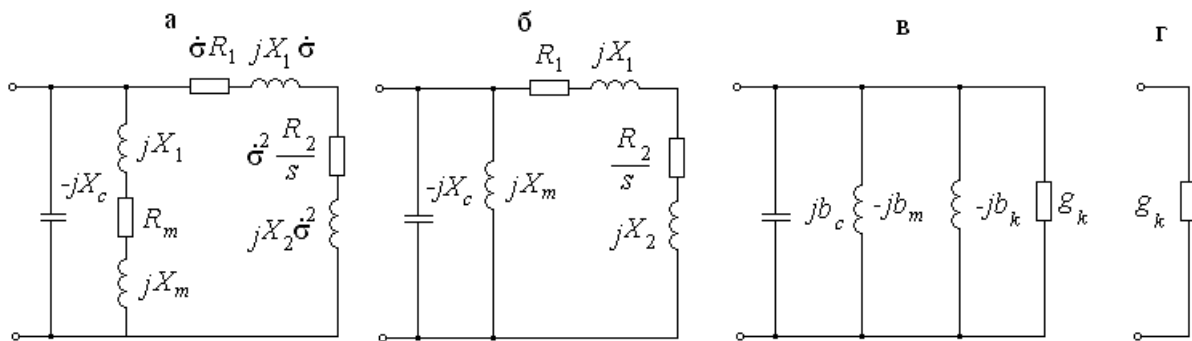


Рис.5.4. Заступні схеми асинхронного двигуна з ємнісною компенсацією реактивної потужності: а – заступна схема з винесеним контуром намагнічування; б – спрощена заступна схема; в – схема провідностей; г – скомпенсована активна провідність

Винесення контуру намагнічування електродвигуна на рис. 5.4, а здійснюється шляхом запровадження комплексного поправочного коефіцієнта σ , [99]:

$$\sigma = 1 + \frac{R_1 + jX_1}{R_m + jX_m}, \quad (5.1)$$

де позначення на схемах рис.5.4: R_1, X_1 – активний та індуктивний опір розсіювання статорного кола; R_m, X_m – активний і індуктивний опір контуру намагнічування; R_2, X_2 – активний та індуктивний опір розсіювання кола ротора; X_c – ємнісний опір конденсаторів УКРП; s – ковзання асинхронного двигуна.

Враховуючи, що активний опір контуру намагнічування асинхронного двигуна на порядок менше індуктивного $R_m \ll X_m$, поправочний коефіцієнт (5.1) приблизно дорівнює $\sigma \approx 1 + \frac{X_1}{X_m} - j \frac{R_1}{X_m}$, а його квадрат можна рахувати за наближеною формулою:

$$\sigma^2 = \left(1 + \frac{R_1 + jX_1}{R_m + jX_m}\right)^2 \approx \left(1 + \frac{X_1}{X_m} - j \frac{R_1}{X_m}\right)^2 \approx 1 + 2 \frac{X_1}{X_m} - 2j \frac{R_1}{X_m}.$$

Права вітка заступної схеми, рис.5.4,а, являє собою контур розсіювання або короткозамкнений контур, опір якого Z_k в процесі пуску значно менше опору контуру намагнічування Z_m , який і визначає величину пускового струму двигуна.

Повний опір короткозамкненого контуру дорівнює:

$$Z_k = \dot{\sigma} R_1 + \dot{\sigma} jX_1 + \dot{\sigma}^2 \frac{R_2}{s} + \dot{\sigma}^2 jX_2$$

та може бути розрахований за наближеною формулою:

$$\begin{aligned} Z_k \approx & \left(1 + \frac{X_1}{X_m}\right)R_1 - j\frac{R_1^2}{X_m} + j\left(1 + \frac{X_1}{X_m}\right)X_1 + \frac{R_1}{X_m}X_1 + \left(1 + 2\frac{X_1}{X_m}\right)\frac{R_2}{s} - 2j\frac{R_1R_2}{sX_m} + \\ & + j\left(1 + 2\frac{X_1}{X_m}\right)X_2 + 2\frac{R_1X_2}{X_m} = R_k + jX_k, \end{aligned}$$

де R_k, X_k – активна та реактивна складові опору Z_k , які відповідно дорівнюють:

$$R_k = \left(1 + \frac{X_1}{X_m}\right)R_1 + \frac{R_1}{X_m}X_1 + \left(1 + 2\frac{X_1}{X_m}\right)\frac{R_2}{s} + 2\frac{R_1X_2}{X_m}, \quad (5.2)$$

$$X_k = -\frac{R_1^2}{X_m} + \left(1 + \frac{X_1}{X_m}\right)X_1 - 2\frac{R_1R_2}{sX_m} + \left(1 + 2\frac{X_1}{X_m}\right)X_2. \quad (5.3)$$

Якщо через опори Z_m і Z_k визначити провідності основного контуру y_m та контуру розсіювання y_k , то можна отримати заступну схему асинхронного двигуна з паралельно сполучених провідностей, див. рис.5.4, в:

$$y_m = \frac{1}{Z_m} \approx -jb_m = -j\frac{1}{X_m}, \quad (5.4)$$

тут $X_m \gg X_1$ і $X_m \gg R_m$.

$$y_k = \frac{1}{Z_k} = \frac{1}{R_k + jX_k} = \frac{R_k - jX_k}{R_k^2 + X_k^2} = g_k - jb_k, \quad (5.5)$$

де g_k, b_k – активна і реактивна провідності контуру розсіювання, які рівні:

$$g_k = \frac{R_k}{R_k^2 + X_k^2} \quad \text{та} \quad b_k = \frac{X_k}{R_k^2 + X_k^2}. \quad (5.6)$$

Опір конденсаторів УКРП X_c утворює ємнісну провідність:

$$y_c = j\frac{1}{X_c}. \quad (5.7)$$

Таким чином, повна провідність асинхронного двигуна y_d з компенсуючими конденсаторами визначається паралельним з'єднанням реактивних провідностей конденсаторів b_c , основного контуру намагнічування b_m і контуру розсіювання b_k ,

а також активної провідності контуру розсіювання g_k . Слід зазначити, що невеликою величиною активної провідності контуру намагнічування g_m ми нехтуємо.

$$y_d \approx jb_c - jb_m - jb_k + g_k. \quad (5.8)$$

Модуль повної провідності асинхронного двигуна з ємнісною компенсацією дорівнює:

$$|y_d| = \sqrt{g_k^2 + (b_c - b_m - b_k)^2}. \quad (5.9)$$

Якщо виконується точна компенсація реактивної потужності, тобто $b_c = b_m + b_k$, то провідність двигуна буде дорівнювати активній провідності його контуру розсіювання, рис.5.4, г: $y_{dc} = g_k$.

На рис. 5.5 показані залежності провідності електродвигуна від ковзання, які побудовані за формулами (5.2) – (5.9).

Провідність АД без компенсації реактивної потужності буде визначатися кривою $|y_d|$ на рис.5.5, при повній компенсації провідність дорівнює g_k . Максимум функції $|y_d|$ досягається при одиничному ковзанні, $s = 1$, а максимум g_k настає при деякому критичному ковзанні в кінці розгону, див. рис.5.3. Величина максимуму g_k в два рази менше максимуму повної провідності y_d , що і визначає вдвічі менший пусковий струм скомпенсованого двигуна.

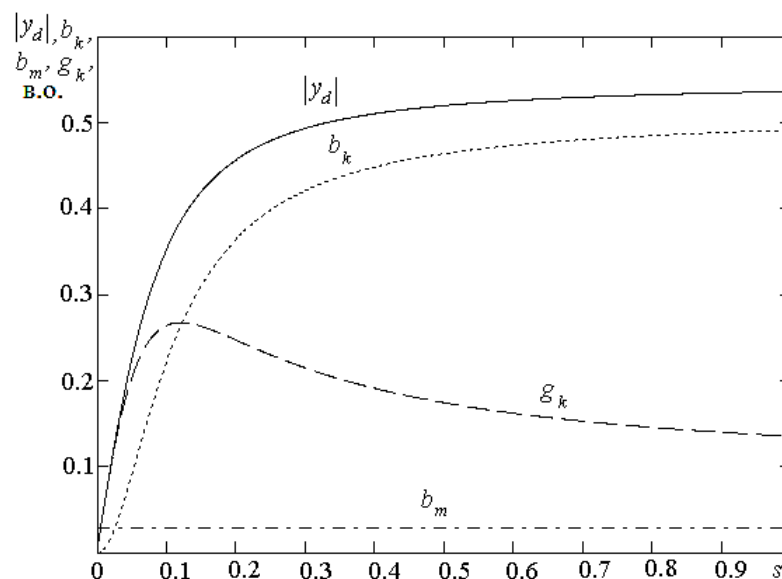


Рис.5.5. Залежності провідності заступної схеми асинхронного двигуна від ковзання

Слід зауважити, якщо в формулах (5.2) і (5.3) знехтувати величинами $\frac{X_1}{X_m}$ та $\frac{X_2}{X_m}$ у порівнянні з одиницею, то ці вирази значно спростяться, що відповідає спрощеній схемі заміщення АД, рис.5.4, б:

$$R_k \approx R_1 + \frac{R_2}{s} \quad \text{і} \quad X_k \approx X_1 + X_2 \quad (5.10)$$

Тоді провідності заступної схеми рис.5.4, можуть бути визначені:

$$g_k \approx \frac{R_1 + \frac{R_2}{s}}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}; \quad b_k \approx \frac{X_1 + X_2}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2};$$

$$y_k \approx \frac{1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (5.11)$$

Максимальне значення провідності, яка визначає максимальну величину пускового струму двигуна, приблизно дорівнює:

$$y_{\max} \approx \frac{1}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (5.12)$$

На рис. 5.6 показані наближені залежності провідності електродвигуна від ковзання, що побудовані за формулами (5.11). Похибки такого спрощення становлять приблизно 4 % порівняно з розрахунками за формулами (5.2) і (5.3).

Максимум активної провідності асинхронного двигуна $g_k(s)$ під час пуску настає при ковзанні близькому до номінального, рис.5.5 і рис.5.6, тобто в кінці розгону. Визначимо величину цього максимуму і значення критичного ковзання.

Для цього прирівнюємо до нуля похідну активної провідності по ковзанню:

$$\frac{dg_k(s)}{ds} = 0 \quad (5.13)$$

Функцію $g_k(s)$ визначимо за наближеними формулами (5.11).

$$g_k(s) = \frac{R_1 + \frac{R_2}{s}}{(R_1 + \frac{R_2}{s})^2 + (X_1 + X_2)^2} = \frac{R_1 s^2 + R_2 s}{(R_1 s + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2 s^2} = \frac{v(s)}{u(s)}$$

Тоді умова екстремуму приймає вигляд:

$$u \frac{dv}{ds} - v \frac{du}{ds} = 0$$

Складемо поліном відносно ковзання:

$$(R_1^2 s^2 + 2R_1 R_2 s + R_2^2 + (X_1 + X_2)^2 s^2) \cdot (2R_1 s + R_2) - (2R_1^2 s + 2R_1 R_2 + 2(X_1 + X_2)^2 s) \cdot (R_1 s^2 + R_2 s) = 0 \quad \text{або}$$

$$(R_1^2 - (X_1 + X_2)^2) s^2 + 2R_1 R_2 s + R_2^2 = 0,$$

$$s^2 + \frac{2R_1 R_2}{R_1^2 - (X_1 + X_2)^2} s + \frac{R_2^2}{R_1^2 - (X_1 + X_2)^2} = 0,$$

корені якого дорівнюють:

$$s_{1,2} = -\frac{R_1 R_2}{R_1^2 - (X_1 + X_2)^2} \pm \sqrt{\frac{R_1^2 R_2^2}{(R_1^2 - (X_1 + X_2)^2)^2} - \frac{R_2^2}{R_1^2 - (X_1 + X_2)^2}} = \frac{R_2 (R_1 \pm (X_1 + X_2))}{(X_1 + X_2)^2 - R_1^2}.$$

$$s_1 = \frac{R_2}{X_1 + X_2 - R_1}; \quad s_2 = -\frac{R_2}{X_1 + X_2 + R_1}.$$

Звідки отримуємо, що критичне значення ковзання, яке забезпечує максимум функції $g_k(s)$, приблизно дорівнює:

$$s_{\text{кр}} = \frac{R_2}{X_1 + X_2 - R_1}. \quad (5.14)$$

Під час пуску активна провідність двигуна має максимум, рівний величині:

$$g_{k \text{ max}}(s_{\text{кр}}) = \frac{1}{2(X_1 + X_2)}. \quad (5.15)$$

Значення максимуму повної провідності електродвигуна приблизно дорівнює:

$$y_{k \text{ max}} \approx \frac{1}{X_1 + X_2}. \quad (5.16)$$

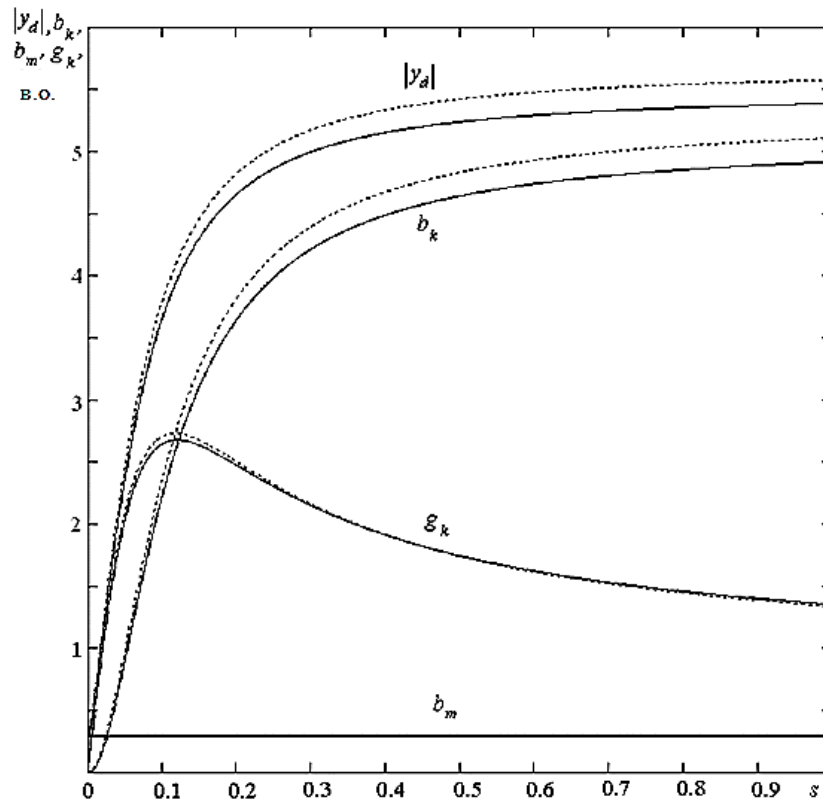


Рис.5.6. Наближені залежності (пунктир) провідностей заступної схеми асинхронного двигуна від ковзання

Порівняння виразів (5.15) та (5.16) показує, що максимум активної провідності вдвічі менше, ніж найбільше значення повної провідності: $g_{kmax}(s_{кр}) \approx y_{kmax}/2$.

Отже, максимальна величина пускового струму асинхронного двигуна при повній компенсації реактивної потужності може бути знижена вдвічі [54, 139].

5.2 Лінійні аналогові закони автоматичної компенсації реактивної потужності при пуску електродвигуна

Реалізація аналогових законів керування в системах компенсації реактивної потужності передбачає використання силових конденсаторних або дросельних установок з неперервно змінними ємностями або індуктивностями. Приклади таких установок існують: це дроселі з підмагнічуванням, дроселі з тиристорним фазовим або широтно-імпульсним керуванням, або варіконди, [24, 30, 78]. Реактивний струм

таких пристроїв регулюється шляхом зміни їх індуктивності або ємності за рахунок насичення або зміни часу включення в мережу, [119, 163].

Дроселі насичення змінюють свою індуктивність в залежності від струму підмагнічування, який змінюється в колі постійного струму. Варіконди змінюють свою ємність при наявності постійної складової напруги, [30]. Кола постійного струму, керуючі струмом підмагнічування дроселів або підзарядом варікондів, як правило, мають сталу часу T_p , більшу за період змінного струму T_0 , тобто $T_p > T_0$. Ця інерційність виконавчого пристрою повинна враховуватися при розробці автоматичних систем керованої реактивної потужності.

Розглянемо і проаналізуємо використання типових лінійних законів регулювання в системі автоматичної компенсації реактивної потужності синхронного дизель-генератора при пуску асинхронного двигуна співвимірної потужності.

В якості регульованої координати будемо розглядати миттєве значення реактивної провідності навантаження b на шинах генератора, яка складається з поточної провідності суднової мережі b_l та ємнісної провідності компенсуючого пристрою b_c : $b = b_l - b_c$.

Керуючою координатою у системі компенсації реактивної потужності являється ємнісна провідність регульованого реактивного джерела b_c . Таким чином, на вхід регулятора реактивної потужності надходить сигнал реактивної провідності мережі b , а на виході регулятора – провідність аналогового виконавчого пристрою b_c .

Передавальна функція регулятора реактивної потужності разом з виконавчим пристроєм пов'язує зображення вхідного і вихідного сигналу регулятора:

$$b_c(p) = W_p(p)b(p).$$

Розглянемо особливості застосування пропорційного (П) регулятора і пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора реактивної потужності з передавальними функціями:

$$W_p(p) = W_{\text{П}}(p) = \frac{K_{\text{П}}}{T_p p + 1}, W_{\text{ПІ}}(p) = \frac{K_{\text{П}}(1 + 1/pT_I)}{T_p p + 1},$$

де K_{Π} – коефіцієнт передачі пропорційної складової регулятора; T_I - стала інтегрування ПІ-регулятора; T_p – стала часу виконавчого пристрою компенсації реактивної потужності.

У перший момент пуску асинхронного двигуна загальна провідність суднової мережі різко змінюється. Процес зміни реактивної провідності отримано на математичній моделі суднової електростанції, що включає синхронний дизель-генератор і асинхронний двигун, який пускається. Встановлення пускової провідності b носить затухаючий коливальний характер з періодом коливань, рівним періоду мережі змінного струму T_0 . При частоті мережі 50 Гц цей період дорівнює $T_0 = 0.02$ с.

Фізично ці коливання пов'язані з розсіюванням енергії в обмотках асинхронного двигуна. Моделювання та аналіз процесу розсіювання під час пуску показує (рис.5.7, а), що математично його можна апроксимувати рішенням лінійного диференціального рівняння другого порядку:

$$T_k^2 \frac{d^2 b_l}{dt^2} + 2\xi T_k \frac{db_l}{dt} + b_l = b_d,$$

характеристичне рівняння якого має пару комплексних чисел. Тут b_l - поточна провідність мережі; b_d - реактивна провідність асинхронного двигуна в нерухомому стані, при $\omega_d = 0$; T_k - період коливань, в даному випадку $T_k = T_0$; ξ - коефіцієнт загасання коливань ланки другого порядку:

$$b_l(p) = \frac{b_d(p)}{T_k^2 p^2 + 2\xi T_k p + 1}.$$

Перехідний процес зміни провідності мережі b_l в коливальній ланці другого порядку наведено на рис.5.7, б.

Процеси, отримані на моделі дизель-генератора й асинхронного двигуна (рис.5.7, а) та в ланці другого порядку (рис.5.7, б) відрізняються незначно. Загасання коливань на рис.5.7, а відбувається повільніше, що свідчить про невраховане коло загасання енергії. Розглянемо наближену лінійну модель початкового процесу пуску електродвигуна в системі компенсації реактивної потужності з ПІ-регулятором та з ПІІ-регулятором.

Структурні схеми цієї системи приведені на рис.5.8.

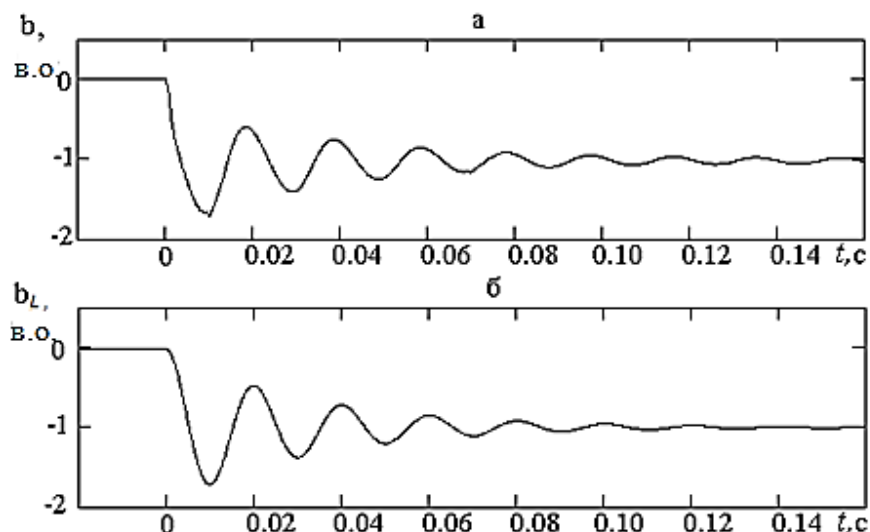


Рис.5.7. Зміна реактивної провідності суднової мережі в початковий момент пуску асинхронного двигуна потужністю 20 % від потужності дизель-генератора

Особливості автоматичної системи компенсації реактивної потужності полягають у тому, що місце вимірювання та підведення компенсуючої енергії збігаються, що на структурній схемі рис.5.8 відповідає одиничному зв'язку в прямому каналі керування.

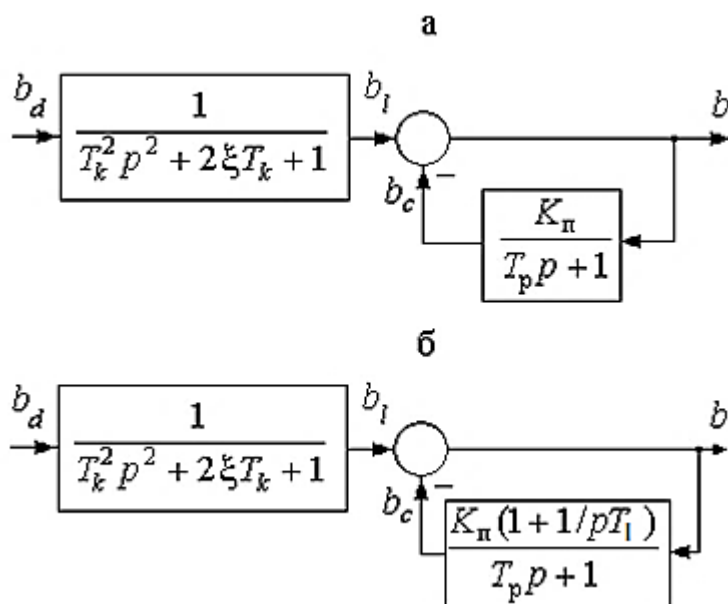


Рис.5.8. Структурні схеми системи компенсації реактивної потужності в початковий момент пуску асинхронного двигуна з П-регулятором (а) та з ПІ-регулятором (б)

Замкнуті передавальні функції лінійних компенсаторів дорівнюють:

$$W_3(p) = \frac{1}{1 + W_p(p)}$$

Для пропорційного регулятора замкнута передавальна функція компенсатора дорівнює:

$$W_{зП}(p) = \frac{T_p p + 1}{T_p p + 1 + K_{п}}$$

Для ПІ-регулятора замкнута передавальна функція компенсатора відповідно дорівнює:

$$W_{зПІ}(p) = \frac{p T_I (T_p p + 1)}{p^2 T_I T_p + p T_I (1 + K_{п}) + K_{п}}$$

Наявність в чисельнику передавальної функції ПІ-компенсатора множника p забезпечує нульову помилку регулювання реактивної потужності в сталому режимі.

Використання ПІ-закону в компенсаторі дозволяє підтримувати коефіцієнт потужності мережі рівним одиниці після затухання процесів комутації, рис. 5.9.

Ефективність ПІ-закону компенсації істотно залежить від інерційності виконавчого пристрою компенсатора. При значеннях сталої часу T_p , близької до періоду мережі T_0 , ПІ-компенсатор має хороші динамічні показники.

На рис. 5.9 наведені процеси компенсації з таким законом при $T_p = T_0$ з різними значеннями сталої інтегрування компенсатора $T_I = 5T_0, 10T_0, 20T_0$ і $K_{п} = 10$. Збільшення сталої інтегрування T_I декілька затягує процес повної компенсації від 0.08 до 0.16 с, але знижує початковий провал реактивної потужності вдвічі, див. рис. 5.9.

Якщо аналоговий компенсуючий пристрій має інерційність більше десяти періодів мережі $T_p > 10T_0$, то ПІ-закон регулювання реактивної провідності знижує стійкість системи «дизель-генератор – електродвигун», рис. 5.10.

Загасання процесів розсіювання енергії в асинхронному двигуні зтягується, а наприкінці пуску спостерігаються значні коливання напруги в системі збудження синхронного генератора.

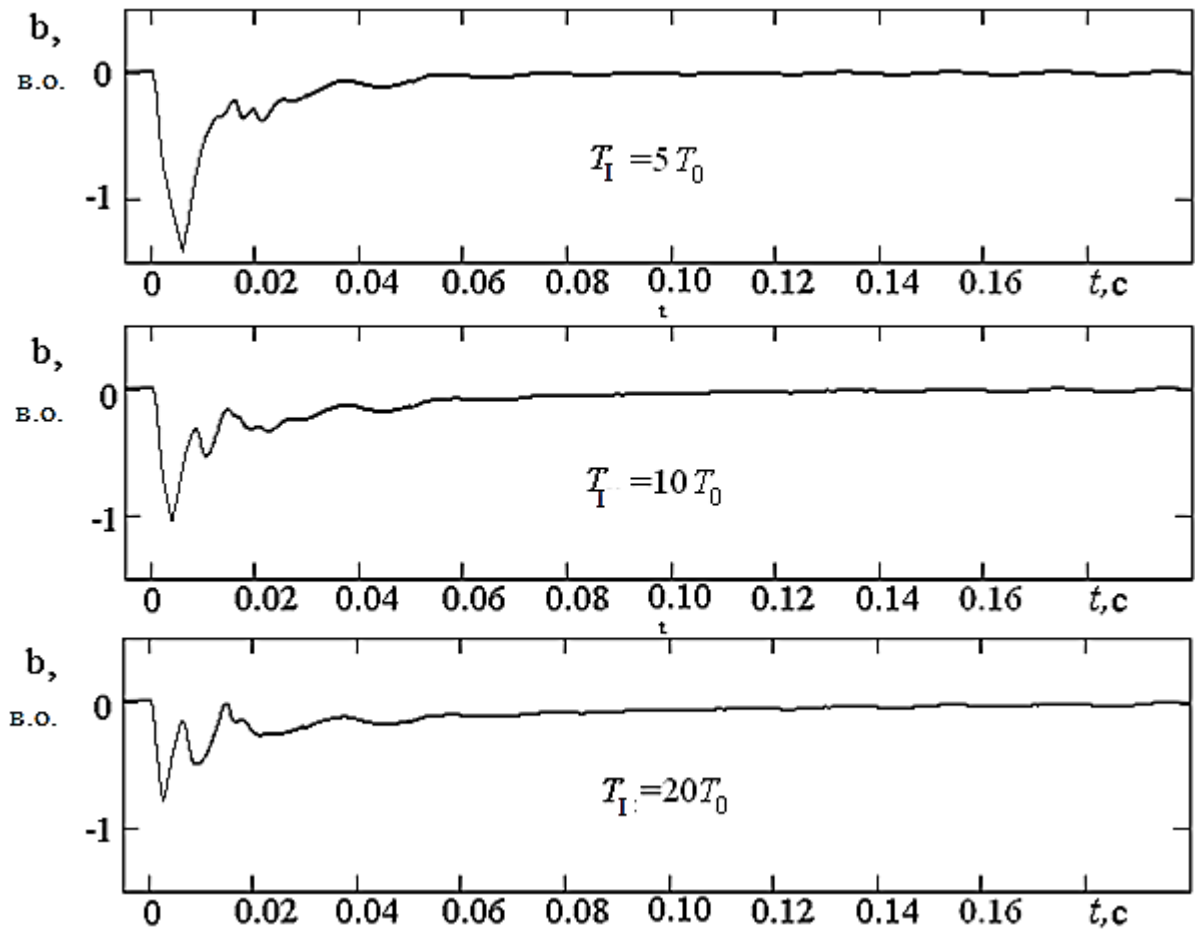


Рис. 5.9. Компенсація реактивної провідності в початковий момент пуску електродвигуна з використанням ПІ-закону регулювання з швидкодіючим виконавчим пристроєм ($T_p = T_0$)

При малих значеннях сталої інтегрування $T_I \leq 5T_0$ виконавчий пристрій (регульована ємність) досягає обмеження граничного значення керуючого впливу, що позначається на процесі компенсації, див. провал реактивної провідності на 0.14 секунді верхнього графіка рис. 5.10.

Порівняння процесів в аналоговій системі з швидкодіючим (рис.5.9) та інерційним (рис.5.10) пристроєм компенсації реактивної потужності показує, що ПІ-закон регулювання являється ефективним тільки в першому випадку. Введення інтегральної складової для керування інерційним компенсатором мало ефективне.

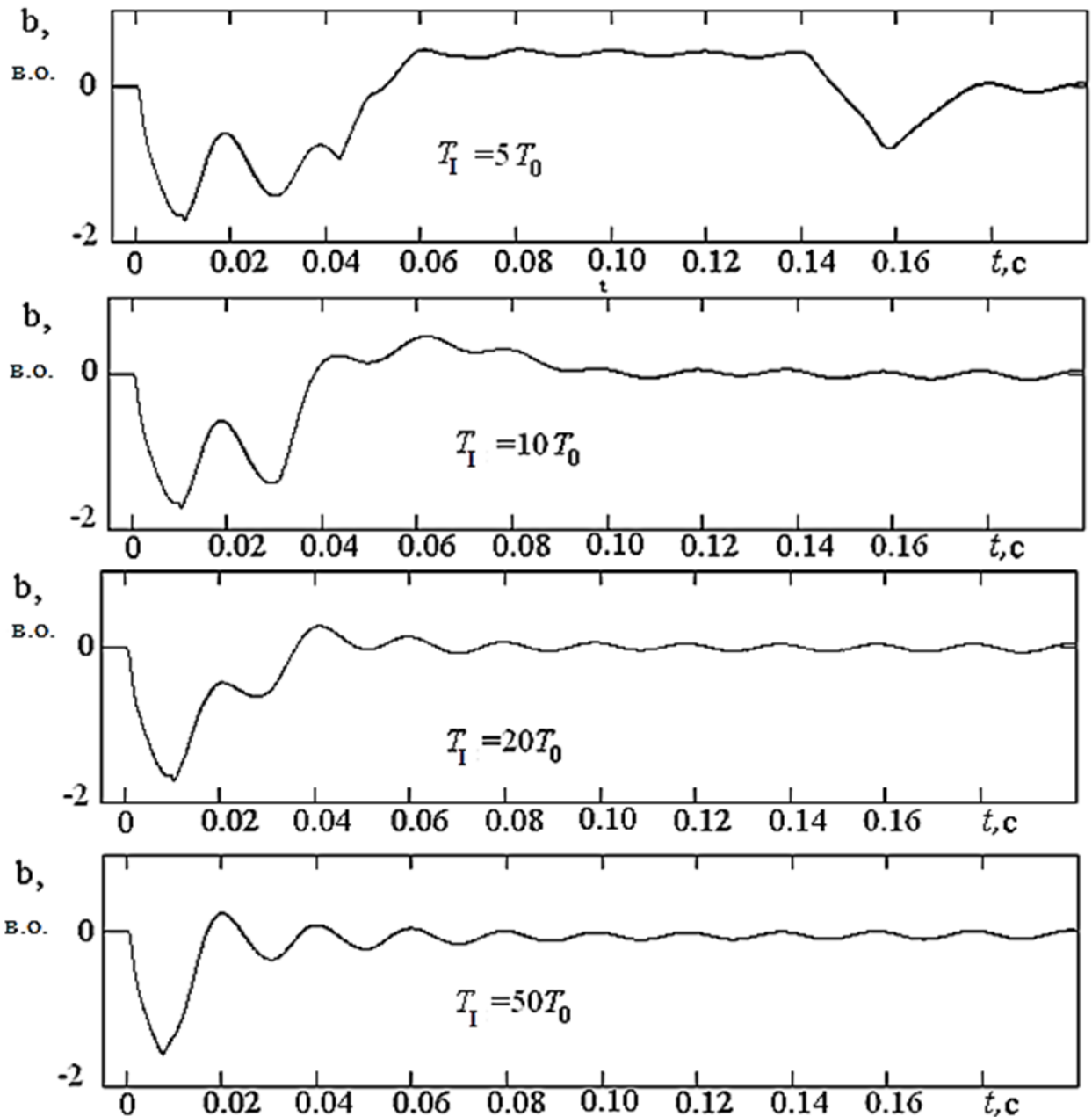


Рис. 5.10. Компенсація реактивної провідності електродвигуна, що запускається, при використанні ПІ-закону регулювання з інерційним виконавчим пристроєм

$$(T_p = 25T_0)$$

Розглянемо детальніше застосування аналогового пропорційного закону регулювання [54].

У квазісталому режимі на початку пуску електродвигуна статична помилка компенсації реактивної провідності зменшується в $K_{\text{П}} + 1$ раз:

$$b(\infty) = W_{\text{зп}}(0) \cdot b_d = \frac{1}{K_{\text{П}} + 1} \cdot b_d.$$

Структурна схема системи автоматичної компенсації реактивної потужності в початковий момент пуску асинхронного двигуна, рис. 5.8, складається з послідовного з'єднання коливальної ланки і замкненої системи стабілізації. Коливання з періодом мережі T_0 генеруються до регулятора реактивної потужності, а потім фільтруються компенсатором. Іншими словами, компенсатор реактивної потужності можна розглядати як фільтр коливань, пов'язаних з розсіюванням енергії в електромагнітних колах асинхронного двигуна і синхронного генератора. Частота загасаючих коливань у початковий момент пуску дорівнює частоті струму, в відносних величинах $\omega_k = 1$.

Розглянемо частотну передавальну функцію компенсатора з пропорційним регулятором, рис. 5.10, а. Для цього оператор Лапласа p у виразі передавальної функції замкнутого компенсатора замінимо на частотний оператор Фур'є $j\omega_k$:

$$W_{\text{зп}}(j\omega_k) = \frac{j\omega_k T_p + 1}{j\omega_k T_p + 1 + K_{\text{п}}}$$

Модуль комплексного числа $W_{\text{зп}}(j\omega_k)$ визначає коефіцієнт передачі компенсатора, що залежить від частоти ω_k :

$$K(\omega_k) = |W_{\text{зп}}(j\omega_k)| = \frac{\sqrt{\omega_k^2 T_p^2 + 1}}{\sqrt{\omega_k^2 T_p^2 + (1 + K_{\text{п}})^2}}$$

Для частоти коливань $\omega_k = 1$ отримаємо залежність частотного коефіцієнта компенсатора від коефіцієнта передачі $K_{\text{п}}$ та сталої часу T_p пропорційного регулятора, наведену на рис. 5.11:

$$K(K_{\text{п}}, T_p) = |W_{\text{зп}}(K_{\text{п}}, T_p)| = \frac{\sqrt{T_p^2 + 1}}{\sqrt{T_p^2 + (1 + K_{\text{п}})^2}}$$

Аналіз залежностей компенсатора реактивної потужності як частотного фільтра показують його ефективність при невеликих сталих часу П-регулятора $T_p/T_0 < 10$.

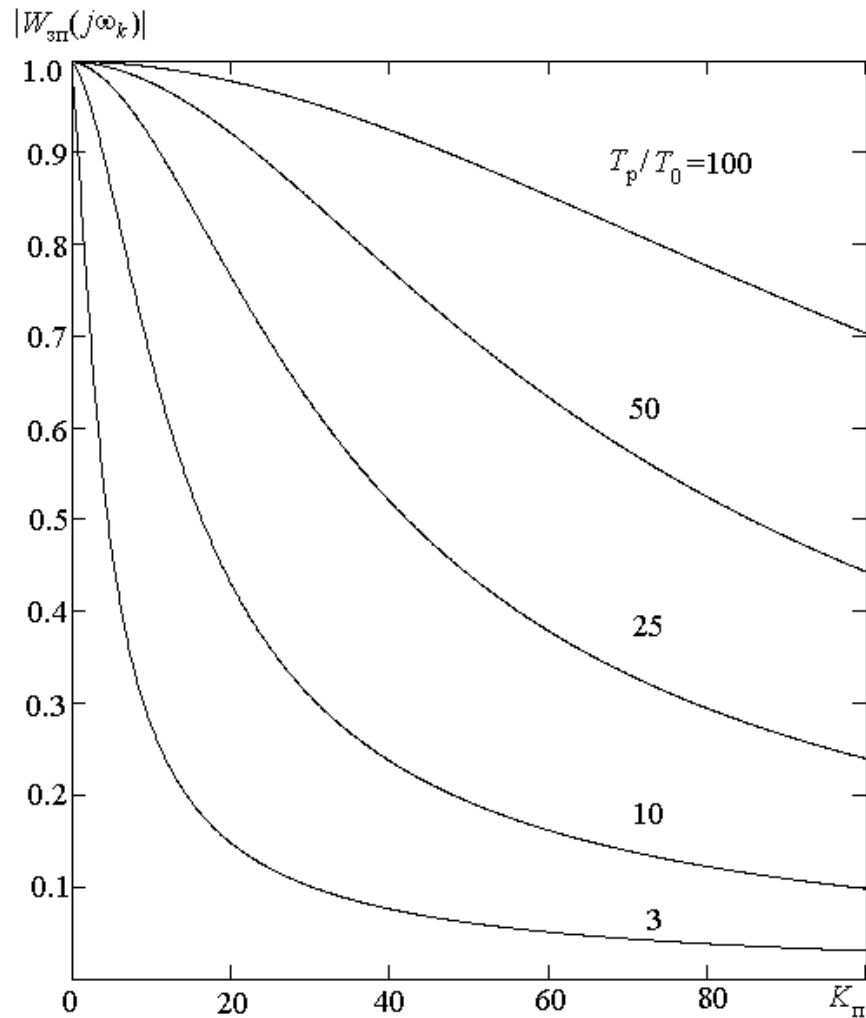


Рис. 5.11. Залежності частотного коефіцієнта передачі компенсатора з пропорційним регулятором від його параметрів K_p і T_p/T_0 при $\omega_k = 1$

5.3 Амплітудно-імпульсна система керування конденсаторним компенсатором реактивної потужності

Квантування процесу керування ємнісною провідністю конденсаторів за часом з періодом T_0 замінює непереривну функцію $b_c(t)$ на решітчасту функцію окремих дискрет, що існують тільки в дискретні моменти часу $t = nT_0$, де n - натуральне число $n = 1 \dots \infty$.

$$b_c^*(nT_0) = b_c(t) \text{ при } t = nT_0,$$

де $b_c^*(nT_0)$ – решітчаста функція або амплітудно-модульована послідовність імпульсів. В результаті непереривна функція перетворюється на ступінчасту $b_c(nt_0)$,

значення якої змінюються в дискретні моменти часу $t = nT_0$. Процес квантування $b_c(t)$ за часом з періодом T_0 показаний на рис. 5.12.

У даному розділі квантуванням ємнісної провідності за рівнем знехтуємо, вважаючи, що кількість розрядів цифрового регулятора досить велика і точність стабілізації нас поки що не цікавить. Тоді цифрову істотно нелінійну систему можна звести до лінійної амплітудно-імпульсної системи регулювання, [54,107, 169, 170].

Таке спрощене представлення дискретного компенсатора використовуємо для оцінки динамічних властивостей імпульсної системи з пропорційним і інтегральним законами керування ємністю.

Спочатку розглянемо спрощену модель імпульсного компенсатора реактивної провідності в режимі пуску електродвигуна, зробивши максимальну кількість допущень:

- будемо вважати зміну реактивної провідності електродвигуна, який запускається ступінчастою функцією $b_d(t) = b_{d0} \cdot 1(t)$;
- напруга U_m та частота струму мережі генератора ω за час пуску електродвигуна залишаються постійними.

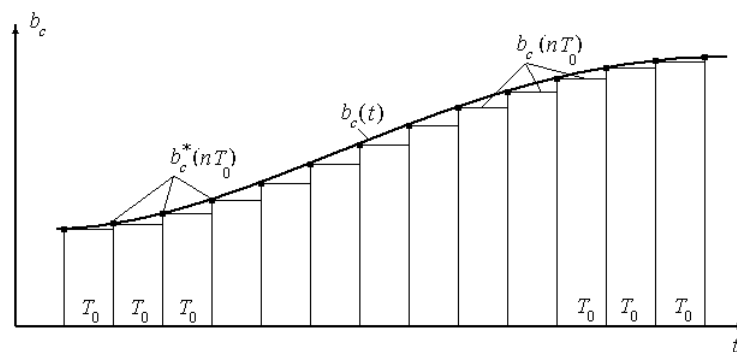


Рис.5.12. Процес квантування за часом неперервної функції $b_c(t)$

Імпульсна система компенсації реактивної провідності може бути представлена послідовним з'єднанням імпульсного елемента (ІЕ), формуючого елемента (Ф) та неперервної частини (НЧ) системи, рис.5.13. На неперервну частину діє послідовність імпульсів, амплітуда яких пропорційна значенню помилки компенсації провідності $b(t)$ в дискретні моменти часу $t = nT_0$:

$$b^*(nT_0) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b(t) \cdot \delta(nT_0).$$

Імпульсна система реагує на дискретні значення помилки $b(nT_0) = b_d(nT_0) - b_c(nT_0)$. Між моментами комутації конденсаторів помилка компенсації залишається незмінною.

Якщо прийняти рівняння неперервної частини системи лінійними, то можна користуватися апаратом передавальних функцій та імпульсних передавальних функцій, а також неперервним і дискретним перетворенням Лапласа для аналізу процесів в компенсаторі реактивної потужності, [170].

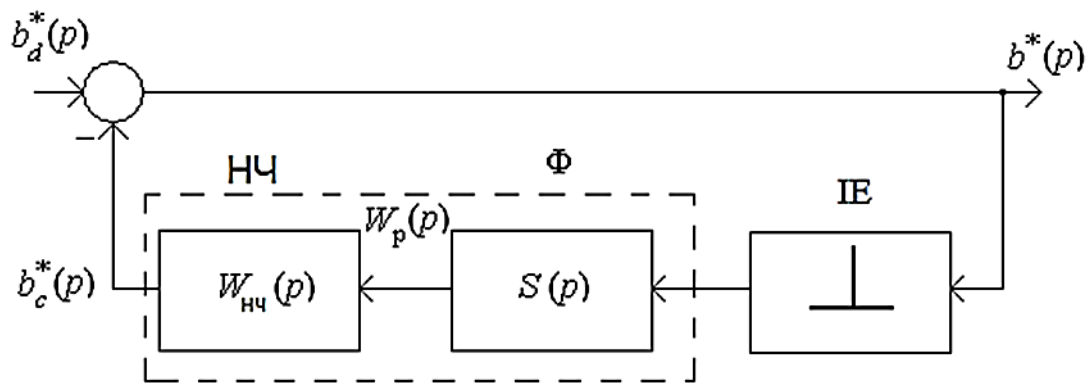


Рис. 5.13. Структурна схема імпульсного компенсатора реактивної потужності

На рис.5.13 знаком \perp позначено амплітудно-імпульсний елемент, який модулює рівновіддалені δ -функції, що зміщені на крок квантування за часом: $b^*(nT_0) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b(t) \cdot \delta(nT_0)$. Разом з формуючим елементом, що має передавальну функцію $S(p)$, імпульсний елемент представляє формуюче коло, яке під дією δ -функцій генерує сигнали $s(t)$ відповідної форми, рис. 5.14.

Для формування прямокутного імпульсу тривалістю T_0 та амплітудою b на виході формуючого кола повинен генеруватися сигнал:

$$s(t) = \begin{cases} b, & 0 \leq t < T_0 \\ 0, & T_0 \leq t < \infty \end{cases},$$

який може бути отриманий як різниця ступінчастих сигналів, зміщених на один такт T_0 :

$$s(t) = b \cdot 1(t) - b \cdot 1(t + T_0).$$

Визначимо передавальну функцію такого формувача:

$$S(p) = b \cdot \left[\frac{1}{p} - \frac{e^{-pT_0}}{p} \right] = b \cdot \frac{1 - e^{-pT_0}}{p}.$$

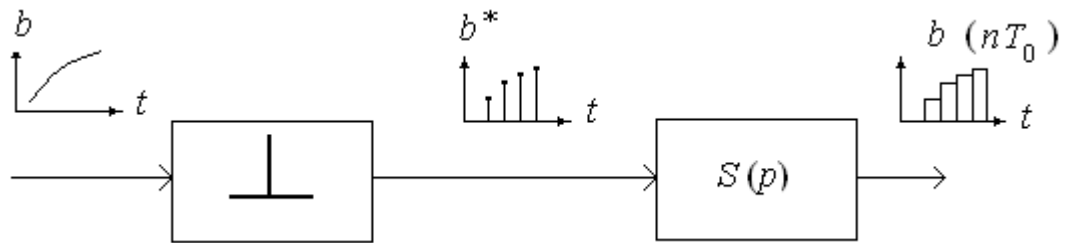


Рис.5.14. Імпульсне формуюче коло дискретного компенсатора реактивної потужності

Передавальна функція неперервної частини системи буде дорівнювати:

$$W_p(p) = S(p) \cdot W_{\text{НЧ}}(p).$$

Імпульсна передавальна функція розімкнутої системи визначається як дискретне \mathfrak{D} -перетворення неперервної передавальної функції:

$$W_p^*(p) = \mathfrak{D}\{W_p(p)\} = \mathfrak{D}\{S(p) \cdot W_{\text{НЧ}}(p)\}.$$

Для пропорційного закону регулювання передавальні функції неперервної частини регулятора і формуючого елемента будуть дорівнювати:

$$W_{\text{НЧ}}(p) = K_{\text{п}}/T_p p + 1 \quad \text{і} \quad S(p) = 1 - e^{-pT_0}/p, \quad \text{тоді}$$

$$W_p^*(p) = \mathfrak{D}\left\{ \frac{1 - e^{-pT_0}}{p} \cdot \frac{K_{\text{п}}}{T_p p + 1} \right\}.$$

Винесемо за знак \mathfrak{D} -перетворення функцію $K_{\text{п}}(1 - e^{-pT_0})$ і, розклавши вираз $1/p(T_p p + 1)$ на найпростіші дроби

$$1/p(T_p p + 1) = \frac{1}{p} - \frac{1}{p + \frac{1}{T_p}}$$

получимо:

$$W_p^*(p) = K_{\text{п}}(1 - e^{-pT_0}) \mathfrak{D}\left\{ \frac{1}{p} - \frac{1}{p + \frac{1}{T_p}} \right\} =$$

$$= K_{\pi}(1 - e^{-pT_0}) \left(\frac{e^{pT_0}}{e^{pT_0} - 1} - \frac{e^{pT_0}}{e^{pT_0} - e^{-T_0/T_p}} \right) = K_{\pi} \cdot \frac{1 - e^{-T_0/T_p}}{e^{pT_0} - e^{-T_0/T_p}}.$$

Якщо у виразі передавальної функції $W_p^*(p)$ позначити експоненту через $z = e^{pT_0}$, то від ірраціональної функції можна перейти до раціональної функції від z , [106]. Сталу величину e^{-T_0/T_p} , пов'язану з відношенням періоду комутації зі сталою часу регулятора позначимо через $d = e^{-T_0/T_p}$.

Імпульсна передавальна функція розімкнутої частини пропорційного регулятора буде мати вигляд:

$$W_p^*(z) = \frac{K_{\pi}(1 - d)}{z - d}.$$

Замкнута передавальна функція лінійного амплітудно-імпульсного компенсатора у відповідності зі структурною схемою системи, наведеної на рис. 5.13, буде дорівнювати: $K^*(p) = 1/1 + W_p^*(p)$.

Структурна схема компенсатора реактивної провідності навантаження з імпульсним пропорційним регулятором представлена на рис. 5.15.

Замкнута передавальна функція імпульсного компенсатора з пропорційним законом регулювання має вигляд:

$$K_{\pi}^*(p) = \frac{1}{1 + \frac{K_{\pi}(1 - d)}{z - d}} = \frac{z - d}{z + K_{\pi}(1 - d) - d} = \frac{e^{pT_0} - e^{-T_0/T_p}}{e^{pT_0} + K_{\pi}(1 - e^{-T_0/T_p}) - e^{-T_0/T_p}}$$

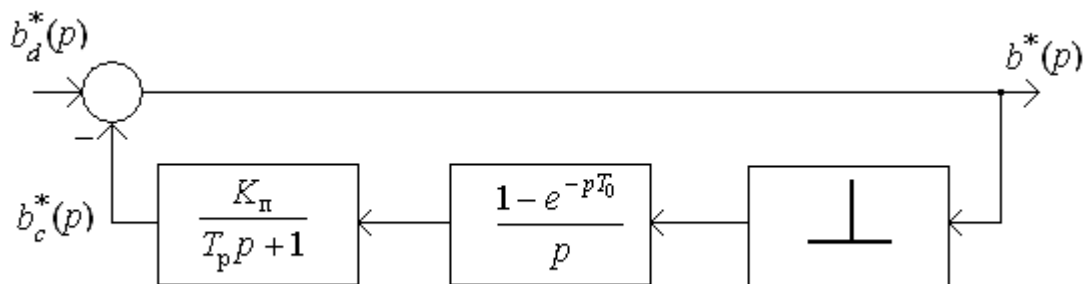


Рис. 5.15. Структурна схема компенсатора реактивної провідності з імпульсним пропорційним регулятором

Параметри реального пропорційного регулятора з урахуванням сталої часу виконавчого пристрою компенсатора K_{Π} і T_p впливають на динамічні властивості і стійкість розглянутого компенсатора.

Розглянемо стійкість імпульсних систем компенсації з пропорційним та інтегральним законом керування.

Як відомо [107], корені характеристичного рівняння $G_{\Pi}^*(z) = 0$ замкнутої передавальної функції для стійкої системи повинні бути по модулю менше одиниці, тобто $|z| \leq 1$.

Для пропорційного регулятора маємо:

$$G_{\Pi}^*(z) = z + K_{\Pi}(1 - d) - d = 0; \quad z = d - K_{\Pi}(1 - d).$$

Одержуємо умову стійкості для пропорційного імпульсного компенсатора:

$$-1 \leq K_{\Pi} \leq \frac{1 + d}{1 - d}.$$

Величина $d = e^{-T_0/T_p}$ залежить від співвідношення періоду комутації T_0 та сталої часу T_p . Коефіцієнт підсилення K_{Π} – величина позитивна, тому критичне значення коефіцієнта підсилення пропорційного регулятора в компенсаторі реактивної провідності буде дорівнювати:

$$K_{\Pi \text{ кр}} = \frac{1 + d}{1 - d} = \frac{1 + e^{-T_0/T_p}}{1 - e^{-T_0/T_p}}.$$

Функція $K_{\Pi \text{ кр}} = f(T_0/T_p)$ наведена на рис. 5.16 суцільною лінією і відповідає межі стійкості амплітудно-імпульсного пропорційного компенсуючого пристрою.

Ця умова стійкості відповідає пристрою, приведеному на структурній схемі рис. 5.15, без урахування впливу реактивного струму навантаження синхронного генератора на його динамічні характеристики, що є досить великим припущенням. Насправді, ємнісне навантаження істотно впливає на напругу і знижує стійкість системи збудження синхронного генератора, [35].

Межа стійкості імпульсної пропорційної системи компенсації реактивної провідності синхронного дизель-генератора в режимі пуску асинхронного двигуна, яка отримана на комп'ютерній моделі, наведена на рис. 5.16 пунктиром.

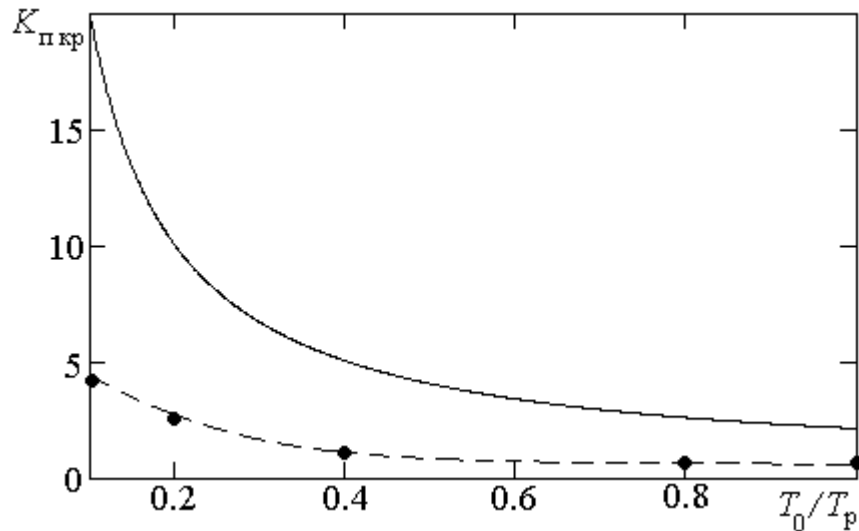


Рис. 5.16. Критичний коефіцієнт підсилення імпульсної пропорційної системи компенсації реактивної провідності

При малій інерційності пропорційного імпульсного регулятора T_p , порівнянної з періодом квантування T_0 , система компенсації має низьку стійкість, не вдається підняти коефіцієнт підсилення до величини, що забезпечує необхідну точність. Звідси випливає, що вимірювана координата реактивної провідності навантаження повинна бути згладжена аперіодичною ланкою зі сталою часу $T_p > 10 \dots 50T_0$.

Далі розглянемо використання в імпульсному компенсаторі реактивної провідності інтегрального закону регулювання.

Структурна схема такого компенсуючого пристрою наведена на рис. 5.17.

Передавальна функція імпульсного елемента $S(t)$, що формує прямокутні імпульси одиничної амплітуди, дорівнює $S(t) = 1 - e^{-pT_0}/p$.

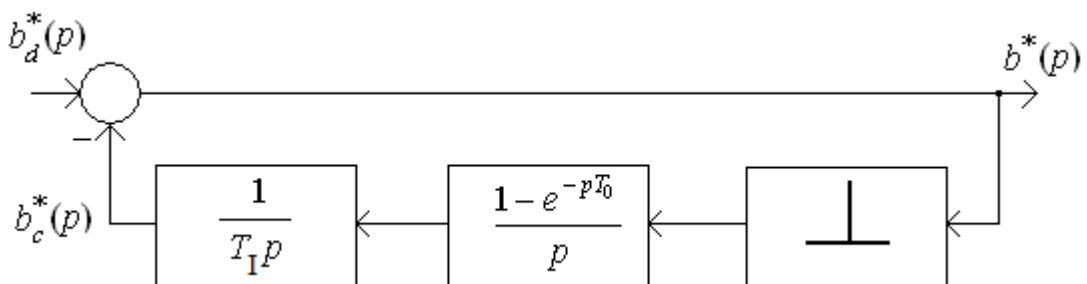


Рис. 5.17. Структурна схема компенсатора реактивної провідності з імпульсним інтегральним регулятором

Тоді передавальна функція інтегрального регулятора буде дорівнювати:

$$W_I(p) = S(p) \cdot W_{\text{нч}}(p) = \frac{1 - e^{-T_0 p}}{T_1 p^2},$$

де T_1 - стала інтегрування.

Використовуючи заміну $z = e^{pT_0}$ [62], отримаємо імпульсну передавальну функцію розімкнутої системи:

$$W_I^*(p) = \mathfrak{D} \left\{ \frac{1 - e^{-T_0 p}}{T_1 p^2} \right\} = \frac{1 - e^{-T_0 p}}{T_1} \mathfrak{D} \left\{ \frac{1}{p^2} \right\} = \frac{1 - z^{-1}}{T_1} \cdot \frac{T_0 z}{(z - 1)^2},$$

або, після спрощень одержимо:

$$W_I^*(z) = \frac{T_0}{T_1} \cdot \frac{1}{z - 1}.$$

Замкнута передавальна функція інтегруючого амплітудно-імпульсного компенсатора у відповідності зі структурною схемою, наведеною на рис. 5.17, буде дорівнювати:

$$K_I^*(z) = \frac{1}{1 + W_I^*(z)} = \frac{1}{1 + \frac{T_0}{T_1(z - 1)}} = \frac{z - 1}{z - 1 + \frac{T_0}{T_1}}.$$

Характеристичне рівняння замкнутої імпульсної системи має вигляд $G_I^*(z) = z - 1 + T_0/T_1 = 0$, звідки одержуємо $z = 1 - T_0/T_1 < 1$. При позитивних значеннях T_1, T_0 і при $T_1 > T_0$ величина $1 - T_0/T_1 < 1$. Тобто виконується умова стійкості імпульсної системи $|z| < 1$, [170].

Отже, використання інтегрального закону регулювання в компенсаторі істотно підвищує стійкість імпульсної системи компенсації у порівнянні з використанням пропорційного закону [54, 138].

Цей факт підтверджений дослідженнями на повній комп'ютерній моделі процесу пуску асинхронного двигуна від дизельної установки з синхронним генератором та компенсатором реактивної провідності [137].

5.4 Процеси лінійної імпульсної системи компенсації реактивної потужності при пуску електродвигуна

Під час пуску асинхронного двигуна в початковий момент часу провідність навантаження електричної мережі різко змінюється і залишається практично незмінною до критичного ковзання двигуна, [99].

Якщо не враховувати впливу пускового струму на напругу і частоту мережі, то зміну провідності двигуна на початку пуску можна вважати ступінчастою.

Розглянемо перехідні процеси в імпульсній системі компенсації реактивної провідності як реакцію на одиничний східчастий вплив $b_d = -1(t)$ при типових законах регулювання.

Перехідний процес в імпульсній системі може бути побудований по Z – зображенню змінної в дискретні моменти часу, кратні періоду квантування $t = nT_0$: $b^*(z) = K^*(z) \cdot b_d^*(z)$, якщо представити зображення $b^*(z)$ у вигляді суми ряду зміщених на один такт значень змінної $b(nT_0)$ в дискретні моменти часу, [170].

Дискретне перетворення Лапласа дозволяє розкласти зображення змінної в ряд:

$$b^*(z) = \sum_{n=0}^{\infty} b(nT_0) \cdot e^{-nT_0 p},$$

що аналогічно Z – перетворенню:

$$b^*(z) = \sum_{n=0}^{\infty} b(nT_0) \cdot z^{-n}$$

Дискретні значення змінної $b(nT_0)$, які являються співмножниками оператора зсуву z^{-n} , дозволяють побудувати квантований перехідний процес при $n = (0 \dots \infty)$.

Виконати розкладання Z – перетворення змінної, представлені у вигляді дробово раціональної функції $b^*(z) = Q(z)/R(z)$ в ряд, можна шляхом операції ділення чисельника $Q(z)$ на знаменник $R(z)$.

Спочатку розглянемо перехідні процеси в імпульсному компенсаторі з пропорційним законом регулювання, передавальна функція якого отримана у попередньому розділі: $W_p^*(z) = \frac{K_{\Pi}(1-d)}{z-d}$, де $z = e^{pT_0}$ і $d = e^{-T_0/T_p}$, K_{Π} – коефіцієнт посилення, T_p – стала часу регулятора.

Замкнута передавальна функція компенсатора дорівнює:

$$K_{\Pi}^*(z) = \frac{1}{1 + W_p^*(z)} = \frac{z - d}{z + K_{\Pi}(1 - d) - d}$$

z – зображення вхідної ступеневої функції $b_d = -1(t)$, що відповідає зміні провідності двигуна, що пускається, має вигляд [170]:

$$b_d^*(z) = -\frac{z}{z - 1}.$$

Дискретне зображення провідності компенсатора при ступінчастому впливі буде визначатися виразом:

$$\begin{aligned} b^*(z) &= K^*(z) \cdot b_d^*(z) = -\frac{z - d}{z + K_{\Pi}(1 - d) - d} \cdot \frac{z}{z - 1} \\ &= -\frac{z^2 - zd}{z^2 + z[K_{\Pi}(1 - d) - d - 1] + d - K_{\Pi}(1 - d)}. \end{aligned}$$

Алгебраїчне ділення чисельника цього виразу на знаменник дозволяє отримати вирази для квантованих значень скомпенсованої провідності $b(nT_0)$:

$$b^*(z) = -z^0 \cdot 1 - z^{-1} \cdot [1 - K_{\Pi} \cdot (1 - d)] - z^{-2} \cdot \{[1 - K_{\Pi} \cdot (1 - d)] \cdot [d - K_{\Pi} \cdot (1 - d)] + 1 - d\} - \dots$$

$$\text{Звідки одержуємо: } b(0) = -1;$$

$$b(T_0) = -[1 - K_{\Pi} \cdot (1 - d)];$$

$$b(2T_0) = -\{[1 - K_{\Pi} \cdot (1 - d)] \cdot [d - K_{\Pi} \cdot (1 - d)] + 1 - d\}.$$

Аналітичний вираз дискретних значень провідності $b(nT_0)$ на третьому і наступних тактах управління представляються громіздкими, тому їх зручніше обчислювати шляхом підстановки значень K_{Π} і $d = e^{-T_0/T_p}$ з подальшим діленням чисельника зображення на знаменник. Так, для значень параметрів імпульсного регулятора $K_{\Pi} = 5$ і $T_0/T_p = 0.2$; $T_0/T_p = 0.3$; $T_0/T_p = 0.4$ отримаємо наступні розкладання, які побудовані на рис. 5.18.

Як видно з цих процесів, збільшення сталої часу T_p знижує коливальність системи, див. рис. 5.18. Для збільшення точності компенсації реактивної потужності необхідно підвищувати коефіцієнт підсилення K_{Π} , що також наближає систему до межі стійкості. Так, при необхідному коефіцієнті підсилення $K_{\Pi} = 10$, стала часу регулятора повинна бути більше п'ятдесяти періодів квантування $T_p > 50T_0$, рис. 5.13.

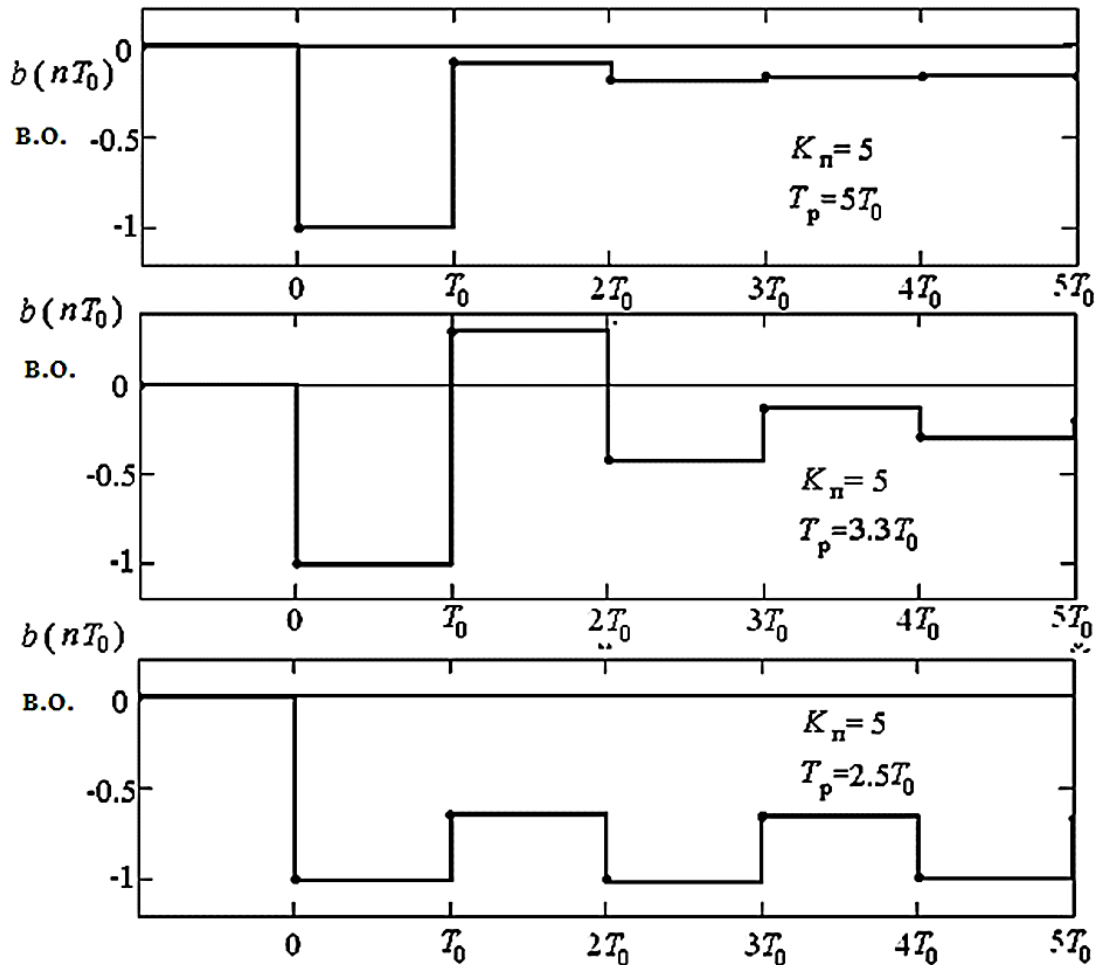


Рис. 5.18. Перехідні процеси в імпульсному пропорційному регуляторі реактивної провідності при розгоні асинхронного двигуна

$$b(nT_0) = -z^0 \cdot 1 - z^{-1} \cdot 0.094 - z^{-2} \cdot 0.173 - z^{-3} \cdot 0.166 - z^{-4} \cdot 0.166 - z^{-5} \cdot 0.166 - \dots$$

$$b(nT_0) = -z^0 \cdot 1 + z^{-1} \cdot 0.296 - z^{-2} \cdot 0.423 - z^{-3} \cdot 0.128 - z^{-4} \cdot 0.292 - z^{-5} \cdot 0.201 - \dots$$

$$b(nT_0) = -z^0 \cdot 1 - z^{-1} \cdot 0.648 - z^{-2} \cdot 0.964 - z^{-3} \cdot 0.656 - z^{-4} \cdot 0.985 - z^{-5} \cdot 0.663 - \dots$$

Фізично стала часу T_p може бути реалізована як фільтр першого порядку на виході датчика реактивної провідності навантаження.

Розглянемо далі перехідні процеси пуску електродвигуна при використанні інтегрального закону регулювання в компенсаторі реактивної провідності.

Дискретна передавальна функція $W_1^*(z)$, що відповідає інтегральному закону $W_1(p) = 1/T_1 p$, дорівнює: $W_1^*(z) = T_0/T_1 \cdot (1/z - 1)$. Відповідна імпульсна передавальна функція замкнутого інтегрального компенсатора дорівнює:

$$K^*(z) = \frac{z - 1}{z - 1 + T_0/T_1}.$$

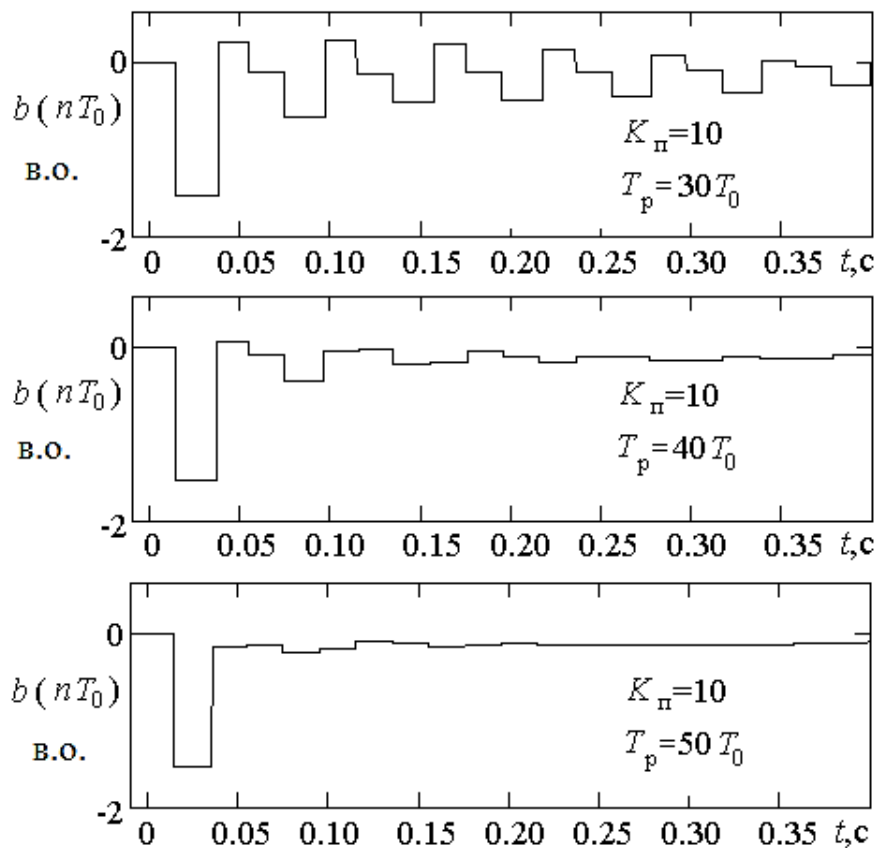


Рис. 5.19. Процеси в імпульсному пропорційному регуляторі реактивної провідності при великих сталих часу

Перехідна функція як реакція на одиничний східчастий вплив $b_d = -1(t)$ має наступне зображення:

$$b^*(z) = K^*(z) \cdot b_d^*(z) = -\frac{z - 1}{z - 1 + (T_0/T_1) \cdot (z/z - 1)} = -\frac{z}{z - 1 + (T_0/T_1)}.$$

Алгебраїчним діленням чисельника зображення $b^*(z)$ на знаменник отримаємо його розкладання в ряд по степенях оператора затримки z^{-n} :

$$b^*(z) = -z^0 \cdot 1 - z^{-1} \cdot \frac{T_I - T_0}{T_I} - z^{-2} \cdot \left(\frac{T_I - T_0}{T_I}\right)^2 - \dots = -z^0 - \sum_{n=1}^{\infty} z^{-n} \cdot \left(\frac{T_I - T_0}{T_I}\right)^n.$$

Перехідні функції системи з імпульсним інтегральним законом регулювання провідності при різних сталих часу наведено на рис. 5.20.

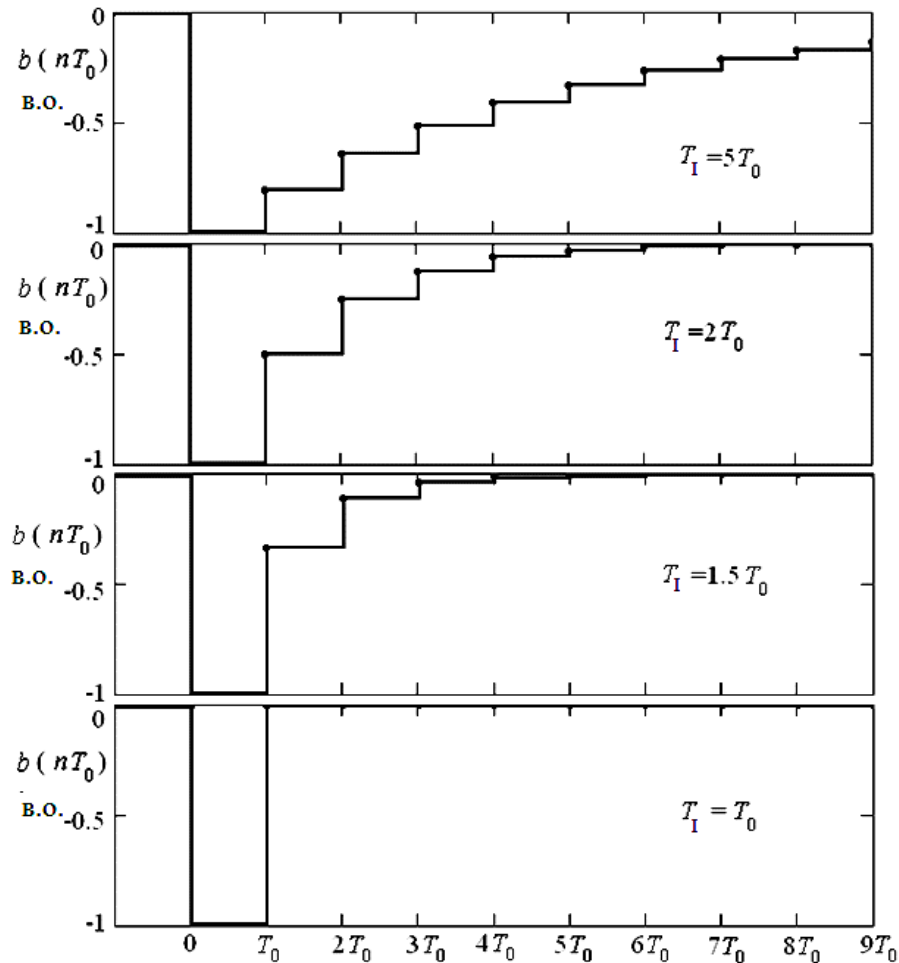


Рис. 5.20. Перехідні процеси в імпульсному інтегральному регуляторі реактивної провідності на початку пуску асинхронного двигуна

Як і при використанні пропорційного закону керування, перший провал провідності в інтегральному компенсаторі завжди дорівнює одиниці. Інтенсивність процесу компенсації істотно залежить від співвідношення сталої часу T_I і періоду комутації T_0 . При їх рівності $T_I = T_0$ процес компенсації відбувається за один період змінного струму.

5.5 Реакція імпульсної системи компенсації реактивної потужності на гармонійний вплив

В попередньому розділі розглянуто процеси в імпульсній системі компенсації реактивної потужності на ступінчасту зміну реактивної провідності в початковий момент пуску асинхронного двигуна. Однак врахування динамічних властивостей системи «синхронний дизель-генератор – асинхронний двигун» на розробленій комп'ютерній моделі показує, що зміна провідності крім ступінчастої складової має гармонійну складову [54, 137, 139]. Коливання провідності мають частоту, рівну частоті змінного струму, і спадають за експоненціальним законом за 7...10 періодів, рис. 5.21.

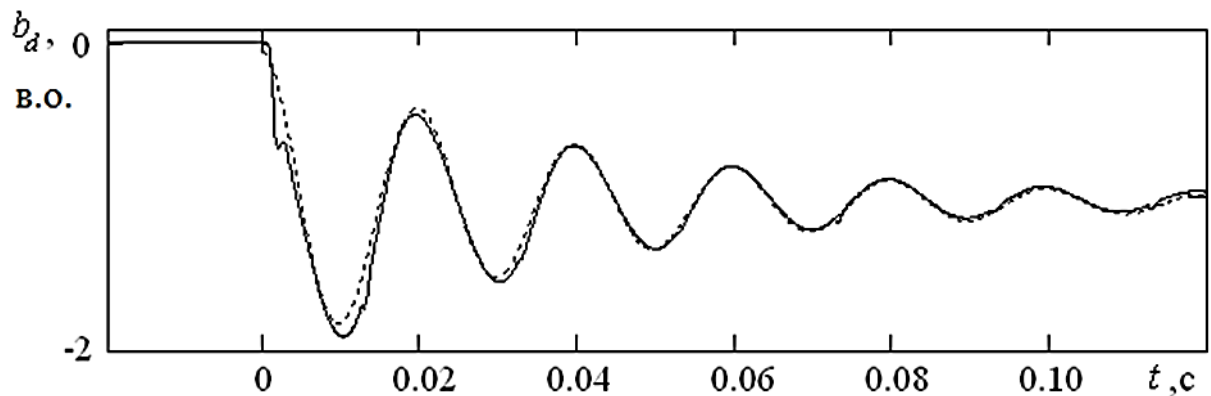


Рис. 5.21. Зміна реактивної провідності асинхронного двигуна на початку пуску від синхронного дизель - генератора

На рис. 5.21 суцільною лінією приведена провідність асинхронного двигуна, що отримана на моделі, яка досить точно описується гармонійною затухаючою функцією (пунктир на рис. 5.21):

$$b_d(t) = -1(t) + e^{-t/T_\sigma} \cos(\omega_s t),$$

де T_σ – стала часу загасання коливального процесу, $\omega_s = 2\pi/T_s$ – частота і T_s – період змінного струму, $T_s = 0.02$ с.

Коливання пов'язані із загасанням полів розсіювання в асинхронній машині, період коливань яких дорівнює періоду обертання поля.

Z – перетворення провідності двигуна на початку пуску при $T_0 = T_s$:

$$\begin{aligned} Z[b_d(nT_0)] &= Z[-1(nT_0)] + Z[e^{-nT_0/T_\sigma} \cdot \cos(\omega_s nT_0)] \\ &= -\frac{z}{z-1} + \frac{z^2 - zd \cos(\omega_s T_0)}{z^2 - 2zd \cos(\omega_s T_0) + d^2}. \end{aligned}$$

При $\omega_s = 2\pi/T_0$ вираз спрощується:

$$Z[b_d(nT_0)] = -\frac{z}{z-1} + \frac{z^2 - zd}{z^2 - 2zd + d^2} = -\frac{z}{z-1} + \frac{z(z-d)}{(z-d)^2} = -\frac{z}{z-1} + \frac{z}{z-d},$$

де $z = e^{pT_0}$ і $d = e^{-T_0/T_\sigma}$.

Квантування гармонійного сигналу $b_d(t)$ його періодом T_0 повністю фільтрує коливання сигналу, залишаючи тільки інформацію про його ступінчасту і експоненціальну зміну:

$$b_d(t) = -1(t) + e^{-t/T_\sigma}$$

Величина реактивної провідності надходить на замкнуту систему автоматичної компенсації, яка при інтегральному імпульсному законі регулювання має передавальну функцію:

$$K_I^*(z) = \frac{z-1}{z-1 + \frac{T_0}{T_I}}$$

Знайдемо вираз скомпенсованого значення реактивної провідності $b^*(z)$ на початку пуску асинхронного двигуна:

$$b^*(z) = K_I^*(z) \cdot b_d^*(z) = \frac{z-1}{z-t} \cdot \left(-\frac{z}{z-1} + \frac{z}{z-d} \right) = -\frac{z(1-d)}{(z-t)(z-d)},$$

де позначено: $t = T_I - T_0/T_I$.

Для побудови перехідного процесу представимо вираз з компенсованою провідністю у вигляді ряду за степенями затримки z^{-n} . Для цього чисельник дробово-раціональної функції $b^*(z) = -\frac{z(1-d)}{(z-t)(z-d)}$ потрібно розділити на знаменник.

Для отримання аналітичних виразів розглянемо розкладання в ряд за степенями z^{-n} простих дробів:

$$\frac{z}{z-t} \text{ і } \frac{1-d}{z-d}$$

$$\frac{z}{z-t} = z^0 + t \cdot z^{-1} + t^2 \cdot z^{-2} + t^3 \cdot z^{-3} + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} t^n \cdot z^{-n} \text{ та}$$

$$\begin{aligned} \frac{1-d}{z-d} &= (1-d) \cdot z^{-1} + (1-d)d \cdot z^{-2} + (1-d)d^2 \cdot z^{-3} + \dots \\ &= (1-d) \sum_{n=1}^{\infty} d^{n-1} \cdot z^{-n}. \end{aligned}$$

Звідки знайдемо добуток отриманих рядів:

$$b^*(z) = -\frac{z}{z-t} \cdot \frac{1-d}{z-d} = -(1-d) \sum_{n=1}^{\infty} z^{-n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} d^{n-1-i} \cdot t^i.$$

Отриманий аналітичний вираз у вигляді ряду дозволяє побудувати перехідний процес регулювання реактивної провідності при пуску асинхронного двигуна.

Для конкретного значення сталої часу загасання коливального процесу $T_{\sigma} = 2T_0$, $d = e^{-T_0/T_{\sigma}} = e^{-0.5} = 0.607$ при різних значеннях сталої інтегрування регулятора $T_I = 1 \dots 5T_0$ перехідні процеси наведено на рис.5.22.

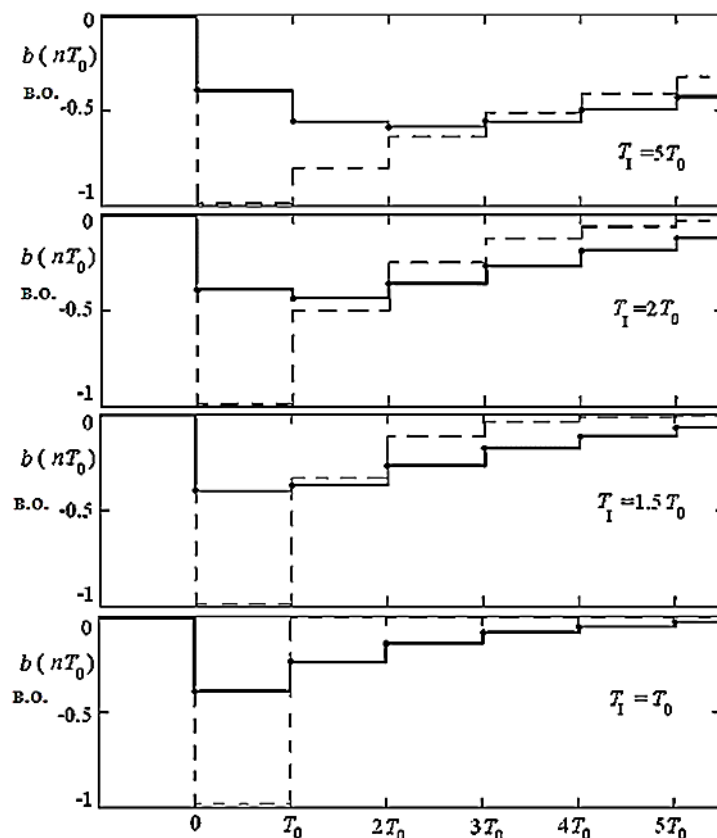


Рис. 5.22. Процеси компенсації реактивної провідності двигуна, що пускається, з урахуванням загасання коливань полів розсіювання

Пунктиром показані перехідні процеси без урахування коливальних явищ. Звідки видно їх істотний вплив та необхідність врахування цих процесів.

Динамічне відхилення регульованої координати істотно зменшується, але тривалість процесу компенсації дещо затягується. Гармонійні коливання реактивної провідності двигуна, що наведені на рис.5.21, повністю фільтруються.

5.6 Висновки до розділу 5.

1. Аналітичні та експериментальні дослідження прямого пуску асинхронного двигуна від мережі співвимірної потужності, в якості якої розглядається суднова автономна електростанція, показують, що максимальна величина пускового струму асинхронного двигуна при повній компенсації реактивної потужності може бути знижена вдвічі.

2. Моделювання процесів загасання коливань показує збіг їх параметрів з результатами аналітичних розрахунків. Визначення частотного коефіцієнта передачі на частоті коливань дозволяє оцінити демпфуючі можливості аналогового регулятора компенсації реактивної провідності під час пуску електродвигуна.

3. Застосування аналогових компенсуючих пристроїв дозволяє вирішити задачу компенсації реактивної потужності під час пуску асинхронного двигуна від автономного електроагрегата співвимірної потужності. Використання пропорційного закону регулювання дозволяє у $K_{\Pi} + 1$ разів зменшити реактивну провідність мережі в квазісталому режимі.

4. Затухаючі коливання на початку пуску демпфуються П-регулятором у відповідності із залежністю частотного коефіцієнта передачі на частоті змінного струму.

5. Застосування ПІ-закону компенсації ефективно при використанні швидкодіючого виконавчого пристрою. При цьому нульова помилка компенсації досягається через 3...5 періодів змінного струму T_0 від початку пуску електродвигуна.

6. Порівняння типових лінійно-імпульсних законів регулювання реактивної провідності електродвигуна, що запускається, від дизель-генератора співвимірної потужності показує, що найкращі процеси компенсації досягаються при

використанні інтегрального закону регулювання. При виборі сталої інтегрування інтегрального компенсатора, який дорівнює періоду комутації та періоду мережі $T_I = T_0 = T_s$ процеси регулювання закінчуються за 1...4 періоди мережі.

7. Характер динамічних процесів у імпульсній системі компенсації істотно залежить від зміщення моменту пуску двигуна від моменту комутації конденсаторів. Найбільше динамічне відхилення і мінімальний час регулювання виникає при зсуві моменту пуску відносно моменту комутації на півперіоду змінного струму.

8. Отриманий аналітичний опис дискретних процесів компенсації реактивної потужності дозволяє проводити розрахунки систем з різними типовими законами, вибрати оптимальні налагоджувальні параметри імпульсних регуляторів реактивної потужності.

9. Перехідні процеси компенсації реактивної провідності при пуску електродвигуна, які отримані на повній моделі та при розрахунках аналітично практично збігаються.

6. РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ШЛЯХОМ КЕРУВАННЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЗБУДЖЕННЯ СТАТОРНОГО КОЛА

6.1 Проблеми регулювання напруги генераторних установок з асинхронними генераторами

Застосування конденсаторних компенсаторів реактивної потужності в складі електроенергетичних систем суден сприяє впровадженні генераторних установок з асинхронними генераторами.

Проблеми, що стримують широке застосування асинхронних короткозамкнених генераторів з конденсаторним збудженням в автономних генераторних установках можна згрупувати за п'ятьма напрямками [84, 85, 93-95, 180, 182-184, 186-188, 190, 192-202]:

- збудження генератора шляхом генерування реактивної потужності в колі статора генератора;
- вибір оптимальних конструктивних параметрів асинхронної машини, що працює в генераторному режимі;
- створення керованого джерела реактивної потужності з хорошими техніко-економічними показниками;
- визначення закону керування конденсаторним джерелом реактивного струму для стабілізації напруги генераторної установки;
- ефективне керування режимами роботи автономної генераторної установки з асинхронним генератором.

Зазначені проблеми включають в себе вирішення низки наступних науково-технічних завдань.

Вимагає пояснення фізичний процес самозбудження асинхронного генератора. Досі існує дві версії: «жорсткого» та «м'якого» початкового збудження і впливу залишкового намагнічування ротора генератора [94, 143, 148, 187, 192].

Забезпечення сталого самозбудження асинхронного генератора після втрати намагнічування ротора в результаті коротких замикань, перевантаження і втрати збудження або тривалої стоянки в неробочому стані [4, 10, 95]. Математичний опис процесу збудження та встановлення сталої амплітуди генеруючої напруги змінного струму [93, 94, 100, 101, 112, 122, 156, 177, 179]. Складання адекватних моделей системи «генератор - конденсатори» з урахуванням змінного намагнічування асинхронної машини [9, 91, 113, 114]. Отримання передавальних функцій асинхронного генератора по каналах збудження, частоти і навантаження [47, 52, 109, 149].

Формування бажаних навантажувальних та електротехнічних характеристик генератора шляхом вибору його конструктивних параметрів і розмірів [9, 10, 147]. Вибір та порівняння методів зміни конструкції асинхронної машини для роботи в генераторному режимі [166, 191]. Вибір конструкції короткозамкненого ротора та аналіз відповідних характеристик генератора [111, 222]. Вибір оптимальних конструктивних рішень в залежності від областей використання електроустановки [155, 199, 222].

Створення дешевих і малогабаритних конденсаторів змінного струму (плівкових, молекулярних і т. д.) [78]. Використання конденсаторів із змінною ємністю, наприклад, варікондів [24, 30]. Застосування дроселів із змінною індуктивністю [59]. Підмагнічування магнітного кола асинхронного генератора для зміни його індуктивності [9]. Використання баластних керованих резисторів в навантаженні генератора [164]. Створення багатосекційного блоку конденсаторів, керованого напівпровідниковими ключами [163]. Розробка схем включення конденсаторів без їх перезаряду в моменти комутації [35, 59, 181].

Вибір розрядності цифрового (дискретного) регулятора реактивного струму збудження генератора [23]. Швидкодіюче вимірювання трифазної змінної напруги з урахуванням її несиметрії та нелінійності [35]. Вибір оптимального закону управління дискретним регулятором напруги [44, 45]. Розробка методики визначення налагоджувальних коефіцієнтів дискретного регулятора напруги [48]. Застосування принципу регулювання по навантаженню в асинхронному генераторному комплексі [59].

Керування автономною роботою асинхронної генераторної установки: при постійній частоті обертання [43]; при істотно змінній частоті обертання [35, 105, 117]; при пуску потужних електродвигунів [15]. Керування включенням асинхронної генераторної установки на паралельну роботу: з асинхронною генераторною установкою [60]; з синхронною генераторною установкою [3]; з потужною мережею [35, 167]. Розподіл активної та реактивної потужності при паралельній роботі [32, 39]. Забезпечення стійкості паралельної роботи [34, 36]. Селективність захисту при коротких замиканнях в електростанціях з асинхронними генераторами [35].

6.2 Асинхронний генератор як об'єкт автоматичного керування

Впровадження асинхронних генераторів в судновій електроенергетичній системі можливе при ефективній роботі систем керування їх напругою і частотою. Проектування та вибір елементів систем керування, визначення оптимальних настроювальних параметрів повинно проводитися методами теорії автоматичного керування. Вихідними регульованими параметрами генератора є відхилення діючого значення напруги змінного струму ΔU і частоти струму $\Delta \omega$ від номінальних значень.

Керування напругою та частотою струму асинхронного короткозамкненого генератора з конденсаторним збудженням здійснюється шляхом зміни ємнісного струму статорного кола (провідності конденсаторів збудження b_c) і частоти обертання ротора генератора Ω .

Активно-індуктивні споживачі генератора являються його збурюючим впливом, в якості параметрів котрих можуть бути обрані провідності активної g і реактивної b_L складових навантаження генератора.

Асинхронний генератор може бути представлений (рис. 6.1) як багатозв'язаний об'єкт керування напругою ΔU і частотою генерованого струму $\Delta \omega$.

Активне навантаження генератора g створює гальмівний момент ΔM , який впливає на його приводний двигун.

У сталому режимі асинхронний генератор як об'єкт керування може бути представлений коефіцієнтами передачі по частоті $k_{u\Omega}$, $k_{\omega\Omega}$ і провідності навантаження k_{ug} , $k_{\omega g}$, k_{mg} і k_{ub} , рис. 6.2.

Ефективне керування напругою асинхронного генератора з конденсаторним збудженням передбачає знання його передавальних функцій по каналах збудження та навантаження. Аналітичне дослідження перехідних процесів в асинхронному генераторі описано в роботах [8, 52, 93-95, 141]. Тут наведені вирази для коренів характеристичного рівняння та перехідні характеристики генератора, наведена методика визначення показника загасання (наростання) коливань напруги генератора.

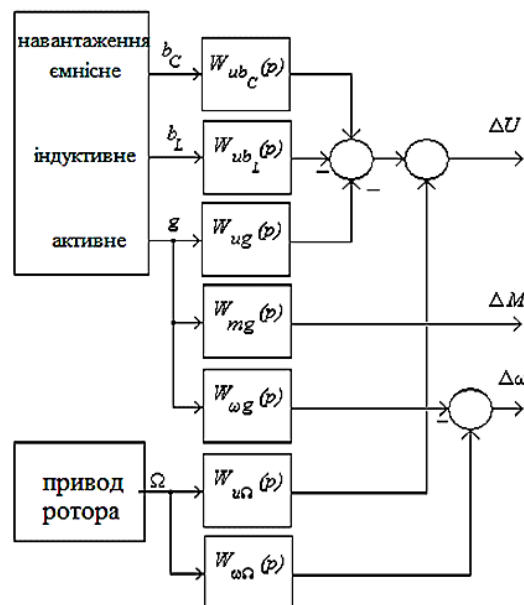


Рис. 6.1. Подання асинхронного генератора як багатозв'язкового об'єкта керування напруги і частоти струму

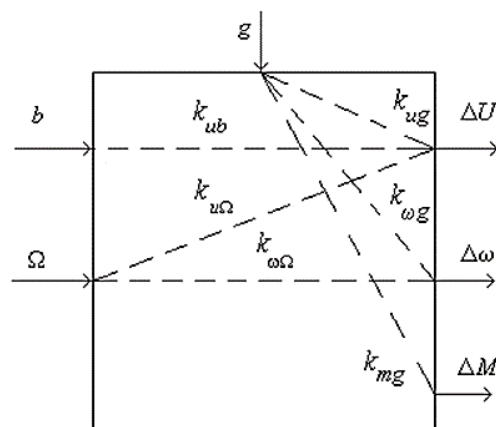


Рис. 6.2. Коефіцієнти передачі асинхронного генератора

Представимо залежності між напругою асинхронного генератора, провідністю конденсаторів збудження та навантаженням у вигляді передавальної функції.

Миттєве значення змінної напруги в обмотці статора може бути представлено проекцією узагальненого вектору напруги \bar{U}_s на напрямок електричної вісі обмотки [96], де амплітуда змінної напруги буде дорівнювати модулю вектору напруги. Тому при математичному описі динамічних характеристик асинхронного генератора як об'єкта керування напруги будемо розглядати зміну модуля вектору напруги за часом при змінах параметрів навантаження і збудження. Рівняння, що описують напругу \bar{U}_s , струм \bar{I}_s, \bar{I}_r статорного та роторного кола генератора і пов'язані з ними потокозчеплення $\bar{\Psi}_s, \bar{\Psi}_r$, мають наступний вигляд [52, 96]:

$$\begin{aligned} \bar{U}_s + p\bar{\Psi}_s + j\omega_s\bar{\Psi}_s + r_s\bar{I}_s &= 0, & p\bar{\Psi}_r + j(\omega_s - \omega_r)\bar{\Psi}_r + r_r\bar{I}_r &= 0 \\ \bar{\Psi}_s &= (L_{s\sigma} + L_m)\bar{I}_s + L_m\bar{I}_r, & \bar{\Psi}_r &= L_m\bar{I}_s + (L_{r\sigma} + L_m)\bar{I}_r. \end{aligned} \quad (6.1)$$

Тут r_s, r_r – опір статора і ротора; L_m – індуктивність контуру намагнічування; $L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$ – індуктивності розсіювання статора і ротора.

Записуємо рівняння навантаження і збудження генератора для паралельного з'єднання активного навантаження з провідністю g , дроселя з індуктивністю L і опором r , а також конденсатора ємністю C у вигляді:

$$\bar{I}_s = \left[g + \frac{1}{r + (p + j\omega_s)L} + (p + j\omega_s)C \right] \bar{U}_s. \quad (6.2)$$

Рішення системи рівнянь (6.1) дозволяє визначити статорний струм асинхронного генератора:

$$\bar{I}_s = - \frac{\bar{U}_s (p + js\omega_s + \alpha_r)}{\sigma L_s [(p + j\omega_s)(p + js\omega_s) + (p + j\omega_s)\alpha'_r + (p + js\omega_s)\alpha'_s + \alpha_s \alpha'_r]}. \quad (6.3)$$

Тут використані наступні загальноприйняті позначення [10, 52]:
 $\sigma = (L_s L_r - L_m^2) / L_s L_r$ – коефіцієнт розсіювання; L_s, L_r – індуктивності статора і ротора; $\alpha_r = r_r / L_r$, $\alpha_s = r_s / L_s$ – коефіцієнти загасання обмоток ротора і статора при розімкнутих колах статора і ротора; $\alpha'_r = \alpha_r / \sigma$, $\alpha'_s = \alpha_s / \sigma$ – теж при замкненому статорі і роторі; $s = (\omega_s - \omega_r) / \omega_s$ – ковзання.

Якщо виключити струм \bar{I}_s з рівнянь (6.2) та (6.3), то отримаємо характеристичне рівняння з комплексними коефіцієнтами, що описує режим збудження генератора, яке при активно-ємнісному навантаженні має наступний вигляд:

$$(p + j\omega_s) + \alpha_n + \frac{(p + js\omega_s + \alpha_r) / \sigma L_s C}{(p + j\omega_s)(p + js\omega_s) + (p + j\omega_s)\alpha_r' + (p + js\omega_s)\alpha_s' + \alpha_s\alpha_r'} = 0$$

Тут $\alpha_n = g/C$ – коефіцієнт загасання активно-ємнісного навантаження.

Виконавши згрупування членів при однакових степенях оператора p , запишемо характеристичне рівняння третього порядку з комплексними коефіцієнтами:

$$\begin{aligned} p^3 + p^2(\alpha_n + \alpha_s' + \alpha_r' + 2j\omega_s + j\omega_s s) + p[\alpha_n\alpha_s' + \alpha_r'\alpha_n + \frac{1}{\sigma L_s C} - \omega_s^2(1 + 2s) + \\ + j\omega_s(2\alpha_r' + \alpha_s' + \alpha_n + \alpha_s' s + \alpha_n s)] + [\alpha_r'(\frac{1}{L_s C} - \omega_s^2) + \alpha_r\alpha_s'\alpha_n - s\omega_s^2(\alpha_s' + \alpha_n) + \\ + j\omega_s(\alpha_s'\alpha_r + \alpha_r'\alpha_n + s\alpha_s'\alpha_n + \frac{s}{\sigma L_s C} - s\omega_s^2)] = 0 \end{aligned} \quad (6.4)$$

Корені одержаного рівняння (6.4) дозволяють оцінити динамічні властивості асинхронного генератора як об'єкту керування.

В системі координат, що обертається разом з полем, вектор напруги нерухомий, тому в рівнянні (6.4) вільний член в сталому стані дорівнює нулю. При цьому один із коренів характеристичного рівняння (6.4) також дорівнює нулю ($p_1 = 0$) що пояснюється знаходженням системи на межі стійкості при генеруванні електричних коливань із сталою амплітудою.

У перехідному процесі, що виникає при зміні параметрів генератора, збудження або навантаження, вільний член рівняння (6.4) стає не рівним нулю, а дійсна частина кореня p_1 визначає інтенсивність загасання або наростання генерованих коливань. Як показують дослідження [52] коренів рівняння (6.4), дійсна та уявна частини кореня p_1 навіть при самому інтенсивному перехідному процесі майже на порядок менше двох інших коренів цього рівняння.

Це дозволяє одержати наближені аналітичні вирази коренів характеристичного рівняння асинхронного генератора з урахуванням малості одного з коренів порівняно з двома іншими, застосовуючи теорему Вієта, де вільний член рівняння

(6.4) дорівнює добутку трьох коренів із зворотним знаком, коефіцієнт при першому ступені оператора p дорівнює добутку коренів p_2 і p_3 , а коефіцієнт при p^2 – сумі коренів p_2 і p_3 з мінусом. Щоб визначити «великі» корені p_2 та p_3 , можна корінь p_1 і вільний член рівняння (6.4) вважати рівним нулю, а для визначення кореня p_1 – розділити вільний член на коефіцієнт при операторі p .

Визначаємо величину кореня p_1 рівняння (6.4), нехтуючи ковзанням і складовими другого порядку малості:

$$p_1 = -\alpha'_r \cdot \frac{\frac{1}{L_s C} - \omega_s^2 \left(1 + \frac{s(\alpha'_s + \alpha'_n)}{\alpha'_r}\right)}{\frac{1}{C(L_{s\sigma} + L_{r\sigma})} - \omega_s^2 + \alpha'_n(\alpha'_s + \alpha'_r)} \approx$$

$$\approx r_r \omega_s \left[\omega_s C - \frac{1}{L_s \omega_s} - g^2(L_{s\sigma} + L_{r\sigma})\omega_s - gr_s C \omega_s \right] \approx r_r \omega_s (b_c - b_g) \quad (6.5)$$

Тут $b_c = \omega_s C$ – провідність конденсаторів збудження,

$b_g = (1/L_s \omega_s) + g^2(L_{s\sigma} + L_{r\sigma})\omega_s + gr_s C \omega_s$ – індуктивна провідність асинхронного генератора з урахуванням розмагнічуючої дії навантаження.

Рівняння (6.5) встановлює важливий висновок: швидкість самозбудження генератора пропорційна опорі ротора і різниці провідностей конденсаторів і генератора.

Якщо $b_c > b_g$, корінь p_1 буде позитивним, модуль вектору напруги збільшується, зростає струм намагнічування, машина насичується і провідність асинхронного генератора зменшується до тих пір, поки не встановиться рівність провідностей $b_c = b_g$. Якщо ж $b_c < b_g$, то корінь p_1 негативний, а напруга та провідність генератора зменшуються.

Отже, пропорційна залежність показника наростання коливань від різниці провідностей ємнісного навантаження та генератора, а також залежність навантаження від напруги, забезпечує встановлення і стійкість коливань асинхронного генератора.

Визначимо два інших кореня p_2 і p_3 з характеристичного рівняння другого порядку, одержаного з рівняння (6.4), застосовуючи теорему Вієта і враховуючи малість кореня p_1 :

$$p^2 + p (\alpha_n + \alpha'_s + \alpha'_r + 2j\omega_s + j\omega_s s) + [\alpha_n \alpha'_s + \alpha'_r \alpha_n + \frac{1}{\sigma L_s C} - \omega_s^2 (1 + 2s) + j\omega_s (2\alpha'_r + \alpha'_s + \alpha_n + \alpha'_s s + \alpha_n s)] = 0$$

При ковзанні, яке дорівнює нулю, вираз для дискримінанта рівняння має вигляд:

$$D = \frac{1}{4} (\alpha_n + \alpha'_s + \alpha'_r + 2j\omega_s)^2 - [\alpha_n \alpha'_s + \alpha'_r \alpha_n + \alpha_s \alpha'_r + \frac{1}{\sigma L_s C} - \omega_s^2 + j\omega_s (2\alpha'_r + \alpha'_s + \alpha_n)] \approx -\omega_k^2 (1 + j \frac{\omega_s}{\omega_k} \alpha'_r)$$

Використовуючи наближену рівність $(1 + \alpha)^2 \approx 1 + 2\alpha$ при $\alpha \ll 1$, получимо:

$$\sqrt{D} \approx j\omega_k - \frac{\omega_s}{2\omega_k} \cdot \alpha'_r$$

Тут введено позначення частоти загасання струмів розсіювання

$$\omega_k = \sqrt{\frac{1}{\sigma L_s C} - \omega_s^2 - \frac{(\alpha_n + \alpha'_s + \alpha'_r)^2}{4} + \alpha_s \alpha'_r} \approx \frac{1}{C(L_{s\sigma} + L_{r\sigma})}$$

Корені квадратного рівняння приблизно дорівнюють:

$$\begin{aligned} p_2 &\approx -\frac{1}{2} [\alpha_n + \alpha'_s + \alpha'_r (1 + \omega_s / \omega_k)] + j(\omega_k - \omega_s), \\ p_3 &\approx -\frac{1}{2} [\alpha_n + \alpha'_s + \alpha'_r (1 - \omega_s / \omega_k)] - j(\omega_k + \omega_s) \end{aligned} \quad (6.6)$$

Дійсні частини коренів p_2 і p_3 , що характеризують затухаючий процес відповідних векторів у виразі перехідного процесу, приблизно однакові і відрізняються на величину $\Delta\alpha = \alpha'_r (\omega_s / \omega_k)$. Кореням p_2 і p_3 у перехідному процесі відповідають вектори, які обертаються відносно поля з частотами $(\omega_k - \omega_s)$ та $(-\omega_k - \omega_s)$, а відносно нерухомих обмоток - з частотою ω_k .

Частота ω_k є власною частотою коливального контуру, утвореного ємністю збудження і індуктивністю розсіювання статорної та роторної обмоток. Ця частота слабо залежить від активного навантаження і в три – чотири рази перевищує частоту обертання поля ω_s . Отже, фізичний зміст коренів p_2 і p_3 полягає в тому, що вони характеризують зміну енергії, запасеної в полях розсіювання статора і ротора. Інтенсивність загасання цих процесів суттєво залежить від навантаження генератора. Дійсна частина коренів p_2 і p_3 на холостому ході майже на порядок менше, ніж при номінальному навантаженні.

При повному скиданні навантаження спостерігаються коливання векторів напруги, які затухають на протязі двох – трьох періодів генерованого струму (рис. 6.5, а), а при підключенні навантаження цей процес стає аперіодичним і закінчується за чверть періоду (рис. 6.5, б, в). Цей факт підтверджується результатами експерименту і моделюванням на комп'ютері [52], рис. 6.3, рис. 6.4, рис. 6.5.

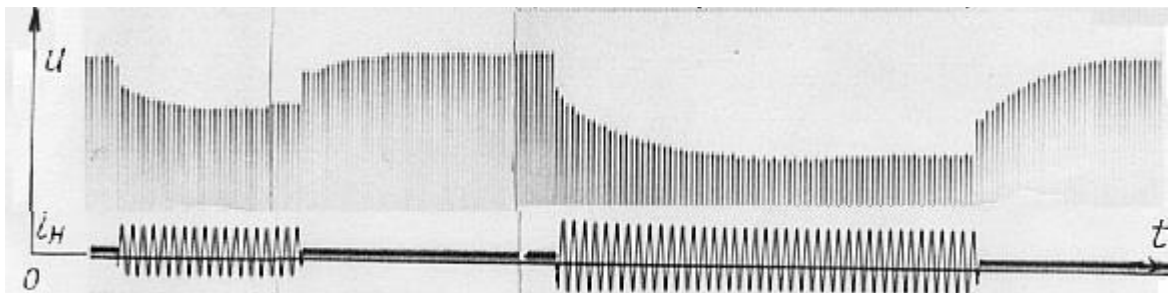


Рис. 6.3. Експериментальні перехідні процеси в асинхронному генераторі при включенні і відключенні навантаження

При активно-індуктивному навантаженні та ємнісному збудженні векторне характеристичне рівняння асинхронного генератора має четвертий порядок:

$$\frac{L}{L_s} (\alpha_L + p + j\omega_s)(\alpha_r + p + js\omega_s) + \sigma[CL(\alpha_n + p + j\omega_s)(\alpha_L + p + j\omega_s) + 1] \times \\ \times [\alpha_r' \alpha_s + \alpha_r'(p + j\omega_s) + \alpha_s'(p + js\omega_s) + (p + j\omega_s)(p + js\omega_s)] = 0 \quad (6.7)$$

Тут $\alpha_L = r/L$ – загасання в індуктивному навантаженні.

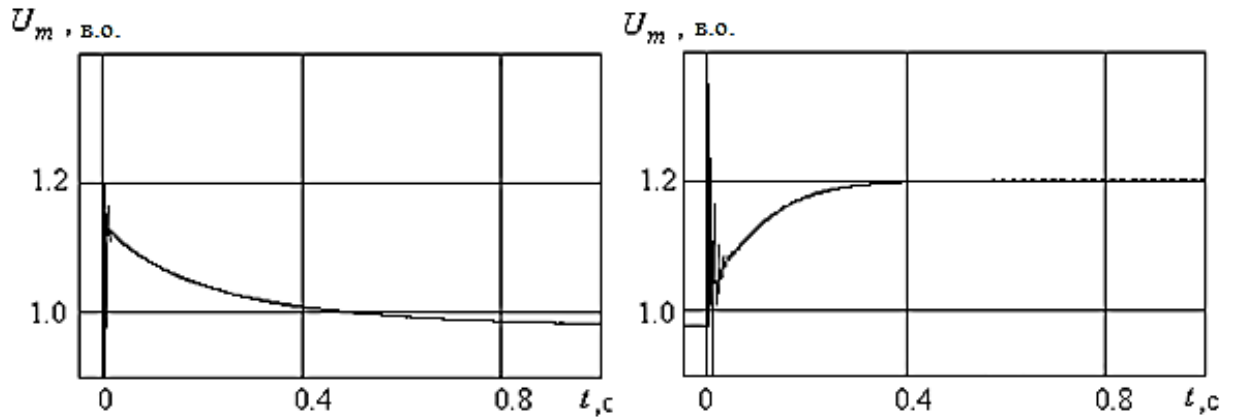


Рис. 6.4. Моделювання перехідних процесів в асинхронному генераторі при включенні і вимиканні навантаження

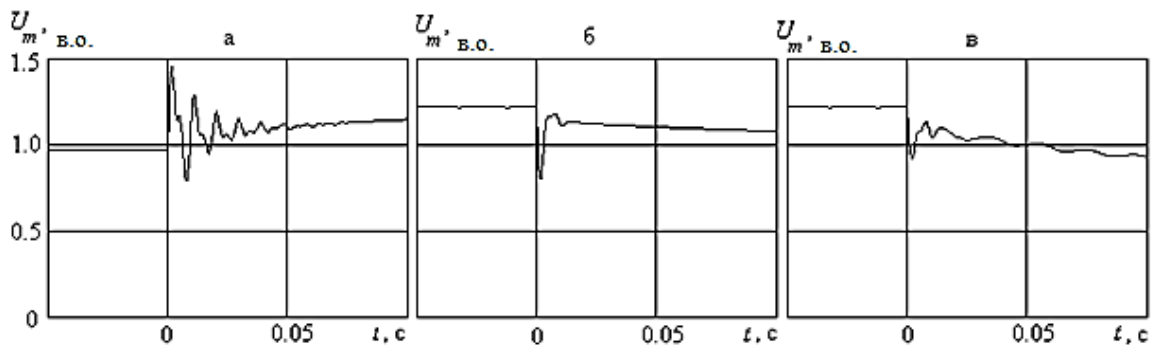


Рис. 6.5. Моделювання процесів розсіювання енергії в індуктивностях статора і ротора асинхронного генератора при вимиканні (а) і включенні (б) активного (а, б) або активно-індуктивного (в) навантаження

У відповідності з теоремою Вієта багаточлен другого порядку з рівняння (6.7) у других квадратних дужках представимо у вигляді добутку $(p - p_1')(p - p_2')$:

$$\alpha_r' \alpha_s + \alpha_r'(p + j\omega_s) + \alpha_s'(p + js\omega_s) + (p + j\omega_s)(p + js\omega_s) = (p - p_1')(p - p_2')$$

Корені цього многочлена будуть визначатись так:

$$p_1' = -\frac{\alpha_s' + \alpha_r'}{2} - j\omega_s \quad p_2' = -\frac{\alpha_s' + \alpha_r'}{2} - 2js\omega_s$$

При активно-індуктивних навантаженнях асинхронного генератора, коефіцієнт загасання яких близький до середнього значення коефіцієнтів загасання

обмоток машин $\alpha = (\alpha'_s + \alpha'_r)/2$, можна аналітично визначити четвертий корінь, що характеризує затухання процесів в активно-індуктивному навантаженні:

$$p_4 = p_1 = -\alpha_L - j\omega_s.$$

Тоді інші корені характеристичного рівняння (6.7) можна визначити з рівняння третього порядку. Ці корені при $s = 0$ будуть дорівнювати:

$$p_1 = 0; \quad p_2 = -\frac{1}{2}[\alpha_n + \alpha'_s + \alpha'_r(1 + \omega_s/\omega_k)] + j(\omega_k - \omega_s);$$

$$p_3 = -\frac{1}{2}[\alpha_n + \alpha'_s + \alpha'_r(1 - \omega_s/\omega_k)] - j(\omega_k + \omega_s).$$

Ці корені майже збігаються з коренями, отриманими для випадку активного навантаження генератора.

При активно-індуктивному навантаженні асинхронного генератора перехідний процес характеризується ще одним вектором із загасанням $\alpha_L = r/L$, що обертається відносно поля з частотою ω_s , тобто нерухомому відносно статорної обмотки.

Кореням характеристичного рівняння (6.5) - (6.7) відповідають векторні складові загального рішення диференціального рівняння, що описує режим самозбудження асинхронного генератора. При зміні параметрів асинхронного генератора перехідний процес, що виникає, можна описати чотирма векторами, записаними в нерухомій системі координат:

$$\begin{aligned} \bar{U}_s = & U_1 e^{r_r \omega_s (b_c - b_g) t} e^{j\omega_s t} + U_2 e^{-\frac{1}{2}(\alpha_n + \alpha'_s + \alpha'_r) t} e^{j\omega_k t} \\ & + U_3 e^{-\frac{1}{2}(\alpha_n + \alpha'_s + \alpha'_r) t} e^{-j\omega_k t} + U_4 e^{-\alpha_L t} \end{aligned} \quad (6.8)$$

Цей перехідний процес в генераторній установці описується однорідним диференціальним рівнянням, тому його може викликати тільки зміна «своїх» параметрів системи «приводний двигун – генератор – навантаження», тобто, наприклад, таких як частота обертання, провідність навантаження або ємність збудження.

При таких змінах параметрів за допомогою рівняння (6.8) можна записати вираз передавальної функції асинхронного генератора, що зв'яже статорну напругу генератора зі зміною його параметрів.

Напруга на обмотці статора являє собою проекцію вектору \overline{U}_s (6.8) на вісь фазної обмотки.

Кожен вектор рівняння (6.8) обертається зі своєю частотою і загасає зі швидкістю, що визначається дійсною частиною відповідного кореня характеристичного рівняння. У перехідному процесі складові рівняння (6.8) відображають відповідні фізичні явища. Перша складова описує самозбудження, при якому змінюється провідність генератора b_g до тих пір, поки загасання цього доданку не стане рівним нулю, тобто $b_c - b_g = 0$. При $t \rightarrow \infty$ вектор $\overline{U}_1 e^{j\omega_s t}$ обертається відносно обмоток статора з частотою ω_s і описує новий сталий режим генератора. Друга та третя складові рівняння (6.8) мають приблизно однакове загасання $\alpha_\sigma = (\alpha_n + \alpha'_s + \alpha'_r)/2$ і обертаються в протилежні сторони з частотою ω_k , рівній власній частоті коливального контуру, утвореного ємністю збудження та індуктивностями розсіювання статора і ротора. Ці складові векторного рівняння (6.8) відображають процес розсіювання енергії, запасеної в індуктивностях розсіювання генератора, див. рис.6.5, а, б.

Четвертий доданок перехідного процесу характеризує розсіювання енергії в індуктивному навантаженні і призводить до модуляції вектору напруги генератора з частотою, що дорівнює частоті генерованого струму (див. рис. 6.5). В статорних обмотках цей вектор створює сталу складову затухаючої напруги.

Процес самозбудження асинхронного генератора описується коренем p_1 . Декремент згасання першого доданку рівняння (6.8) залежить від різниці провідностей конденсаторів b_c і генератора b_g . У свою чергу провідність генератора визначається його насиченням, тобто залежить від величини напруги.

Для серійних асинхронних машин типів 4А, АІР та ін. ця залежність має характерну особливість: при нарузі до 60...70 % від номінального значення індуктивність головного контуру машини практично стала, а при нарузі 90...130 % - провідність b_g лінійно збільшується при зростанні напруги. Тому при ненасиченому і в насиченому стані перехідний процес самозбудження відбувається не однаково. При малих напругах та небалансі реактивних провідностей $b_c \neq b_g$ їх різниця

залишається сталою, швидкість самозбудження також стала та пропорційна цій різниці. При насиченні генератора виникає негативний зворотній зв'язок між напругою і провідністю генератора, що робить процес самозбудження аперіодичним, рис. 6.6.

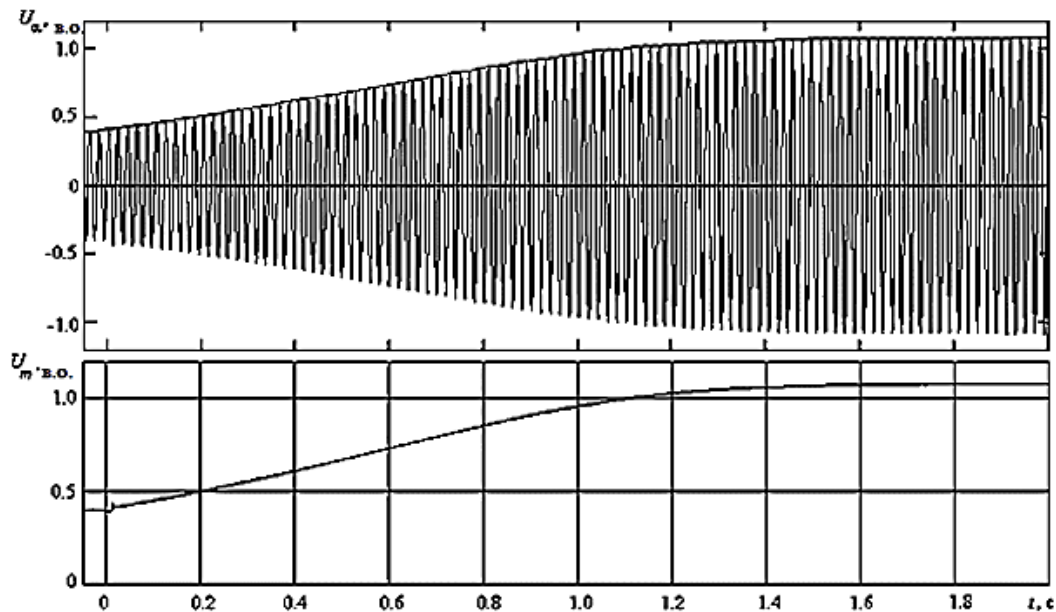


Рис. 6.6. Моделювання процесів наростання напруги асинхронного генератора

Розглядаємо процес самозбудження асинхронного генератора у відхиленні амплітуди напруги ΔU та провідностей Δb_c і Δb_g . Виходячи із значення кореня характеристичного рівняння p_1 , отримуємо, що швидкість зміни напруги пропорційна різниці реактивних провідностей $(\Delta U/dt) = r_r \omega_s (\Delta b_c - \Delta b_g)$. На насиченій ділянці приріст напруги пропорційний збільшенню провідності: $\Delta U = k_b \Delta b_g$. Виключивши Δb_g , отримаємо передавальну функцію асинхронного генератора по каналу «збудження - обвідна напруги», що викликається самозбудженням:

$$W_g = \frac{\Delta U}{\Delta b_c} = \frac{k_b}{\frac{k_b p}{r_r \omega_s} + 1} = \frac{k_b}{T_g p + 1} \quad (6.9)$$

В режимі насичення генератора W_g представляє собою аперіодичну ланку першого порядку. На лінійній ділянці кривої намагнічування передавальна функція асинхронного генератора дорівнює $W_g = r_r \omega_s / p$ і представляє собою інтегральну ланку.

Такий опис перехідного процесу самозбудження генератора добре узгоджується з експериментальними даними [141]. При малих напругах асинхронного генератора з конденсаторним збудженням напруга збільшується лінійно, а при досягненні насиченої ділянки подальше його наростання відбувається експоненціально.

Особливість перехідного процесу в асинхронному генераторі полягає в тому, що він складається з двох суттєво різних за часом протікання процесів. По-перше, швидкого згасання процесів розсіювання при поволі змінному магнітному потоці в зазорі машини. По-друге, повільної зміни головного потоку намагнічування, викликаного небалансом реактивних провідностей конденсаторів і генератора, тривалість якого досягає 50...70 періодів генерованого струму. Перший процес описується другим, третім і четвертим доданками, а другий – першим доданком рівняння (6.8). Передавальна функція, яка пов'язана із загасанням процесів в контурах розсіювання W_σ , може бути представлена коливальною ланкою другого порядку, характеристичне рівняння якої має два комплексно спряжених кореня:

$$p_{2,3} = -\frac{1}{2}(\alpha_n + \alpha'_s + \alpha'_r) \pm j\omega_k:$$

$$W_\sigma = \frac{k_\sigma}{T_\sigma^2 p^2 + 2\alpha_\sigma T_\sigma^2 p + 1}, \quad (6.10)$$

де $T_\sigma = \sqrt{1/\alpha_\sigma^2 + \omega_k^2}$ – стала часу загасання, $\alpha_\sigma = (\alpha_n + \alpha'_s + \alpha'_r)/2$ – декремент загасання в контурах розсіювання.

При активно-індуктивному навантаженні генератора в перехідному процесі спостерігається експоненційна зміна енергії в індуктивності зі сталою часу, що дорівнює $T_L = L/r$. Такому процесу відповідає передавальна функція:

$$W_L = \frac{k_L}{T_L p + 1}.$$

У загальному вигляді передавальна функція напруги асинхронного генератора за збудженням та навантаженням може бути представлена трьома складовими [52, 141]:

$$W_{ug} = W_g + W_\sigma + W_L = \frac{k_b}{T_g p + 1} + \frac{k_\sigma}{T_\sigma^2 p^2 + 2\alpha_\sigma T_\sigma^2 p + 1} + \frac{k_L}{T_L p + 1}$$

Процеси збудження та розсіювання непорівнянні за часом, тому передавальні функції W_σ і W_L в сумі з W_g можуть розглядатися як пропорційні ланки з коефіцієнтами k_σ та k_L :

$$W_{ub} = \frac{k_b}{T_g p + 1} + k_\sigma + k_L . \quad (6.11)$$

Чисельні значення коефіцієнтів передачі та сталої часу при експериментальному дослідженні і при моделюванні практично збігаються з результатами (похибка не перевищує 5%), отриманими аналітично. Описані динамічні властивості асинхронного генератора мають враховуватися при побудові систем керування напруги асинхронних генераторних установок, а також при дослідженні суднових електроенергетичних систем до складу яких, крім асинхронних генераторів, входять синхронні генератори і конденсаторні компенсатори реактивної потужності.

6.3 Коефіцієнти передачі асинхронного генератора

Як зазначалось у попередньому параграфі асинхронний генератор як об'єкт керування може бути представлений коефіцієнтами передачі по частоті $k_{u\Omega}$, $k_{\omega\Omega}$ і провідності навантаження k_{ug} , $k_{\omega g}$, k_{mg} і k_{ub} , (див. рис. 6.2).

Визначення аналітичних залежностей напруги U , моменту M та частоти ω від провідностей навантаження g , b_L , b_C і частоти обертання генератора Ω дозволяють знайти вирази для вказаних коефіцієнтів передачі АГ.

Напруга АГ нелінійно залежить від добутку реактивної провідності контуру намагнічування b_0 на частоту струму ω $U = f(b_0\omega)$. Як показали експериментальні дослідження [59, 156], поблизу номінальної напруги асинхронної машини зі стандартним насиченням контуру намагнічування, ця залежність з достатньою точністю може бути апроксимована гіперболічною функцією Френеля, рис.6.7:

$$U = f(b_0\omega) = a - \frac{b}{b_0\omega} = a - \frac{bx_0}{\omega}, \quad (6.12)$$

де a, b – сталі коефіцієнти апроксимації, $x_0 = 1/b_0$.

Для функції (6.12), наведеної на рис.6.7, коефіцієнти апроксимації асинхронної машини типу 4А дорівнюють: $a = 1,68$; $b = 0,68$.

Аналітичні вирази провідності контуру намагнічування асинхронної машини b_0 від змішаного статорного навантаження та частоти можуть бути отримані на підставі аналізу Г-подібної схеми заміщення [99].

Скористаємося Г-подібною схемою заміщення асинхронної машини, у якій винесений на вихід статорних обмоток контур намагнічування b_0, g_0 та підключене змішане навантаження статора: активне g , ємнісне b_C та індуктивне b_L .

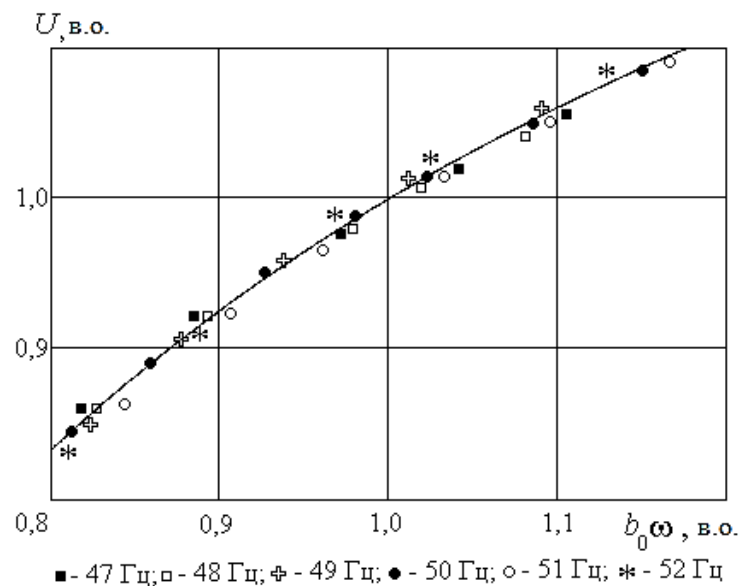


Рис. 6.7. Апроксимація кривої намагнічування асинхронної машини типу 4А потужністю 2,8 кВт функцією Френеля

Винесення контуру намагнічування на вихід генератора досягається введенням поправочного коефіцієнта $\dot{\sigma}$, що спрощує аналітичні вирази:

$$\dot{\sigma} = 1 + Z_s/Z_m \approx \left(1 + \frac{x_s}{x_m}\right) - j \frac{r_s}{x_m} = \sigma e^{-j\psi},$$

де $\sigma = \left(1 + \frac{x_s}{x_m}\right) \psi = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2r_s}{(x_s+x_m)} \approx \frac{1}{2} \operatorname{arctg} 2r_s b_0$.

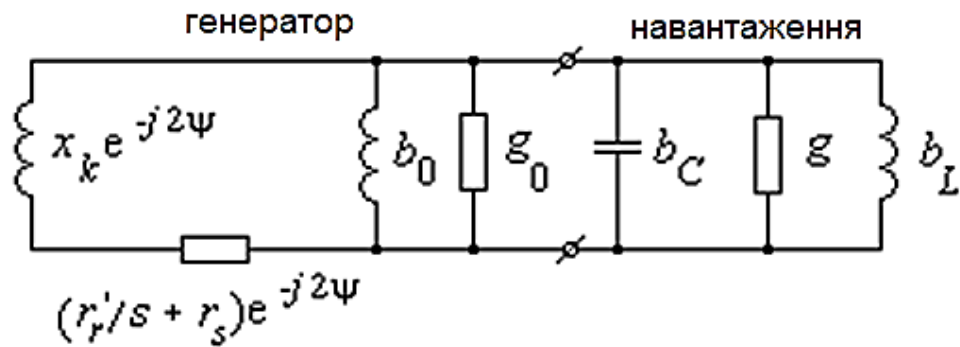


Рис. 6.8. Г-подібна схема заміщення асинхронного генератора зі змішаним статорним навантаженням

При нехтуванні уявною частиною поправочного коефіцієнта σ , яке зроблене в роботах [9, 10], призводить до похибки у 5% при визначенні залежності напруги генератора від навантаження. При малих навантаженнях генератора похибка у визначенні коефіцієнта передачі k_{ug} становить приблизно 40%.

Врахування уявної частини поправочного коефіцієнта σ досягається введенням співмножника $e^{-2j\psi}$ для контурів розсіювання в Г-подібну схему заміщення.

Самозбудження і робота асинхронного генератора здійснюються за умови балансу провідностей генератора і навантаження:

$$\frac{1}{r_k e^{-2j\psi} + jx_k e^{-2j\psi}} - jb_0 + g_0 + jb_C - jb_L,$$

де $r_k = r_s + r_r'/s$, $x_k = x_s + x_r'$.

Рівняння балансу для уявних і дійсних частин комплексного рівняння балансу провідностей асинхронного генератора отримуємо з врахуванням того, що $e^{-2j\psi} = \cos 2\psi - j \sin 2\psi \approx 1 - j2r_s b_0$:

$$b_C - b_L - b_0 - 2(g + g_0)r_s b_0 - \frac{x_k}{r_k^2 + x_k^2} = 0, \quad (6.13)$$

$$g + g_0 + \frac{r_k}{r_k^2 + x_k^2} + 2(b_C - b_L - b_0)r_s b_0 = 0. \quad (6.14)$$

Якщо вирішити друге рівняння балансу активних провідностей (6.14), знайдемо наближену залежність $r_k \approx 1/g + g_0$. Підставляючи це наближене значення в перше рівняння балансу реактивних провідностей (6.14), одержимо:

$$b_0 \approx b_C - b_L - x_k(g + g_0)^2 - 2r_s b_0(g + g_0).$$

Спільно із залежністю напруги генератора від провідності контуру намагнічування і частоти: $U = f(b_0 \omega) = a - \frac{b}{b_0 \omega} = a - \frac{bx_0}{\omega}$ отримаємо аналітичну залежність

$$U = a - b/\omega[b_C - b_L - x_k(g + g_0)^2 - 2r_s b_0(g + g_0)]. \quad (6.15)$$

Проведені розрахунки напруги генератора поблизу усталеного режиму дають досить точні результати, що дозволяє одержати аналітичні вирази для коефіцієнтів передачі асинхронного генератора.

Частота генерованого струму ω залежить від частоти обертання ротора Ω через ковзання s : $\omega = \Omega/(1 - s)$.

Ковзання може бути визначене з рівняння балансу провідностей:

$$s = -\frac{r'_r(g + g_0)}{1 + r'_s(g + g_0) - x_k^2(g + g_0)^2} \approx -r'_r(g + g_0).$$

Тоді частота генератора розраховується через провідність навантаження:

$$\omega = \frac{\Omega}{1 + r'_r(g + g_0)} \quad (6.16)$$

Момент опору генератора можна розрахувати за формулою [56]:

$$M = \text{Re}(\overline{\Psi}_s) \cdot \text{Im}(\overline{I}_s) - \text{Im}(\overline{\Psi}_s) \cdot \text{Re}(\overline{I}_s).$$

Вектор струму статора при активному навантаженні пропорційний провідності: $\overline{I}_s = \overline{U}_s g$. Якщо потокозчеплення $\overline{\Psi}_s$ і напруга \overline{U}_s генератора не змінюються, то момент опору буде пропорційний навантаженню:

$$\Delta M = k_{mg} \cdot g \quad (6.17)$$

Визначаємо коефіцієнти передачі асинхронного генератора, що представляють собою похідні вихідних величин за керуючим і збурюючим впливами:

$$k_{ubc} = \frac{\partial U}{\partial x_0} \frac{\partial x_0}{\partial b_c}; \quad k_{ubL} = \frac{\partial U}{\partial x_0} \frac{\partial x_0}{\partial b_L}; \quad k_{ug} = \frac{\partial U}{\partial x_0} \frac{\partial x_0}{\partial g};$$

$$k_{u\Omega} = \frac{\partial U}{\partial \omega} \frac{\partial \omega}{\partial \Omega}; \quad k_{\omega g} = \frac{d\omega}{dg}; \quad k_{\omega\Omega} = \frac{d\omega}{d\Omega}; \quad k_{mg} = \frac{dM}{dg}. \quad (6.18)$$

Значення коефіцієнтів передачі асинхронного генератора, використовуючи залежності (6.18), отримаємо у вигляді:

$$k_{ubc} = bx_0^2; \quad k_{ubL} = -bx_0^2; \quad k_{ug} = 2bx_0[x_k x_0(g + g_0) + r_s];$$

$$k_{u\Omega} = bx_0/\omega^2; \quad k_{\omega g} = -\Omega r'_r/[1 + r'_r(g + g_0)]^2;$$

$$k_{\omega\Omega} = -1/1 + r'_r(g + g_0); \quad k_{mg} = 1 \quad (6.19)$$

Розрахунки за наведеними вище виразами (6.19) були зіставлені з експериментальними даними, які одержані на макеті асинхронного генератора типу 4А180 М2 потужністю 30 кВт, 1500 об/хв. Різниця між розрахунковими і експериментальними даними складає близько 4 %.

Як видно з формул (6.19), коефіцієнти, які визначають напругу k_{ubc} , k_{ubL} , k_{ug} , залежать від квадрату опору контуру намагнічування x_0^2 , а коефіцієнт $k_{u\Omega}$ залежить від x_0 . Реактивний опір контуру намагнічування x_0 зменшується при збільшенні насичення і напруги асинхронного генератора. Коефіцієнти передачі за частотою $k_{\omega\Omega}$ та $k_{\omega g}$ мало залежать від активного навантаження g і не залежать від насичення генератора.

6.4. Імпульсні системи керування реактивної потужності генераторних установок

Спільність способів керування напруги асинхронних генераторів та реактивної потужності електроустановок шляхом зміни ємнісного струму навантаження, що протікає в одному і тому ж колі обумовлюють доцільність використання однакових законів керування, [52, 54-56, 122].

Генераторні установки середньої потужності з синхронними та асинхронними генераторами являються основними джерелами електроенергії для механізмів і

систем транспортних засобів, таких як судна, літаки. Вони також широко використовуються в якості резервних джерел електроживлення стаціонарних об'єктів.

Розвиток мікроелектроніки і силових напівпровідників призвело до модернізації їх систем керування. Використання потужних напівпровідникових ключових елементів в системах збудження генераторів істотно підвищило швидкодію систем стабілізації напруги, розширило форсувальні можливості керування. Актуальним завданням стає вибір адекватного алгоритму керування напівпровідниковими системами стабілізації напруги.

Змістом цього параграфу являється аналіз законів керування в класі лінійно-імпульсних систем, які можуть бути використані при проектуванні систем керування асинхронних генераторних установок та компенсаторів реактивної потужності. Такий вибір може бути обґрунтований тим, що зміна стану тиристорних пристроїв відбувається, як правило, один раз за період змінної напруги і зазвичай синхронізована з нею. Це відноситься як до керованих тиристорних випрямлячів з імпульсно-фазовим формуванням відпираючих імпульсів, так і до тиристорних комутаторів навантаження, реактивних елементів або керуючих обмоток генератора. В кожному випадку відбувається ступінчаста та періодична (імпульсна) зміна керуючого сигналу, що впливає на вихідну напругу генератора.

Таким чином, керуючий вплив виявляється квантованим за часом з періодом, який дорівнює періоду мережі. Причому швидкодія каналів керування генераторів, як правило, співпадає з періодом мережі, тому нехтування дискретністю керування за часом може істотно впливати на результат дослідження динамічних властивостей генераторної установки.

Для отримання найбільш загальних рекомендацій по вибору імпульсних законів регулювання для систем збудження генераторів розглядаємо максимально узагальнені моделі систем керування напругою у вигляді дискретних передавальних функцій по каналу керування напругою, рис.6.9.

На структурній схемі позначено: $W_r(p)$ - передавальна функція генератора як об'єкта керування по каналу збудження; $W_p^*(p)$ - передавальна функція імпульсного або цифрового регулятора напруги; $S_0(p)$ - фіксатор нульового порядку, що

описує цифро-аналоговий перетворювач; \perp - імпульсний елемент, що реалізує імпульсне квантування аналогового сигналу.

Розглянемо два найбільш поширених способи регулювання напруги: шляхом зміни напруги в обмотці збудження і шляхом впливу на реактивні елементи або на навантаження в статорному колі генератора [10].

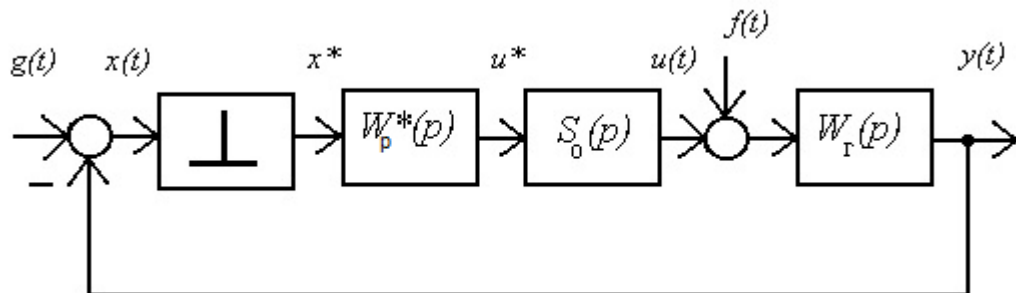


Рис.6.9. Структурна схема імпульсної системи стабілізації напруги суднової генераторної установки

Перший спосіб використовується в системах стабілізації напруги синхронних генераторів, генераторів постійного струму і генераторів з фазним ротором [10]. Другий спосіб застосовується в електроустановках з короткозамкненими асинхронними генераторами [59], в електромережах з конденсаторними компенсаторами реактивної потужності [78], в енергосистемах з автоматично вимикаємим навантаженням [163].

Для отримання рекомендацій щодо вибору імпульсних законів регулювання для систем конденсаторного збудження асинхронних генераторів розглянемо моделі систем керування у вигляді дискретних передавальних функцій.

Розглянемо перехідні процеси в імпульсних системах стабілізації напруги при ступінчастій комутації навантаження дизель-генератора. Параметри цих перехідних процесів регламентуються Державними стандартами та Вимогами Класифікаційних Товариств. Обмеження накладаються на провал і кидок напруги, на час відновлення напруги та усього перехідного процесу [154].

Проаналізуємо процеси відновлення напруги після підключення навантаження в системі стабілізації напруги генератора при регулюванні в колі статора.

Указаний спосіб стабілізації напруги застосовується в генераторних установках з короткозамкненими асинхронними генераторами, в електромережах з конденсаторними компенсаторами реактивної потужності та енергосистемах з навантаженням, що автоматично вимикається.

Керування напругою здійснюється завдяки регулюванню повного статорного навантаження генератора. Відомо [10, 35, 59], що при ступінчастій комутації навантаження генератора процес зміни напруги може бути представлений у вигляді двох складових: швидкого стрибка напруги за рахунок зміни енергії в контурах розсіювання статора та ротора та більш повільного процесу збудження по основному шляху магнітного потоку генератора. У такому випадку передавальна функція генератора з керування напруги може розглядатися як паралельне з'єднання двох інерційних ланок, що характеризують процеси збудження і розсіювання:

$$W_T(p) = \frac{k_b}{T_g p + 1} + \frac{k_\sigma}{T_\sigma p + 1} \quad (6.20)$$

Періодом квантування процесів керування в генераторах природним чином можна вважати період змінного струму T_0 .

Особливості застосування класичних лінійних імпульсних законів керування «П», «І», «ПІ», «ПД» і «ПІД» розглянуті в [51, 52].

В якості фіксатора S_0 використані два види перетворювачів імпульсних сигналів [51, 169, 170]:

$$S_{0\Pi} = \frac{1 - e^{-pT_0}}{p} \quad \text{і} \quad S_{0I} = \frac{1}{p} \quad (6.21)$$

Перший фіксатор перетворює імпульсну послідовність керуючого сигналу $u^* = u(kT_0)\delta(t - kT_0)$ в кусково-ступінчасту функцію $u(t) = u(kT_0)$ для інтервалу часу $kT_0 \leq t \leq (k + 1)T_0$, а другий - у суму $u(t) = \sum_{i=1}^k u(kT_0)$ для того ж інтервалу $kT_0 \leq t \leq (k + 1)T_0$, тобто виконує одночасно функцію інтегратора.

З урахуванням описаних фіксаторів (6.21) передавальні функції імпульсних регуляторів будуть такими:

$$W_{\Pi} = \frac{k_{\Pi}(1 - e^{-pT_0})}{p}, \quad W_I = \frac{k_I}{p}, \quad W_{\Pi I} = \frac{k_I + k_{\Pi}(1 - e^{-pT_0})}{p},$$

$$W_{\text{ПД}} = \frac{(1 - e^{-pT_0})[k_{\text{п}} + k_{\text{д}}(1 - e^{-pT_0})]}{p},$$

$$W_{\text{ПД}} = \frac{(1 - e^{-pT_0})k_{\text{п}} + k_{\text{л}} + k_{\text{д}}(1 - e^{-pT_0})}{p} \quad (6.22)$$

Застосувавши дискретне D – перетворення до передавальних функцій розімкненої системи, скористаємося методом розкладання дробово-раціональних функцій на суму елементарних дробів [107]:

$$D\left\{\frac{1}{p(Tp+1)}\right\} = D\left\{\frac{1}{p} - \frac{1}{p+1/T}\right\} = \frac{e^{pT_0}}{e^{pT_0}-1} - \frac{e^{pT_0}}{e^{pT_0}-e^{-T_0/T}} =$$

$$\frac{e^{pT_0}}{e^{pT_0}-1} \cdot \frac{1-e^{-T_0/T}}{e^{pT_0}-e^{-T_0/T}}.$$

Ступенева збуруюча дія $f = -k_f \cdot 1(t)$, що подається на статорну обмотку генератора, тобто на вхід об'єкта за збуренням, має дискретне зображення [170]:

$$F^*(z) = -\frac{k_f}{1-z^{-1}} = -\frac{k_f z}{z-1}, \text{ а зображення по Лапласу } F(p) = -\frac{k_f}{p}.$$

У відповідності зі схемою рис. 6.9, отримаємо зображення регульованої величини $y^*(z)$:

$$y^*(z) = -\frac{D\{F(p)W_r(p)\}}{1 + D\{W_p(p) \cdot S \cdot W_r(p)\}} \quad (6.23)$$

Щоб отримати дискретну часову послідовність огинаючої регульованої напруги генератора на k - му кроці $y(kT_0)$, достатньо застосувати зворотне z -перетворення до виразу (6.23). Для отримання оригіналу $y(kT_0)$ за його зображенням розкладаємо дробово-раціональну функцію (6.23) в ряд Лорана по негативним степеням оператора z , та скористаємося відомим виразом для z – перетворення:

$$y^*(z) = Z[y(t)] = \sum_{k=0}^{\infty} y(kT_0) \cdot z^{-k}.$$

У такому розкладанні коефіцієнти при операторі z^{-k} дорівнюють значенню решітчастої функції $y(kT_0)$, тобто покроковому значенню змінної при $t = kT_0$.

Розкладання дробово-раціональної функції в ряд Лорана може бути отримано шляхом алгебраїчного ділення полінома чисельника на поліном знаменника.

6.5. Визначення умов стійкості в імпульсних системах стабілізації напруги генераторної установки

Визначимо дискретну передавальну функцію розімкнутої системи стабілізації напруги асинхронного генератора у вигляді паралельного з'єднання ланок (6.20) з пропорційним регулятором (6.22):

$$\begin{aligned} W_{\Pi}^* &= D \left\{ \frac{k_{\Pi}(1 - e^{-pT_0})}{p} \cdot \left(\frac{k_b}{T_g p + 1} + \frac{k_{\sigma}}{T_{\sigma} p + 1} \right) \right\} \\ &= \frac{k_{\Pi} k_b (1 - e^{-T_0/T_b})}{e^{pT_0} - e^{-T_0/T_b}} + \frac{k_{\Pi} k_{\sigma} (1 - e^{-T_0/T_{\sigma}})}{e^{pT_0} - e^{-T_0/T_{\sigma}}} \\ &= k_{\Pi} \left(\frac{k_b(1 - d_b)}{z - d_b} + \frac{k_{\sigma}(1 - d_{\sigma})}{z - d_{\sigma}} \right). \end{aligned}$$

Тут введені позначення: $z = e^{pT_0}$, $d_b = e^{-T_0/T_b}$, $d_{\sigma} = e^{-T_0/T_{\sigma}}$.

Далі можемо отримати вираз дискретної замкнутої передавальної функції $W_{3\Pi}^* = W_{\Pi}^*/(1 + W_{\Pi}^*)$ та характеристичного рівняння G_{Π}^* .

$$\begin{aligned} W_{3\Pi}^* &= \frac{k_{\Pi} [k_b(z - d_{\sigma})(1 - d_b) + k_{\sigma}(z - d_{\sigma})(1 - d_{\sigma})]}{(z - d_b)(z - d_{\sigma}) + k_{\Pi} [k_b(z - d_{\sigma})(1 - d_b) + k_{\sigma}(z - d_{\sigma})(1 - d_{\sigma})]}, \\ G_{\Pi}^*(z) &= z^2 + z[k_{\Pi} k_b(1 - d_b) + k_{\Pi} k_{\sigma}(1 - d_{\sigma}) - d_{\sigma} - d_b] + d_{\sigma} d_b \\ &\quad - k_{\Pi} k_b(1 - d_b) d_{\sigma} + k_{\Pi} k_{\sigma}(1 - d_{\sigma}) d_b = 0. \end{aligned} \quad (6.24)$$

Стійкість замкнутої імпульсної системи буде визначатись коренями z характеристичного рівняння [170]: $G_{\Pi}^*(z) = a_0 z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_{n-1} z + a_0$.

Система буде стійка при виконанні нерівності $|z| < 1$. Виконуючи заміну змінної $z = (u + 1)/u - 1$, область коренів z всередині одиничного радіусу перетворюється в ліву півплощину комплексних чисел p [170]. Застосувавши до перетвореного характеристичного рівняння $G_{\Pi}^*(z) = 0$ умову стійкості Гурвіца, а також, враховуючи зв'язок між коефіцієнтами рівнянь відносно z і u , отримаємо

умови стійкості за значеннями коефіцієнтів вихідного рівняння a_i . Для системи другого порядку умова стійкості визначається трьома нерівностями [170]:

$$a_0 + a_1 + a_2 \geq 0, \quad a_0 - a_2 \geq 0, \quad a_0 - a_1 + a_2 \geq 0 \quad (6.25)$$

Умови (6.25) дозволяють отримати критичне значення коефіцієнта підсилення регулятора через параметри генератора. Для системи стабілізації напруги асинхронного генератора з пропорційним регулятором маємо:

$$1 - d_\sigma - d_b + d_\sigma d_b + k_\pi k_b (1 - d_b)(1 - d_\sigma) + k_\pi k_\sigma (1 - d_\sigma)(1 - d_b) \geq 0$$

$$1 - d_\sigma d_b + k_\pi k_b (1 - d_b) d_\sigma + k_\pi k_\sigma (1 - d_\sigma) d_b \geq 0$$

$$1 + d_\sigma + d_b + d_\sigma d_b - k_\pi k_b (1 - d_b)(1 + d_\sigma) - k_\pi k_\sigma (1 - d_\sigma)(1 + d_b) \geq 0$$

Перші дві нерівності виконуються при позитивних значеннях коефіцієнтів k_π, k_b, k_σ , а третє визначає межу стійкості системи:

$$k_\pi \leq \frac{1 + d_\sigma + d_b + d_\sigma d_b}{k_b (1 - d_b)(1 + d_\sigma) + k_\sigma (1 - d_\sigma)(1 + d_b)} = k_{\max} (k_b, k_\sigma, d_b, d_\sigma) \quad (6.26)$$

Виконавши аналогічні перетворення для системи з інтегральним імпульсним регулятором, отримуємо умову стійкості:

$$k_I \leq \frac{2(1 + d_\sigma + d_b + d_\sigma d_b)}{k_b (1 - d_b)(1 + d_\sigma) + k_\sigma (1 - d_\sigma)(1 + d_b)} = 2k_{\max} \quad (6.27)$$

Для імпульсних «ПІ», «ПД» і «ПІД» регуляторів напруги асинхронного генератора критичні коефіцієнти також пов'язані з виразом k_{\max} [52]:

$$k_\pi + k_I / 2 \leq k_{\max}; \quad k_\pi + 2k_D \leq k_{\max}; \quad k_\pi + k_I / 2 + 2k_D \leq k_{\max} \quad (6.28)$$

Дробово-раціональна функція k_{\max} у виразах (6.26) - (6.28) залежить від параметрів об'єкта та періоду комутації регулятора і визначає критичні значення коефіцієнтів імпульсних регуляторів.

На рис. 6.10 показана залежність критичного петлевого коефіцієнта підсилення $k_b \cdot k_{\max}$ імпульсної системи з асинхронним генератором від відносної тривалості періоду комутації T_0/T_g при $k_\sigma/k_b = 0,1$.

Аналіз виразів (6.26) - (6.28) для критичних коефіцієнтів лінійних імпульсних регуляторів дозволяє зробити кілька висновків [52].

Значення критичних коефіцієнтів імпульсних «П»-, «І»-, «Д»- регуляторів визначаються однією дробово-раціональною функцією k_{max} виду (6.26) з точністю до множника 2, тобто коефіцієнт k_I вдвічі більший за коефіцієнт k_P , а коефіцієнт k_D вдвічі менший за коефіцієнт k_P .

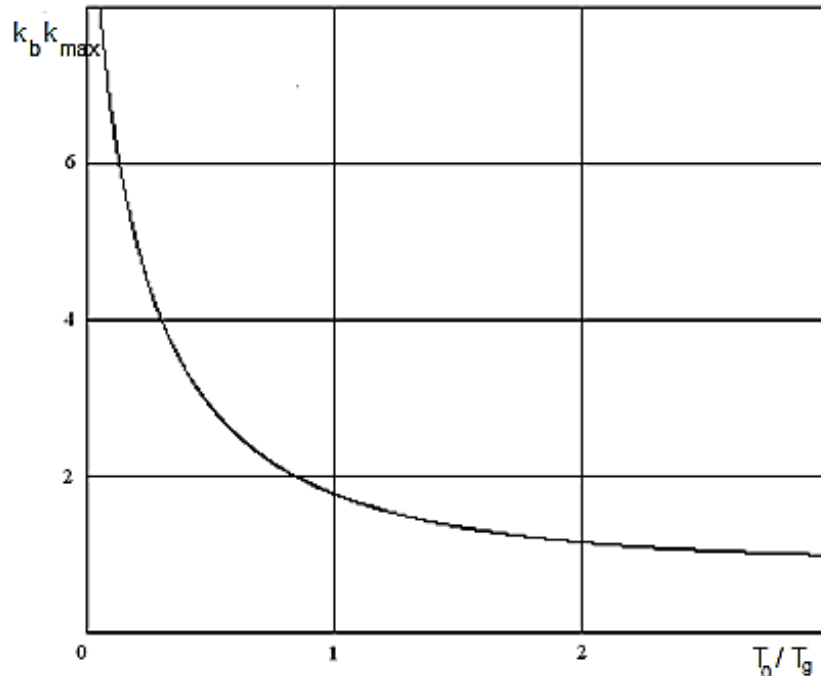


Рис.6.10. Залежність критичного петлевого коефіцієнта підсилення імпульсної системи з асинхронним генератором від відносної тривалості періоду комутації при заданих відносинах $k_\sigma/k_b = 0,1$ та $T_0/T_\sigma = 10$

Стійкість замкнутої імпульсної системи з асинхронним генератором, що представляє собою паралельне з'єднання аперіодичних ланок, значною мірою визначається коефіцієнтом підсилення k_σ швидкодіючої ланки навіть при її відносній малості. Петлевий коефіцієнт підсилення у всьому діапазоні T_0/T_g істотно знижується при зростанні відносини k_σ/k_b . Так, для $k_\sigma/k_b = 0,3$ критичний петлевий коефіцієнт $k_P k_b$ не перевищує чотирьох.

Мале значення критичного петлевого коефіцієнта підсилення $k_P k_b$ робить не ефективним застосування пропорційного регулятора для регулювання напруги асинхронного генератора. Для досягнення високої точності стабілізації тут можна рекомендувати інтегральний закон регулювання.

Введення додаткових складових до закону управління, наприклад, диференціювання, приводить до зменшення початкових значень інших коефіцієнтів передачі регулятора.

Значення критичних коефіцієнтів для складових «ПІ», «ПД», «ПІД» та інших лінійних регуляторів можуть бути отримані простим підсумовуванням на підставі принципу суперпозиції, тобто

$$k_{\Pi} + (k_I/2) \leq k_{max}; k_{\Pi} + 2k_D \leq k_{max}; k_{\Pi} + (k_I/2) + 2k_D \leq k_{max} . \quad (6.29)$$

6.6. Визначення швидкодії та коливальних властивостей системи регулювання напруги асинхронної генераторної установки

За критичними значеннями коефіцієнтів підсилення лінійних регуляторів визначають межу стійкості системи регулювання в області налагоджувальних параметрів, проте вони не дають можливості оцінювати такі якісні показники, як швидкодія або коливальність перехідних процесів.

Для оцінки швидкодії систем потрібно визначити межі їх параметрів, що забезпечують певний ступінь стійкості: відстань від найближчого кореня характеристичного рівняння до осі уявних чисел $\eta = \min |Re(p_i)|$, [160]. По ступеню стійкості можна судити про час загасання всіх вільних складових перехідного процесу, $t_{пер} \approx 3/\eta$.

Умову розташування всіх коренів характеристичного рівняння лівіше осі уявних чисел та не ближче величини η можна отримати з умови стійкості Гурвіца, що може застосовуватись до зміщеного характеристичного рівняння, в якому проведена заміна змінної $p = p' - \eta$. Оператор z з урахуванням цієї заміни буде визначатись:

$$z = e^{pT_0} = e^{(p'-\eta)T_0} = e^{p'T_0} \cdot e^{-\eta T_0} = z' \cdot c, \text{ де } z' = e^{p'T_0} \text{ і } c = e^{-\eta T_0} .$$

Умови стійкості (6.25), які застосовані до зміщених поліномів $G^*(z', c)$, визначають множини параметрів систем, що задовольняють заданій ступені стійкості η .

Такий підхід можемо застосувати для аналізу швидкодії системи регулювання напруги асинхронного генератора з пропорційним імпульсним регулятором. Зміщене характеристичне рівняння одержимо заміною змінної z на $z' \cdot c$:

$$G_{\Pi}^*(z', c) = (z')^2 c^2 + z' c [k_{\Pi} k_b (1 - d_b) + k_{\Pi} k_{\sigma} (1 - d_{\sigma}) - d_{\sigma} - d_b] + d_{\sigma} d_b - k_{\Pi} k_b (1 - d_b) d_{\sigma} - k_{\Pi} k_{\sigma} (1 - d_{\sigma}) d_b = 0$$

Умови забезпечення заданого ступеня стійкості η визначаємо з коефіцієнтів зміщеного характеристичного рівняння:

$$a_0 - a_2 = c^2 + k_{\Pi} [k_b (1 - d_b) d_{\sigma} + k_{\sigma} (1 - d_{\sigma}) d_b] - d_{\sigma} d_b \geq 0$$

$$\text{або } k_{\Pi} \geq \frac{d_{\sigma} d_b - c^2}{k_b (1 - d_b) d_{\sigma} + k_{\sigma} (1 - d_{\sigma}) d_b}; \quad (6.30)$$

$$a_0 + a_1 + a_2 = c^2 + c k_{\Pi} k_b (1 - d_b) + c k_{\Pi} k_{\sigma} (1 - d_{\sigma}) - c (d_{\sigma} + d_b) + d_{\sigma} d_b - k_{\Pi} k_b (1 - d_b) d_{\sigma} - k_{\Pi} k_{\sigma} (1 - d_{\sigma}) d_b \geq 0$$

$$\text{або } k_{\Pi} \geq \frac{c (d_{\sigma} + d_b) - d_{\sigma} d_b - c^2}{k_b (1 - d_b) (c - d_{\sigma}) + k_{\sigma} (1 - d_{\sigma}) (c - d_b)}; \quad (6.31)$$

$$a_0 - a_1 + a_2 = c^2 - c k_{\Pi} k_b (1 - d_b) - c k_{\Pi} k_{\sigma} (1 - d_{\sigma}) + c (d_{\sigma} + d_b) + d_{\sigma} d_b - k_{\Pi} k_b (1 - d_b) d_{\sigma} - k_{\Pi} k_{\sigma} (1 - d_{\sigma}) d_b \geq 0$$

$$\text{або } k_{\Pi} \leq \frac{c (d_{\sigma} + d_b) + d_{\sigma} d_b + c^2}{k_b (1 - d_b) (c + d_{\sigma}) + k_{\sigma} (1 - d_{\sigma}) (c + d_b)}. \quad (6.32)$$

Для реальних технічних характеристик асинхронних генераторів і при $k_{\Pi} \geq 0$ нерівність (6.30) виконується. По двом іншим нерівностям побудуємо межі області петлевого коефіцієнта $k_{\Pi} k_b$ для різних заданих значень $\alpha = \eta T_0$ в залежності від відношення $\tau = T_0/T_b$, рис.6.11. Графіки побудовані для співвідношень $k_{\sigma}/k_b = 0,1$ та $T_0/T_{\sigma} = 2$. Криві 2 відповідають нерівності (6.31), а криві 3 - нерівності (6.32). Перетин межі, що задається строгими нерівностями (6.31) і (6.32), може бути отримано аналітично за умови їх сумісності, тобто коли коефіцієнт $a_1 = 0$:

$$(k_{\pi})_{\text{опт}} = \frac{d_{\sigma} + d_b}{k_b(1 - d_b) + k_{\sigma}(1 - d_{\sigma})}. \quad (6.33)$$

Крива 1 на рис.6.11 відповідає рівності (6.33) та визначає найкраще налаштування регулятора напруги за швидкодією.

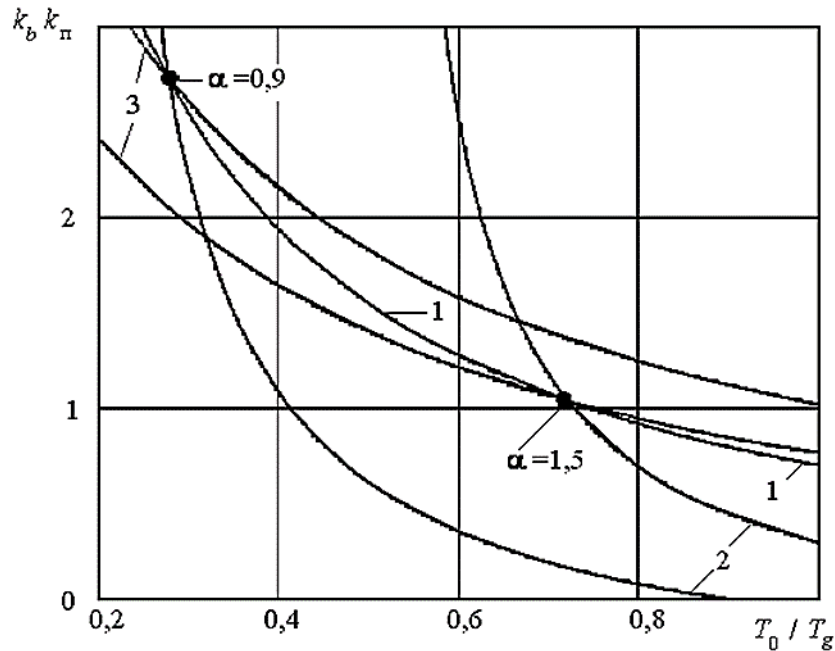


Рис.6.11. Залежність петлевого коефіцієнта підсилення від відносного періоду комутації, що забезпечує задану ступінь стійкості системи стабілізації з асинхронним генератором і імпульсним пропорційним регулятором

Прирівнюючи праві частини нерівностей (6.31) і (6.32), знаходимо максимально можливе значення ступеня стійкості $k_{\text{опт}}$ при виборі $k_{\pi} = (k_{\pi})_{\text{опт}}$:

$$(c_{\text{опт}})^2 = \frac{k_b(1 - d_b)d_{\sigma}^2 + k_{\sigma}(1 - d_{\sigma})d_b^2}{k_b(1 - d_b) + k_{\sigma}(1 - d_{\sigma})}, \quad c = e^{-\eta T_0}, \quad \text{тоді}$$

$$\eta_{\text{опт}} = -\frac{1}{2T_0} \ln \frac{k_b(1 - d_b)d_{\sigma}^2 + k_{\sigma}(1 - d_{\sigma})d_b^2}{k_b(1 - d_b) + k_{\sigma}(1 - d_{\sigma})} \quad (6.34)$$

На рис.6.12 показані залежності максимального наведеного ступеня стійкості $\alpha_{\text{опт}} = \eta_{\text{опт}} \cdot t_0$ від відношення $\tau = T_0/T_b$. Графік на рис.6.12 побудований для значень: $T_0/T_{\sigma} = 2$ і $k_{\sigma}/k_b = 0,1$.

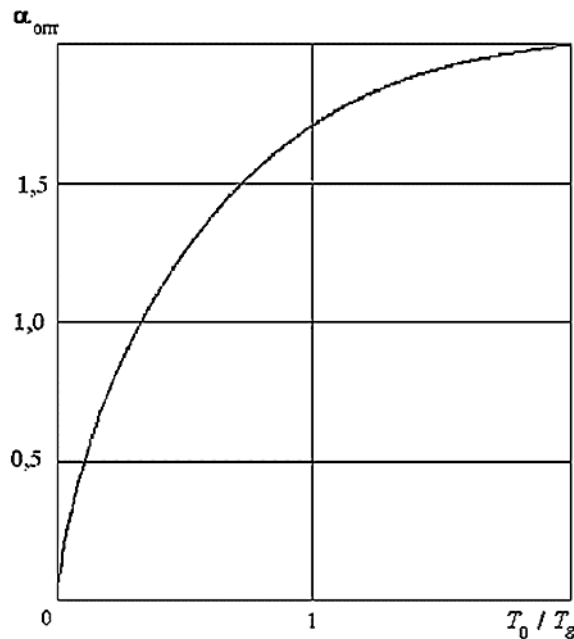


Рис.6.12. Максимальна наведена ступінь стійкості системи стабілізації напруги асинхронного генератора з імпульсним пропорційним регулятором

Застосовуючи аналогічний підхід можемо оцінити швидкодію системи стабілізації напруги асинхронного генератора з інтегральним регулятором. Розглянемо асинхронний генератор з швидкодіючим контуром розсіювання, тобто $T_\sigma = 0$. Зміщене характеристичне рівняння для такого випадку має вигляд:

$$G_1^*(z', c) = (z')^2 c^2 + z' c [k_1 k_b (1 - d_b) + k_1 k_\sigma - 1 - d_b] + d_b (1 - k_1 k_\sigma) = 0$$

Умови забезпечення заданого ступеня стійкості η наступні:

$$a_0 - a_2 = c^2 - d_b (1 - k_\sigma k_1) \geq 0 \quad \text{або} \quad k_1 \geq \frac{d_b - c^2}{k_\sigma d_b}; \quad (6.35)$$

$$a_0 + a_1 + a_2 = c^2 + c k_c k_b (1 - d_b) + c k_1 k_\sigma - c - c d_b + d_b - k_1 k_\sigma d_b \geq 0$$

$$\text{або} \quad k_1 \geq \frac{(1 - c)(c - d_b)}{k_b (1 - d_b) c + k_\sigma (c - d_b)}; \quad (6.36)$$

$$a_0 - a_1 + a_2 = c^2 - c k_1 k_b (1 - d_b) - c k_1 k_\sigma + c + c d_b + d_b - k_1 k_\sigma d_b \geq 0$$

$$\text{або} \quad k_1 \leq \frac{(1 + c)(c + d_b)}{k_b (1 - d_b) c + k_\sigma (c + d_b)}. \quad (6.37)$$

Нерівності (6.35) - (6.37) визначають області коефіцієнта k_1 у функції відносини $\tau = T_0/T_g$ з заданим значенням ступеня стійкості η , що визначає параметр $c = e^{-\eta T_0}$.

На рис.6.13 показані межі нерівностей: 1 - (6.35), 2 - (6.36), 3 - (6.37), які побудовані для співвідношення $k_\sigma/k_b = 0.2$ та для заданих $\alpha = 0.2$ і $\alpha = 0.8$ (пунктир). Область параметрів k_1, k_b , що задовольняє заданій швидкодії, обмежується областю, яка визначається перетином допустимих областей за нерівностями (6.35) - (6.37).

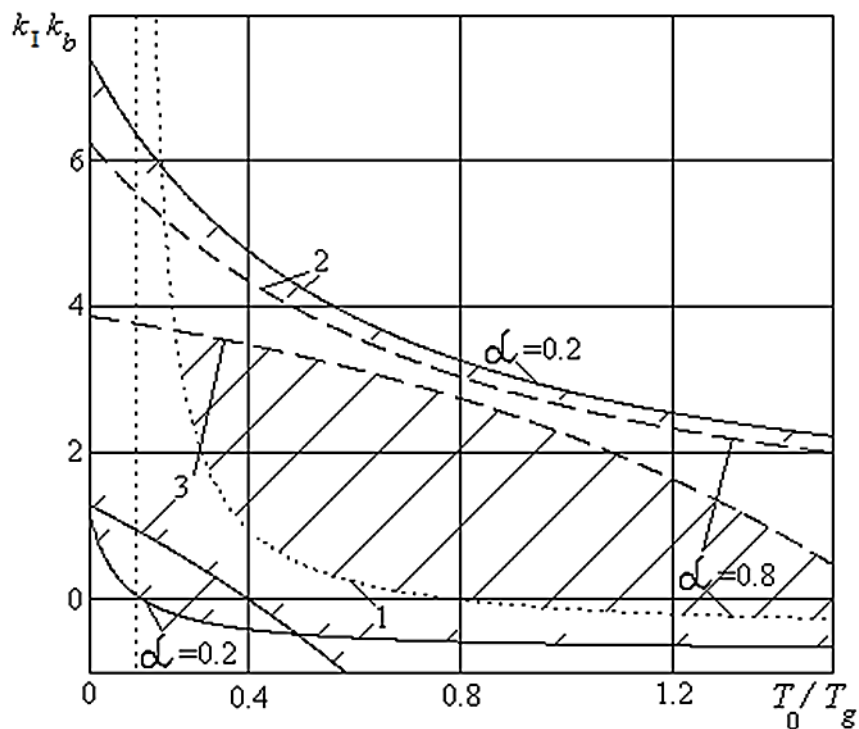


Рис.6.13. Петлевий коефіцієнт підсилення, що забезпечує задану ступінь стійкості системи стабілізація асинхронного генератора з імпульсним інтегральним регулятором

Розглянуті досі системи регулювання мали другий порядок характеристичного рівняння, що дозволяло отримувати наочне графічне представлення залежностей налагоджувальних параметрів від часу комутації. Якщо система регулювання має третій порядок характеристичного рівняння, тоді має виконуватись п'ять нерівностей, [52, 95]. Застосуємо пропоновану методику визначення швидкодії системи для асинхронного генератора з імпульсним ПІ-регулятором, позначивши $k_0 = k_b(1 -$

$d_b) + k_\sigma$. Зміщене характеристичне рівняння системи регулювання для цього випадку має вигляд:

$$G_{\text{III}}^*(z', c) = (z')^3 c^3 + (z')^2 c^2 [(k_{\text{II}} + k_1)k_0 - 1 - d_b] + z' c [d_b - (k_{\text{II}} + k_1)k_\sigma d_b - k_{\text{II}}k_0] + k_{\text{II}}k_\sigma d_b = 0,$$

Тоді гарантована ступінь стійкості системи визначається наступними нерівностями:

$$a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = k_{\text{II}}[c^2 k_0 - c(k_\sigma d_b + k_0) + k_\sigma d_b] + k_1(c^2 k_0 - ck_\sigma d_b) + c^3 - c^2(1 + d_b) + cd_b \geq 0 \quad (6.38)$$

$$3(a_0 - a_3) + a_1 - a_2 = k_{\text{II}}[c^2 k_0 + c(k_\sigma d_b + k_0) - 3k_\sigma d_b] + k_C(c^2 k_0 + ck_\sigma d_b) + 3c^3 - c^2(1 + d_b) - cd_b \geq 0$$

$$3(a_0 + a_3) - a_1 - a_2 = k_{\text{II}}[-c^2 k_0 + c(k_\sigma d_b + k_0) + 3k_\sigma d_b] + k_1(-c^2 k_0 + ck_\sigma d_b) + 3c^3 + c^2(1 + d_b) - cd_b \geq 0$$

$$a_0 - a_1 + a_2 - a_3 = k_{\text{II}}[-c^2 k_0 - c(k_\sigma d_b + k_0) - k_\sigma d_b] + k_1(-c^2 k_0 - ck_\sigma d_b) + c^3 + c^2(1 + d_b) + cd_b \geq 0$$

Як видно із системи (6.38), перші чотири нерівності лінійно пов'язують коефіцієнти k_{II} і k_1 , а п'ята представляє собою залежність другого порядку.

Задавшись сталими значеннями характеристик генератора, в тому числі періодом комутації T_0 , у множині налагоджувальних коефіцієнтів (k_{II}, k_1) можна виділити області заданого ступеня стійкості.

Указані області виходять як рішення системи нерівностей (6.38) при однакових значеннях η . З фізичної суті ступеня стійкості η випливає, що при збільшенні η ці області мають зменшуватися, причому область менших значень η включає в себе область налагоджувальних коефіцієнтів, що забезпечують великі значення ступеня стійкості. Збільшуючи вимоги до ступеня стійкості, зводять область налагоджувальних коефіцієнтів в точку, яка і буде визначати оптимальні за швидкодією налаштування системи регулювання.

В якості прикладу виконаємо оптимізацію за швидкодією системи регулювання напруги АГ з ПІ-регулятором при наступних параметрах асинхронної машини типу 4А 180 М2 [52] :

$$k_b = 1,0; k_\sigma = 0,1; T_0/T_g = 0,08 \text{ і } T_\sigma \ll T_0.$$

На рис.6.14 побудовані межі нерівностей системи (6.38) для фіксованого значення $\eta = 1,5$. Номерами на рис.6.14 позначено межі відповідних нерівностей системи (6.38). Збільшення η призводить до звуження області налагоджувальних параметрів та у межі зводить її в точку оптимальних значень $(k_{\text{п}}, k_{\text{І}})_{\text{опт}}$.

Оптимальною структурою для розглянутої системи регулювання напруги асинхронного генератора являється інтегральний імпульсний регулятор, так як $k_{\text{п опт}} = 0$.

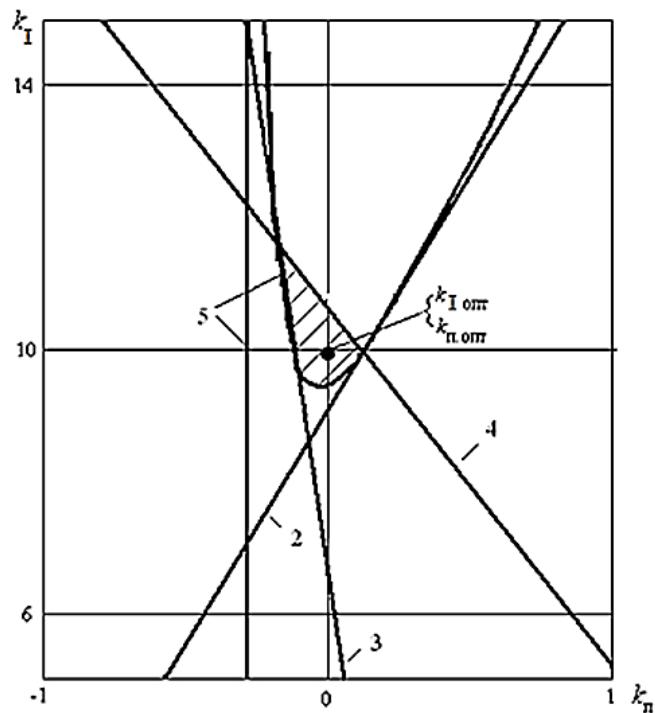


Рис. 6.14. Межі заданого ступеня стійкості системи регулювання напруги асинхронного генератора з імпульсним ПІ-регулятором

Оптимізація структури і налагоджувальних параметрів регулятора напруги асинхронного генератора, яка проведена на комп'ютері шляхом моделювання перехідних процесів, підтверджує, що найкращим для асинхронного генератора є імпульсний інтегральний регулятор [52].

Наведена методика дозволяє визначити оптимальні за швидкодією коефіцієнти лінійних імпульсних регуляторів і для інших типів лінійних регуляторів, а в ряді випадків визначити оптимальну структуру системи регулювання.

Для лінійних імпульсних систем регулювання напруги асинхронних генераторів висновки щодо їх коливальних властивостей можуть бути зроблені по розташуванню годографів коренів характеристичних рівнянь на комплексних площинах z і p [52].

Розглянемо систему (6.20) з імпульсним І-регулятором напруги асинхронного генератора [52]. Параметри системи $\tau = T_0/T_g$, $T_\sigma = 0$, k_g і k_σ будемо вважати як незмінні. Тоді можемо отримати залежність коренів характеристичного рівняння

$$G_I^*(z) = z^2 + z[k_1 k_b (1 - d_b) + k_1 k_\sigma - 1 - d_b] + d_b (1 - k_1 k_\sigma) = 0$$

від налагоджувального коефіцієнта регулятора k_1 :

$$z_{1,2} = \frac{1 + d_b - k_1 k_0}{2} \pm \frac{\sqrt{(k_1 k_0 - 1 - d_b)^2 - 4d_b(1 - k_1 k_\sigma)}}{2}, \quad (6.39)$$

тут позначено $k_0 = k_b(1 - d_b) + k_\sigma$.

Якщо підкореневий вираз (6.39) негативний, то корені будуть комплексними: $z_{1,2} = a \pm jb$. Знайдемо значення коефіцієнта k_1 , при якому змінюється характер коренів з комплексних на дійсні, прирівнявши дискримінант рівняння (6.39) до нуля:

$$k_{11,2} = \frac{k_0(1 + d_b) - 2k_\sigma d_b}{k_0^2} \pm \frac{\sqrt{[k_0(1 + d_b) - 2k_\sigma d_b]^2 - (1 - d_b)^2 k_0^2}}{k_0^2}. \quad (6.40)$$

Комплексними корені рівняння (6.39) мають бути при $k_{11} \leq k_1 \leq k_{12}$, а при $k_1 \leq k_{11}$ і $k_1 \geq k_{12}$ корені z_1 та z_2 стають дійсними.

На рис.6.15 наведені годографи коренів $z = f(k_1)$ для $k_b = 1,0$; $k_\sigma = 0,1$; $T_0/T_g = 0,08$ (1) і $k_b = 1,0$; $k_\sigma = 0,1$; $T_0/T_g = 0,8$ (2).

Якщо $\tau = T_0/T_g$, k_b і k_σ мають різні значення, тоді маємо два принципово різні розміщення годографів $z = f(k_1)$: 1 – комплексні корені знаходяться тільки в I і IV

квадрантах комплексної площини; 2 - комплексні корені розташовані у всіх квадрантах.

У першому випадку існує деяке настроювання регулятора $k_I \geq k_{I2}$, при якому обидва дійсних кореня z_1 і z_2 залишаються позитивними, а в другому – при $k_I \geq k_{I2}$ – корені z_1 і z_2 - негативні.

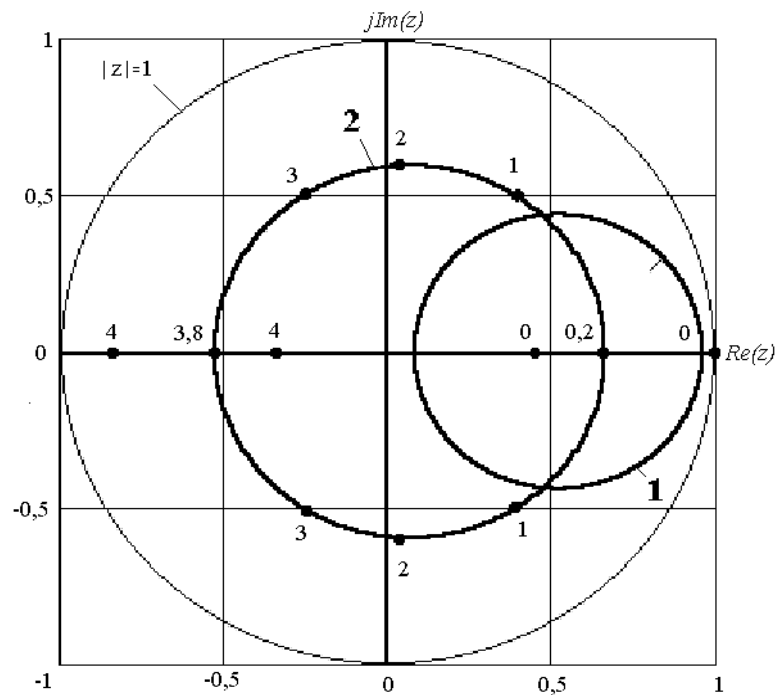


Рис.6.15. Годографи коренів z характеристичного рівняння імпульсної системи регулювання напруги АГ з інтегральним регулятором

Позитивне дійсне значення імпульсного оператора $z = \exp(pT_0) < 1$ забезпечується дійсним від'ємним значенням кореня $p < 0$, який відповідає аперіодичній складовій перехідного процесу.

Тепер розглядаємо більш детально вплив значень коренів z на коливальні властивості системи регулювання. Визначаємо зв'язок між коренями p і z . Для комплексних значень z маємо:

$$z_{1,2} = a \pm jb = e^{pT_0} = e^{(\alpha \pm j\beta)T_0} = e^{\alpha T_0} e^{\pm j\beta T_0} = e^{\alpha T_0} (\cos \beta T_0 \pm j \sin \beta T_0),$$

звідки знаходимо зв'язок між складовими коренів p і z .

$$\begin{aligned} a &= e^{\alpha T_0} \cos \beta T_0 & e^{\alpha T_0} &= \sqrt{a^2 + b^2} & \alpha &= \ln(a^2 + b^2)/2T_0 \\ b &= e^{\alpha T_0} \sin \beta T_0 \end{aligned} \Rightarrow \operatorname{tg} \beta T_0 = b/a \quad \Rightarrow \beta = \operatorname{arctg}(b/a)/T_0$$

Коли корінь z – дійсний та більший нуля, тобто $b = 0$ і $a > 0$, то відповідний корінь p знаходиться на негативній частині дійсної осі, тобто $\beta = 0$ і $\alpha = \ln(a)/T_0$.

Коли ж корінь z – дійсний та менший нуля, тобто $b = 0$ і $a < 0$, тоді відповідний корінь p розташований на одній з прямих $\beta = \pm\pi/T_0$, що паралельна дійсній осі, тобто:

$$\beta = \pm\pi/T_0 \text{ і } \alpha = \ln(a/\cos(\pm\pi))/T_0 = \ln(-a)/T < 0.$$

Отже, при дійсних z складові кореня p визначаються:

$$\alpha = \ln(z)/T_0, \beta = 0 \text{ при } z > 0 \text{ або}$$

$$\alpha = \ln(-z)/T_0, \beta = \pm\pi/T_0 \text{ при } z < 0.$$

Годографам $z = f(k_1)$, наведеним на рис.6.15, відповідають годографи коренів $p = f(k_1)$, що показані на рис.6.16. Помітна істотна різниця у русі коренів при зміні коефіцієнта регулятора k_1 : годограф 1 при $k_1 < 0,02$ має дійсні корені, а при $0,02 < k_1 < 9,92$ – комплексні. При подальшому збільшенні коефіцієнта налаштування в діапазоні $9,92 < k_1 < 10,0$ корені характеристичного рівняння знову стають дійсними, при цьому вони знаходяться на максимальній відстані від уявної осі. При $k_1 = 10,0$ відбувається перехід одного з коренів з дійсної осі на пряму $p = j\pi/T_0$ через мінус нескінченність. В подальшому, при $k_1 > 10,0$ один з коренів знову стає комплексним. Поведінка коренів годографа 2 – суттєво відрізняється. Тут відсутня друга ділянка дійсних коренів, при збільшенні k_1 комплексні корені піднімаються і відразу переходять на прямі $p = \pm j\pi/T_0$.

Якщо корені розташовані за типом годографа 1, тоді оптимальному налаштуванню регулятора по швидкодії і коливальним властивостям буде значення $k_{1,\text{опт}} = k_{12}$. Для годографа за типом 2 таке оптимальне налаштування відсутнє.

Для розміщення комплексних коренів годографа $z = f(k_1)$ тільки в I і IV квадрантах комплексної площини необхідно, щоб при $k_1 = k_{12}$ корені z були більше нуля, тобто $z_{1,2} = (1 + d_b - k_{12}k_0)/2 \geq 0$. Значення коефіцієнта k_{12} може

визначатись із виразу (6.40) при допущенні, що другий доданок дискримінанта дорівнює нулю, тоді:

$$k_{I.опт} = k_{I2} \approx 2(k_0(1 + d_b) - 2k_\sigma d_b)/k_0^2 \quad (6.41)$$

Таке припущення дає похибку у визначенні k_{I2} не більше 0,2%.

На графіку рис.6.17 приведені залежності k_{I2} від $\tau = T_0/T_g$ при постійних співвідношеннях k_σ/k_g . Використовуючи значення k_{I2} у нерівності $z_{1,2} = (1 + d_b - k_{I2}k_0)/2 \geq 0$, отримаємо умову розташування коренів імпульсного характеристичного рівняння за типом годографа 1 на рис. 6.15 і рис. 6.16:

$$\frac{k_\sigma}{k_b} > \frac{1 - d_b^2}{3d_b - 1} = \frac{1 - e^{-2T_0/T_b}}{3e^{-T_0/T_b} - 1} \quad (6.42)$$

Якщо при технічній реалізації регулятора задати період комутації T_0 , то вибір оптимального налагоджувального коефіцієнта k_{I2} здійснюється за виразом (6.41): $k_{I.опт} = k_{I2}(T_0, T_g, k_b, k_\sigma)$ при відомих параметрах системи регулювання T_0, T_g, k_b, k_σ .

У тому випадку, якщо існує технічна можливість вибирати період комутації T_0 , то оптимальне значення налагоджувального коефіцієнта k_I визначається як максимум функції $k_{I.опт} = \max_{\tau} K_{I2}(\tau)$.

Граничні значення k_σ/k_I з нерівності (6.42), при підставленні в рівняння (6.41), дозволяють виключити параметри k_σ та k_b з функціональної залежності: $k_{I.опт} = k_{I2}(T_0/T_g)$. Графік такої залежності наведено на рис.6.17 пунктиром.

При оптимальному значенні $k_{I.опт} = k_{I2}$ корені характеристичного рівняння рівні та знаходяться на максимальній відстані від комплексної осі $z_1 = z_2 = (1 + d_b - k_{I2}k_0)/2 = 2k_\sigma d_b/k_0 - (1 + d_b)/2$, а найбільша ступінь стійкості дорівнює:

$$\eta_{max} = -\ln \left(\frac{2k_\sigma d_b}{k_b(1 - d_b) + k_\sigma} - \frac{1 + d_b}{2} \right) / T_0.$$

Корені характеристичного рівняння системи регулювання з пропорційним імпульсним регулятором з малим значенням сталої часу T_σ дорівнюють:

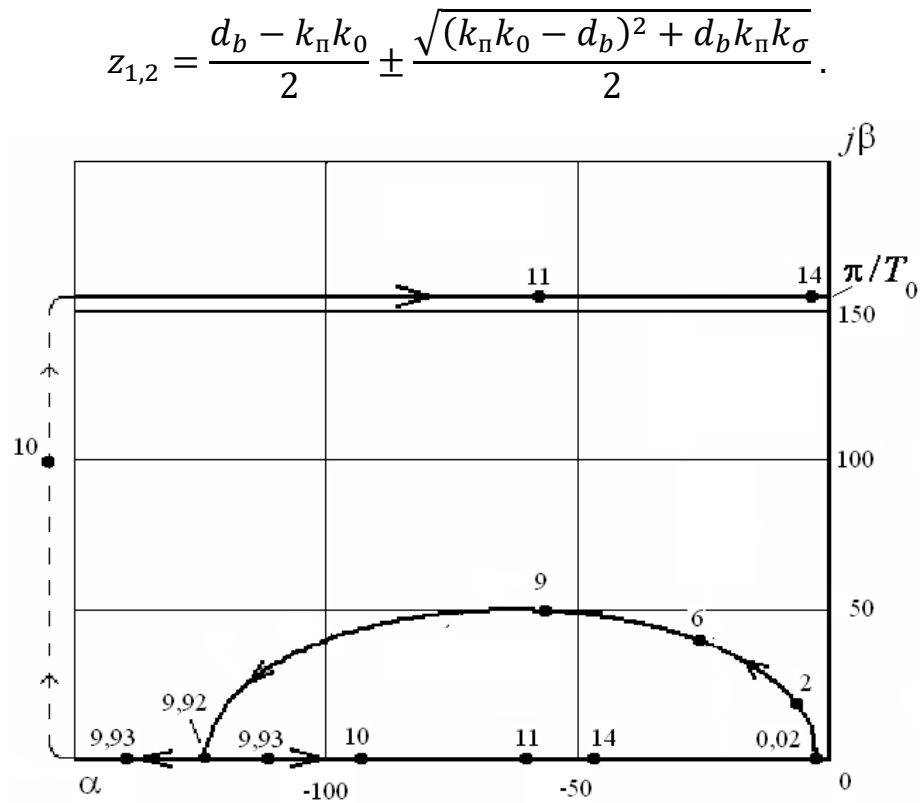


Рис.6.16. Годографи коренів p характеристичного рівняння системи регулювання напруги АГ з І-регулятором

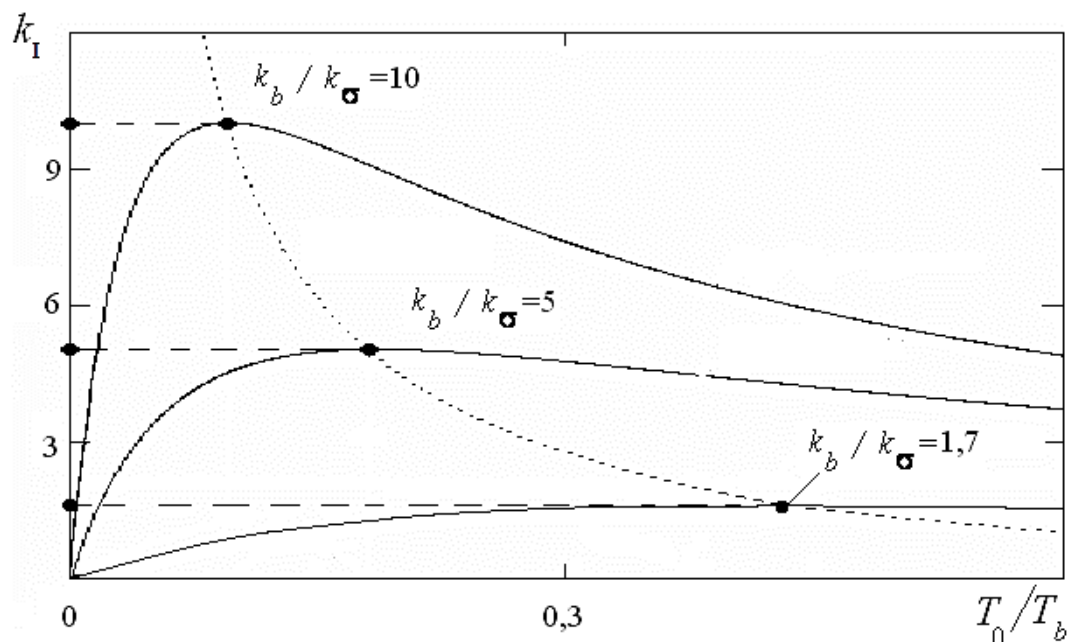


Рис.6.17. Визначення оптимального за швидкодією налагоджувального коефіцієнта підсилення імпульсного інтегрального регулятора напруги

При реальних параметрах система має два дійсних кореня: один позитивний, а інший негативний. Таким чином, система буде мати коливальні властивості через негативність одного з коренів.

6.7 Побудова перехідних процесів в імпульсних системах регулювання напруги генератора

Параметри перехідних процесів у навантаженні генераторів регламентуються Державними стандартами та Вимогами Класифікаційних Товариств [52, 64, 154]. Обмеження накладаються на провали та заброси напруги, на час відновлення напруги і всього перехідного процесу, перерегулювання та ступінь коливальності.

Розглянемо перехідні процеси відновлення напруги в імпульсній системі стабілізації напруги генератора при регулюванні в колі статора та ступінчастій комутації навантаження генератора.

Вплив збурення $f = -k_f \cdot 1(t)$ являє собою ступінчасту функцію і подається на статорну обмотку, тобто на вхід об'єкта. Дискретне зображення збуруючої дії дорівнює [94, 170]:

$$F^*(z) = -\frac{k_f}{1-z^{-1}} = -\frac{k_f \cdot z}{z-1}, \text{ а зображення по Лапласу } F(p) = -\frac{k_f}{p}.$$

Підставимо у вираз (6.23) значення імпульсних передавальних функцій для асинхронного генератора з пропорційним регулятором типу (6.20) та одержимо зображення регульованої змінної (напруги):

$$y_n^*(z) = -\frac{z^2 k_f k_0 - z k_f k_\sigma d}{z^3 + z^2 (k_n k_0 - 1 - d_b) + z [d_b - k_n (k_0 + k_\sigma d_b)] + k_n k_\sigma d_b}. \quad (6.43)$$

Приймаючи такі значення параметрів системи регулювання: $k_f = 1$; $k_b = 1$; $k_\sigma = 0,1$; $k_n = 5$; $\tau = 0,08$, будемо перехідний процес (див. рис.6.18). Розділимо чисельник виразу (6.43) на знаменник при вибраних значеннях коефіцієнтів.

$$y^*(z) = -0,177z^{-1} - 0,091z^{-2} - 0,170z^{-3} - 0,134z^{-4} - 0,168z^{-5} - 0,153z^{-6} - 0,168z^{-7} \dots$$

Отримаємо керуючий вплив виду $u^*(z) = -y^*(z) \cdot W^*(z) = -k_n \cdot y^*(z)$:

$$u^*(z) = 0,885z^{-1} + 0,457z^{-2} + 0,849z^{-3} + 0,668z^{-4} + 0,842z^{-5} + 0,765z^{-6} + 0,842z^{-7} \dots$$

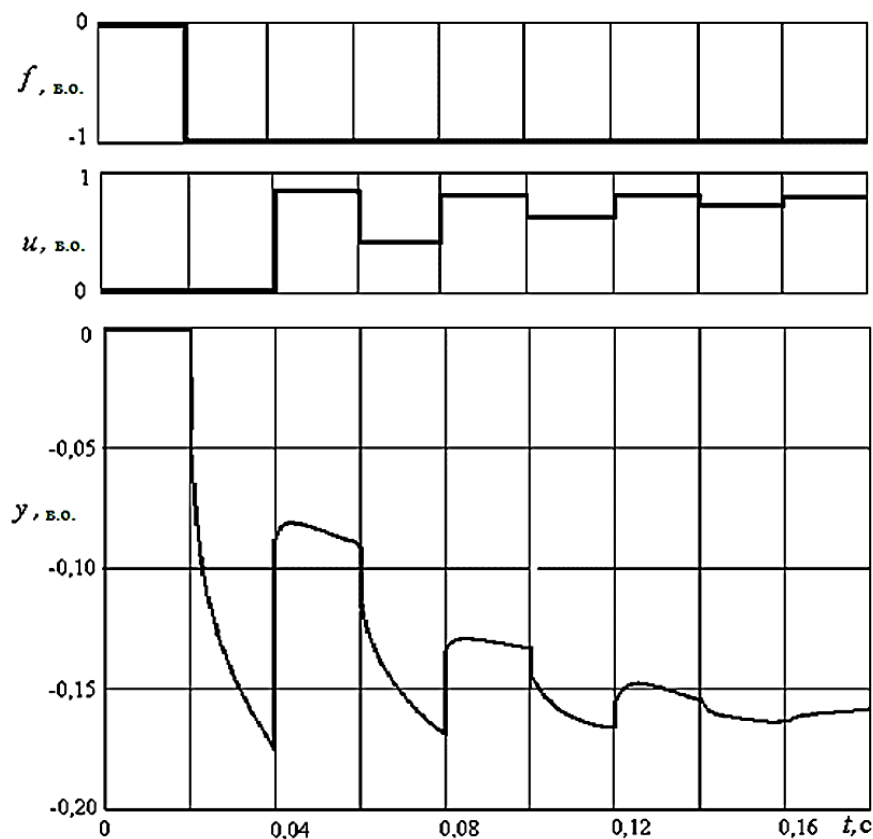


Рис. 6.18. Перехідний процес при включенні навантаження в системі регулювання напруги асинхронного генератора з імпульсним П-регулятором

Коефіцієнти при операторі z^{-k} дають можливість визначити значення змінних тільки в дискретні моменти часу, кратні періоду комутації T_0 . Між комутаціями, при $kT_0 < t < (k+1)T_0$, зміна регульованої величини $y(t)$ визначається неперервною передавальною функцією генератора $W_r(p)$.

Дискретний керуючий вплив $u(t)$ між комутаціями залишається незмінним, тобто $u(t) = \text{const}$ у періоди часу $kT_0 < t < (k+1)T_0$.

Перехідні процеси при ступінчастому навантаженні в системі з імпульсним І-регулятором можуть бути одержані аналогічно:

$$y_1^*(z) = - \frac{z k_f k_0 - k_f k_\sigma d_b}{z^2 + z (k_1 k_0 - 1 - d_b) + d_b - k_1 k_\sigma d_b}, \quad (6.44)$$

$$u_I^*(nT_0) = -k_I \sum_{k=0}^n y(kT_0)$$

На рис.6.19 наведено процес відновлення напруги асинхронного генератора після ступінчастого включення номінального навантаження в системі з інтегральним регулятором при різних налагоджувальних коефіцієнтах регулятора: $k_I = 6,0$ і $k_I = 9,9$. Як видно з рис. 6.19, друге значення k_I є оптимальним за швидкодією та коливальністю.

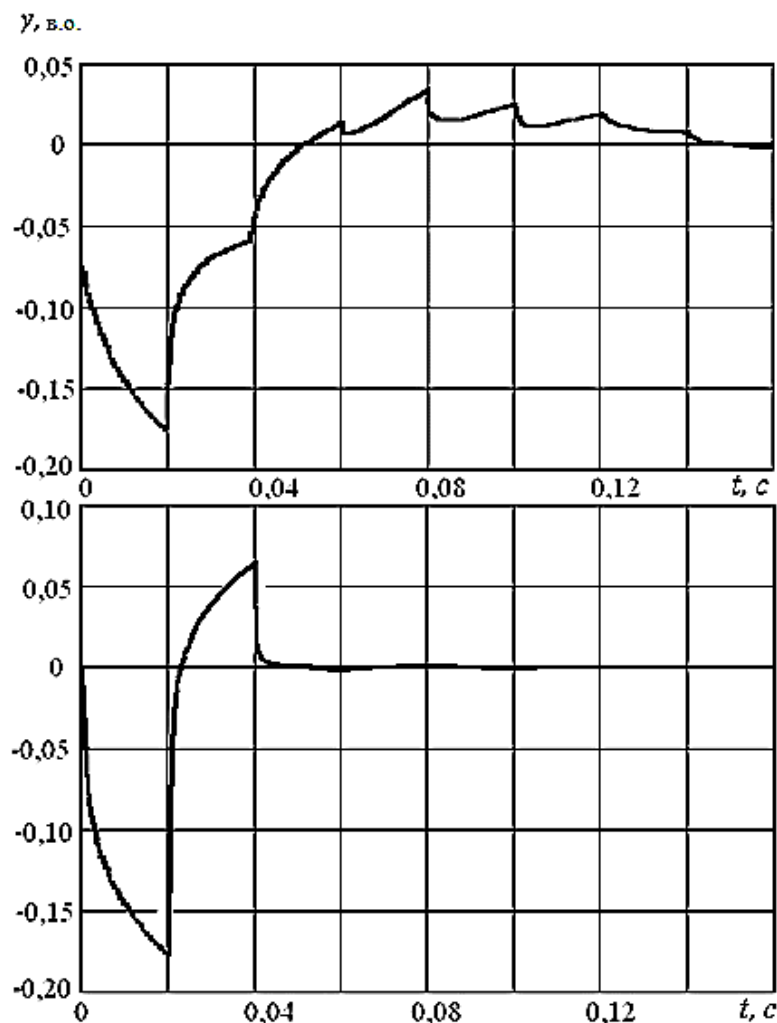


Рис.6.19. Перехідний процес при включенні навантаження в системі регулювання напруги АГ з імпульсним І-регулятором

Перехідні процеси в системі регулювання напруги АГ з імпульсним ІІІ-регулятором визначаються наступними виразами:

$$y_{III}^*(z) = -\frac{z^2 k_f k_0 - z k_f k_\sigma d_b}{z^3 + z^2 [(k_I + k_{II}) k_0 - 1 - d_b] + z [d_b - k_{II} (k_\sigma d_b + k_0) - k_I k_\sigma d_b] + k_{II} k_\sigma d_b}$$

$$u_{III}^*(nT_0) = -k_{II} y(nT_0) - k_I \sum_{k=0}^n y(kT_0) \quad (6.45)$$

Якщо використовується ПД – регулятор напруги, то перехідний процес визначається виразами:

$$y_{пд}^*(z) = -\frac{z^3 k_f k_0 - z^2 k_f k_\sigma d_b}{z^4 + z^3 a + z^2 b + z c + r}; a = (k_{II} + k_D) k_0 - 1 - d_b;$$

$$b = d_b (1 + k_D k_\sigma) - (k_{II} + 2k_D) (k_0 + k_\sigma d_b); c = (k_{II} + 2k_D) k_\sigma d_b + k_D k_0; r = -k_D k_\sigma d_b,$$

$$u_{пд}^*(nT_0) = -k_{II} y(nT_0) - k_D [y(nT_0) - y((n-1)T_0)]. \quad (6.46)$$

На рис.6.18 та 6.19 показані перехідні процеси в асинхронному генераторі з параметрами, що задовольняють нерівності (6.42), для комплексних коренів годографів $z = f(k_I)$, що знаходяться тільки в I та IV квадрантах комплексної площини.

На рис.6.20 і 6.21 побудовані перехідні процеси в системах з П-, I-, III - ПД - регуляторами для генератора з такими параметрами: $k_f = 1$; $k_b = 2,03$; $k_\sigma = 0,086$; $\tau = 0,2$. Наведені параметри не задовольняють умові (6.42): тобто $k_b > k_\sigma (3d_b - 1)/(1 - d_b^2)$, комплексні корені годографів $z = f(k_I)$ знаходяться у всіх квадрантах комплексної площини, а I-регулятор не являється оптимальним.

Наведені перехідні процеси побудовані для оптимальних настроювальних параметрів регуляторів, а їх аналіз підтверджує висновки попередніх розділів: для асинхронного генератора з параметрами 1-го типу (при виконанні умови 6.42) найкращою структурою є інтегральний регулятор, а для генератора з параметрами 2-го типу (умова 6.42 не виконується) оптимальним являється пропорційно-інтегральний регулятор. Пропорційний імпульсний регулятор асинхронного генератора не забезпечує необхідної точності стабілізації напруги, а при збільшенні його коефіцієнта підсилення призводить до коливальності, а потім до нестійкості системи регулювання.

Для генераторів являється недоцільним використання диференційної складової, т.я. введення Д-складової розхитує систему регулювання, роблячи її більш коливальною. Швидка реакція генератора на збурення (навантаження) дозволяє без диференціювання визначити необхідність форсування збудження генератора виходячи з інтенсивного провалу напруги при перевантаженнях.

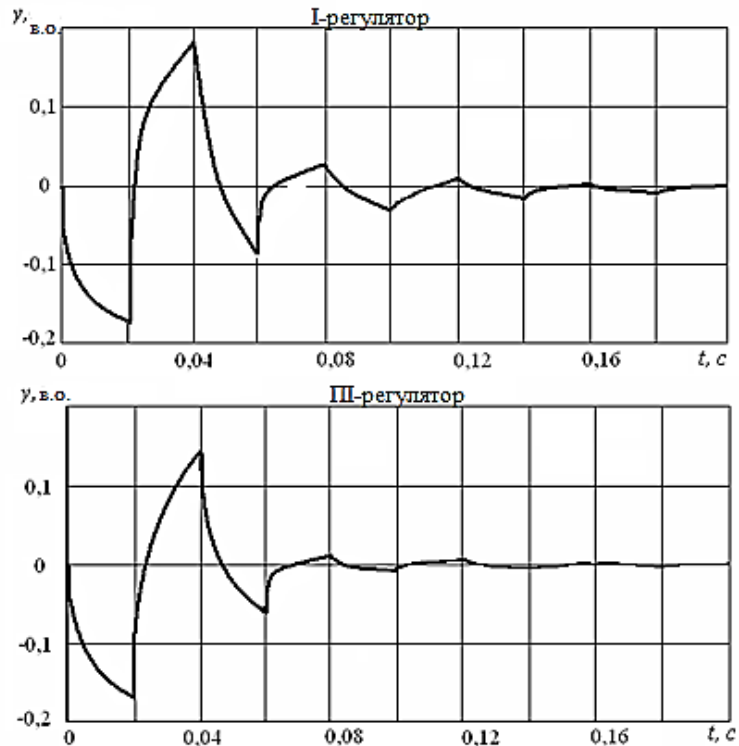


Рис.6.20. Перехідні процеси в системах з П і ІІІ-регулятором, які не задовольняють умові (6.42)

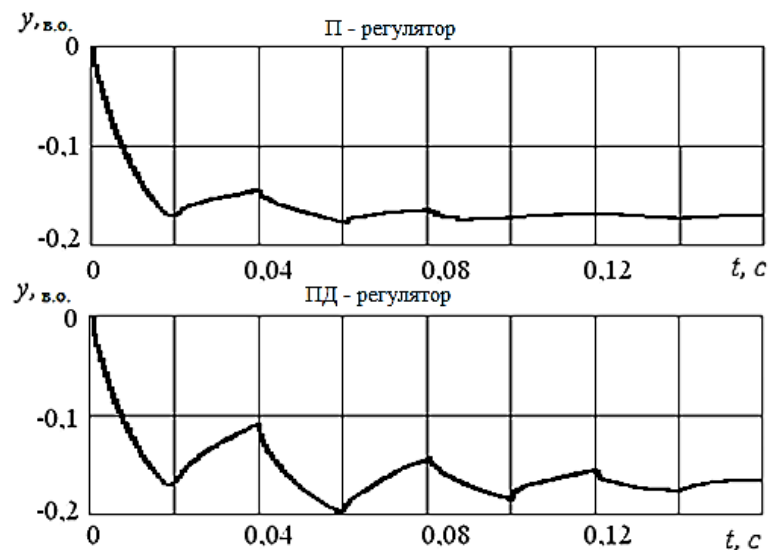


Рис.6.21. Перехідні процеси в системах з П і ПД-регулятором, які не задовольняють умові (6.42)

Сучасний розвиток техніки характеризується повсюдним застосуванням цифрових систем керування, в яких суттєвими обмеженнями є дискретність представлення інформації та кінцева кількість розрядів, тобто довжина керуючого слова. Ці обмеження визначаються максимальною потужністю виконавчого механізму в системі збудження та необхідною точністю регулювання напруги [59, 119]. Завищення потужності виконавчого пристрою (системи збудження) звичайно підвищує вартість і вагогабаритні показники генераторної установки. Тому, в системах збудження синхронних генераторів величина форсувальної напруги, як правило, не перевищує двох номіналів, а в системах регулювання напруги асинхронного генератора величина максимальної ємності збудження не перевищує 1,1...1,4 номінально необхідної [59].

У розглянутих раніше імпульсних законах керування при максимально можливому збуренні $f = -1$ керуючий вплив у початковому періоді керування досягає величини $u(1 \cdot T_0) = k_p [k_b(1 - e^{-T_0/T_g}) + k_\sigma]$. При оптимальному інтегральному регуляторі $k_p = k_{I\text{опт}} = 10$, а $u(1 \cdot T_0) = 1,77$. При комутації повного навантаження цей регулятор виводить виконавчий пристрій на максимальну потужність $u = u_{max}$, тобто «на упор». При цьому виявляється $u(1 \cdot T_0) > u_{max}$, що керуючий сигнал фізично не може прийняти потрібного значення. Тому час регулювання істотно зтягується, однак при цьому відсутнє перерегулювання. Перехідний процес на n -му кроці при $n > 2$ і $y(t) < 0$ описується сумою впливів:

$$y(nT_0) = -k_f(k_b + k_\sigma - k_b d^n) + u_{max}(k_b + k_\sigma - k_b d^{n-1}).$$

На рис.6.22 показані перехідні процеси в системі регулювання напруги з І-регулятором при обмеженні на величину максимального керування. При $u_{max} = 1,0$ процес $y(t)$ сильно зтягується і не переходить величини встановленого значення $y(t) = 0$. У випадку, коли $u_{max} = 1,2$, при переході регульованої величини через стає значення регулятор включається в роботу і перехідний процес швидко закінчується. В цьому випадку коригування закону керування з урахуванням обмеження на величину керуючого впливу не потрібно.

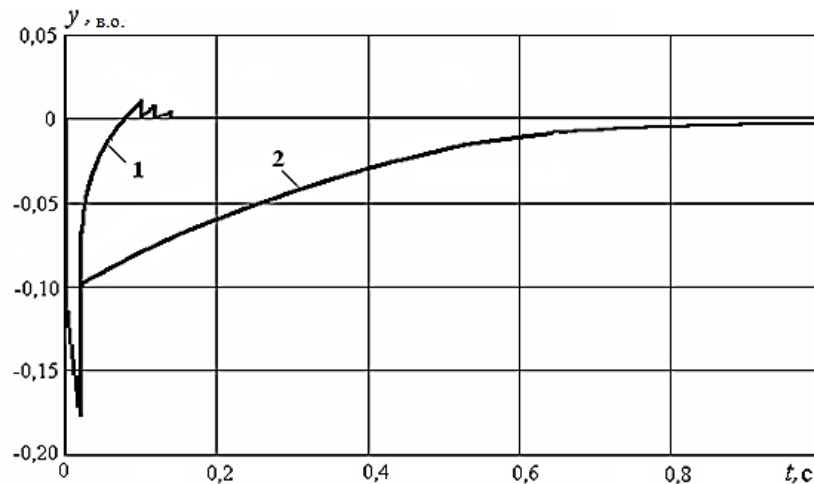


Рис. 6.22. Перехідний процес у системі з І-регулятором при обмеженні на величину максимального регулювання

Тепер розглянемо вплив дискретності сигналу за рівнем на перехідний процес. Основним недоліком цифрових систем з обмеженою кількістю розрядів є виникнення автоколивань «в малому» навколо усталеного стану. Амплітуда коливань визначається величиною молодшого розряду, петлевым коефіцієнтом підсилення системи та інерційністю об'єкта керування. Період автоколивань кратний періоду квантування T_0 .

Знайдемо амплітуду коливань, що можуть виникнути в системі збудження. Для цього подаємо на вхід об'єкта регулювання меандр з амплітудою Δu , що відповідає величині молодшого розряду цифрового регулятора, з періодом коливань, рівним $2T_0$. Запишемо на основі принципу суперпозиції дискретне зображення у вигляді меандру знакочередувального ряду:

$$\begin{aligned}
 u^* &= \Delta u \left(\frac{1}{1-z^{-1}} - \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}} + \frac{z^{-2}}{1-z^{-1}} - \dots + \frac{z^{-n+2}}{1-z^{-1}} - \frac{z^{-n+1}}{1-z^{-1}} \right) = \\
 &= \Delta u \cdot \frac{1 - (-z^{-1})^n}{(1-z^{-1})(1+z^{-1})} = \frac{z^n - (-1)^n}{z^n - z^{n-2}} \cdot \Delta u.
 \end{aligned} \tag{6.28}$$

Реакція аперіодичної ланки $W(p) = k/(Tp + 1)$ першого порядку з дискретною передавальною функцією $W^*(z) = k(1-d)/(z-d)$ на меандр (6.28) має бути:

$$y^*(z) = k(1-d)\Delta u \cdot \frac{z^n - (-1)^n}{z^{n+1} - dz^n - z^{n-1} + dz^{n-2}}. \quad (6.29)$$

Для повного аналізу систем регулювання необхідно розглянути випадки, коли збурення $f(t)$ наноситься в будь-який момент часу, в тому числі і між комутаціями керуючого сигналу, тобто при $(n+1)T_0 < t < nT_0$. Такий аналіз процесів між комутаціями особливо важливий, якщо швидкодія об'єкту порівняна з періодом комутації.

Процеси між комутаціями в роботі досліджувались за допомогою модифікованого дискретного D_m – перетворення [107, 141].

Для випадку, коли збурення приходить раніше моменту комутації на час mT_0 , визначимо модифіковану імпульсну передавальну функцію об'єкта $W_m^*(z)$ за збуренням, яка може бути отримана з передавальної функції $W_r(p)$ за допомогою модифікованого D_m – перетворення [170].

D_m – перетворення передавальної функції інерційного об'єкта з інтегруючим формувачем або реакції аперіодичної ланки на одиничний вплив має вигляд:

$$\begin{aligned} D_m \left\{ \frac{k}{p(Tp+1)} \right\} &= D_m \left\{ k - \frac{k}{p+1/T} \right\} = \frac{ke^{pT_0}}{e^{pT_0}-1} - \frac{ke^{pT_0} e^{-mT_0/T}}{e^{pT_0} - e^{-T_0/T}} = \\ &= \frac{z}{z-1} \cdot \frac{k[z(1-d_b^m) + d_b^m - d_b]}{z-d_b}, \quad \text{де } z = e^{pT_0}, d_b = e^{-T_0/Tg}. \end{aligned}$$

При малих $T \ll T_0$ не можна вважати $d_b = 0$, коли параметр $m \rightarrow 0$. Якщо перехідний процес в об'єкті закінчується за час m_0T_0 , то при $m > m_0$ можна вважати $d_b = 0$ і $W_m^* = k$. Для асинхронного генератора припускаючи, що $T_\sigma \ll T_0$ розглянемо випадок $m > m_0$.

$$\begin{aligned} D_m \left\{ F(p)W_d(p) \right\} &= D_m \left\{ \frac{k_f k_\sigma}{p(T_\sigma p + 1)} + \frac{k_f k_b}{p(T_g p + 1)} \right\} = \\ &= \frac{k_f z}{z-1} \cdot \frac{z[k_b(1-d_b^m) + k_\sigma] + k_b(d_b^m - d_b) - k_\sigma d_b}{z-d_b} = f^*(z) \cdot W_m^*(z), \end{aligned}$$

звідки отримуємо модифіковану дискретну передавальну функцію асинхронного генератора:

$$W_m^*(z) = \frac{z[k_b(1 - d_b^m) + k_\sigma] + k_b(d_b^m - d_b) - k_\sigma d_b}{z - d_b}.$$

Далі отримаємо зображення регульованої і керуючої величин:

$$y_m^* = W_m^* \cdot f^* - W_\Gamma^* \cdot u^* = W_m^* \cdot f^* - W_\Gamma^* W^* \cdot y_m^*,$$

звідки визначаємо:

$$y_m^* = \frac{W_m^* \cdot f^*}{1 + W_\Gamma^* W^*} \quad \text{та} \quad u^* = \frac{W^* W_m^* \cdot f^*}{1 + W_\Gamma^* W^*}. \quad (6.30)$$

Тепер знаходимо зображення процесів в імпульсних системах з лінійними регуляторами при зміщеному збуренні. Для цього підставимо у вираз (6.30) значення відповідних передавальних функцій і впливів.

Для генератора з пропорційним імпульсним регулятором дискретне зображення вихідної напруги при зміщеному кидку навантаження дорівнює:

$$y_{m\pi}^*(z) = -\frac{z^3 k_f [k_\sigma + k_b(1 - d_b^m)] + z^2 k_f [k_b(d_b^m - d_b) - k_\sigma d_b]}{z^3 + z^2(k_\pi k_0 - 1 - d_b) + z[d - k_\pi(k_0 + k_\sigma d_b)] + k_\pi k_\sigma d_b}. \quad (6.31)$$

Перехідний процес, що відповідає рівнянню (6.31) побудований на рис. 6.23.

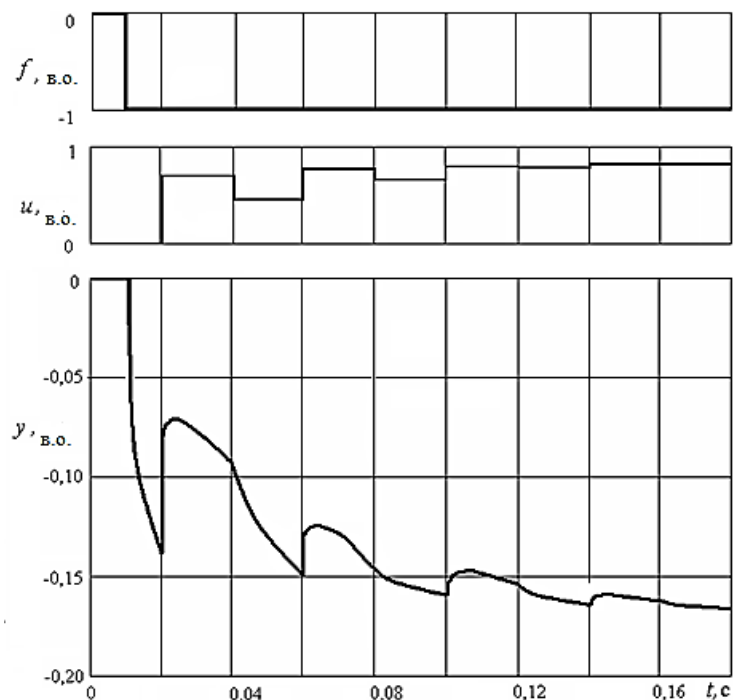


Рис. 6.23. Перехідний процес в системі стабілізації напруги асинхронного генератора з П-регулятором при зміщеній збурюючій дії

Таким чином, запропонована методика дозволяє будувати перехідні процеси в системі керування напруги асинхронного генератора з імпульсним регулятором при обмеженні на величину максимального управління, при автоколиваннях «у малому» і при зміщенні нанесення збурення.

6.8 Висновки до розділу 6.

1. Передавальна функція напруги асинхронного генератора за збудженням та навантаженням може бути представлена трьома складовими [52]:

$$W_{ug} = W_g + W_\sigma + W_L = \frac{k_b}{T_g p + 1} + \frac{k_\sigma}{T_\sigma^2 p^2 + 2\alpha_\sigma T_\sigma^2 p + 1} + \frac{k_L}{T_L p + 1}$$

Процеси збудження і розсіювання непорівнянні за часом, тому передавальні функції W_σ і W_L в сумі з W_g можуть розглядатися як пропорційні ланки з коефіцієнтами k_σ та k_L .

Знайдені аналітичні вирази коефіцієнтів передачі по каналах збудження, частоти обертання і навантаження, а також сталої часу збудження. Чисельні значення коефіцієнтів передачі та сталої часу при експериментальному дослідженні та при моделюванні практично збігаються з результатами, отриманими аналітично. Похибка не перевищує 5%.

2. Значення критичних коефіцієнтів імпульсних П-, І-, Д-регуляторів, які визначають межу стійкості, дорівнюють значенням k_{max} виду (6.26) з точністю до множника 2: $k_{\Pi} = k_{max}$, $k_I = 2k_{max}$, $k_D = k_{max}/2$. Значення критичних коефіцієнтів для складових «ПІ», «ПД», «ПІД» та інших лінійно-імпульсних регуляторів можуть бути отримані простим підсумовуванням на підставі принципу суперпозиції:

$$k_{\Pi} + k_I/2 \leq k_{max}; \quad k_{\Pi} + 2k_D \leq k_{max}; \quad k_{\Pi} + k_I/2 + 2k_D \leq k_{max} .$$

3. Оптимізація структури та налагоджувальних параметрів регулятора напруги асинхронного генератора за швидкодією, яка проведена аналітично та шляхом моделювання перехідних процесів підтверджує, що найкращим для асинхронного генератора являється імпульсний інтегральний регулятор. Пропорційний імпульсний регулятор асинхронного генератора не забезпечує необхідної точності стабілізації напруги, а при збільшенні коефіцієнта підсилення призводить до

коливальності, а потім до нестійкості системи. Використання диференційної складової для асинхронних генераторів недоцільно. Введення Д-складової робить її більш коливальною. Швидка реакція генератора на збурення (навантаження) дозволяє без диференціювання визначити необхідність форсування збудження генератора з першого провалу напруги при перевантаженнях.

4. Порівняння оптимальних законів управління генератора показує, що імпульсний інтегральний закон $u_1^*(t) = k_{n1}y^*(t)$ практично рівноцінний більш складному закону $u_2^*(t) = k_{n1}y^*(t) + k_{n3}u^*(t - T_0)$, а від самого складного закону $u_3^*(t) = k_{n1}y^*(t) + k_{n2}y^*(t - T_0) + k_{n3}u^*(t - T_0)$ відрізняється на 5...7%. Це дозволяє рекомендувати для використання більш простий закон регулювання $u_1^*(t)$.

7. ОПТИМІЗАЦІЯ ТА ПОРІВНЯННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ СУДНОВИХ ГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВОК

Керування напругою суднової електростанції шляхом комутації блоків конденсаторного збудження асинхронного генератора за допомогою цифрових регуляторів характеризується співвимірністю швидкодії генератора з періодами зміни керуючих впливів [27, 35, 52, 59, 98, 110, 116, 152]. Це передбачає розгляд регуляторів генераторних установок як дискретних систем керування.

Для оцінки ефективності системи керування і порівняння різних параметрів регуляторів та структур між собою повинен бути сформований критерій якості її роботи за одним або декількома технологічними показниками. Задача оптимізації параметрів регулятора напруги генератора може бути сформульована як визначення значення коефіцієнтів у рівнянні, що описує закон керування, при якому значення прийнятого критерію оптимізації буде мінімальним. Критерії якості пов'язані з такими показниками роботи системи стабілізації напруги суднового генератора як тривалість перехідного процесу, величина відхилення напруги в статиці і динаміці при комутації навантаження або зміні частоти обертання приводного двигуна [154].

Для виключення розбіжності екстремальних точок для різних критеріїв в області налагоджувальних параметрів та спрощення процесу оптимізації доцільно вибирати комплексний (інтегральний) критерій, що враховує перелічені показники перехідного процесу. В якості такого критерію зазвичай вибирають функціонал, величина якого пов'язана з площею під кривою відхилення напруги від номінального значення протягом перехідного процесу [160].

7.1 Вибір критерію оптимізації дискретної системи стабілізації напруги асинхронного генератора

В роботі вирішується завдання вибору налаштувань регулятора напруги суднової генераторної електроустановки.

При аналітичній оптимізації критерій якості зазвичай являє собою інтеграл від модуля або квадрата відхилення напруги генератора в перехідному процесі:

$$I = \int_0^{\infty} |\Delta u| dt \quad \text{або} \quad I = \int_0^{\infty} (\Delta u)^2 dt .$$

При чисельному інтегруванні диференціальних рівнянь критерії якості повинні враховувати особливості обчислювального процесу при моделюванні, тобто обчислюватися безпосередньо в програмі, що моделює конкретні перехідні процеси.

Запропонований критерій якості враховує вищесказане і являє собою суму дискретних відхилень середньої за період відносної напруги статора генератора. Найбільш детально напруга генератора може характеризуватися зображуючим вектором напруги та його модулем:

$$|\overline{U}_s(k \cdot \Delta t)| = u_m(k \cdot \Delta t) = \sqrt{u_\alpha^2(k \cdot \Delta t) + u_\beta^2(k \cdot \Delta t)} .$$

В цьому разі середня напруга обчислюється один раз за період як середнє арифметичне модуля вектору напруги на кожному кроці вирішення:

$$u_{\text{cp}}(nT_0) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u_m(k \cdot \Delta t) ,$$

де N – кількість кроків чисельного інтегрування за період змінного струму T_0 .

Критерій оптимізації якості регулювання напруги асинхронного генератора може бути представлений сумою модулів відхилення середньої за період напруги u_{cp} від номінальної $u_{\text{ном}}$ протягом перехідного процесу $T_{\text{пр}}$:

$$I_0 = \sum_{n=1}^{E(T_{\text{пр}}/T_0)} |u_n - u_{\text{cp}}(nT_0)|, \quad (7.1)$$

де $E(T_{\text{пр}}/T_0)$ – ціла частина періодів T_0 змінної напруги за час розрахунку перехідного процесу $T_{\text{пр}}$. Кожному перехідному процесу, що розраховується ставиться у відповідність критерій якості I_0 (7.1). Чим менше його значення, тим будуть кращими налагоджувальні параметри регулятора. Тому задача оптимізації регулятора

напруги АГ зводиться до пошуку мінімуму критерію якості в області параметрів його налаштування k_{ni} .

Критерій (7.1) не містить в явному вигляді часу перехідного процесу, проте залежить від нього через кількість підсумовуючих через рівні проміжки часу T_0 відхилень напруги. Час $T_{пр}$ вибирається таким, щоб перехідний процес закінчився. Адитивний критерій якості (7.1) являється дискретним аналогом неперервного інтегрального критерію якості:

$$I = \int_0^{\infty} |\Delta u| dt .$$

Як показують розрахунки розглянутої дискретної системи [44, 45, 52], величина критерію I_0 (7.1) істотно залежить від моменту нанесення збурення. Суттєва залежність моменту нанесення збурення щодо моменту спрацьовування імпульсного регулятора на критерій якості ускладнює вибір оптимальних налаштувань регулятора, робить його неоднозначним. Для виключення цього впливу доцільно використовувати критерій оптимальності, усереднений за часом нанесення збурення:

$$I_1 = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M=T_0/\Delta T_0} I_0(m \cdot \Delta T_0) , \quad (7.2)$$

де ΔT_0 – крок зміни часу нанесення збурення щодо моменту спрацьовування імпульсного регулятора. Зсув моменту нанесення збурення у програмі задається покроковою зміною часу збіжності $T'_{cx} = T_{cx} + m \cdot \Delta T_0$.

Критерії I_0 та I_1 будуть залежати від величини і характеру збурення, наприклад, від комотованого навантаження. Інваріантним відносно навантаження критерієм буде загальний критерій, який розглядається як математичне очікування критерію I_1 при випадковому характері величини навантаження генераторної установки:

$$I_2 = \sum_{i=1}^{E(G_H/\Delta G)} p_i \cdot I_1 , \quad (7.3)$$

де ΔG – крок зміни провідності навантаження, G_n – номінальна провідність навантаження, p_i – вірогідність комутації навантаження ($i \cdot \Delta G$).

Узагальнений критерій (7.3) не залежить від вихідних параметрів перехідних процесів, а визначається тільки конструктивними характеристиками генераторної установки та її системи керування, тому він розглядається як найбільш підходящим для оптимізації параметрів і структури цифрового регулятора напруги суднової генераторної електроустановки.

Для оптимізації регулятора напруги використаний пакет програм [35, 52], що дозволяють багаторазово моделювати перехідні процеси і обчислювати по ним значення критерію якості. Для обчислення одного перехідного процесу в ці програми вводиться процедура одиночного перехідного процесу, а потім організуються послідовності обчислень критеріїв якості при зміні вихідних параметрів перехідних процесів або налаштувань регулятора (додаток А).

7.2 Оптимізація дискретної системи стабілізації напруги асинхронного генератора

Завдання параметричної оптимізації дискретного регулятора напруги АГ може бути сформульоване як визначення значень коефіцієнтів в рівнянні, що описує закон керування, при якому значення прийнятого для даної системи критерію оптимізації буде мінімальним [52].

Пошук точки оптимального налаштування регулятора напруги АГ будемо здійснювати в тривимірній області коефіцієнтів k_{n1} , k_{n2} і k_{n3} рівняння імпульсного закону керування:

$$u^*(t) = k_{n1}y^*(t) + k_{n2}y^*(t - T_0) + k_{n3}u^*(t - T_0),$$

де $u^*(t)$, $y^*(t)$ і $y^*(t - T_0)$, $u^*(t - T_0)$ – поточні і попередні значення керуючого впливу і регульованого параметра.

Існує досить багато чисельних методів пошуку екстремуму: покоординатної оптимізації, градієнтні методи найшвидшого спуску, метод пробних кроків, симплекс-методи та ін. [160]. Однак успішність розв'язання задачі залежить від

гладкості поверхні використовуваного функціоналу оптимізації, від наявності «ярів» і локальних екстремумів. Від вибору методу пошуку залежить в основному час реалізації пошукової процедури.

Можливість здійснення пошуку оптимуму критеріїв I_0, I_1 , або I_2 за допомогою чисельних методів перевірена використанням методу покоординатного спуску в тривимірній області параметрів k_{n1}, k_{n2} і k_{n3} дискретного регулятора напруги асинхронного дизель-генератора. Цей метод має досить простий алгоритм вибору напрямку руху та має можливість графічного візуального супроводу. Для реалізації покоординатного пошуку оптимальних коефіцієнтів k_{n1}, k_{n2} та k_{n3} цифрового регулятора напруги асинхронної генераторної установки використана комп'ютерна програма [35]. Для розрахунку узагальненого критерію оптимізації I_2 вводиться процедура Opt, яка організовує зміну часу нанесення та величини комутованого навантаження. Програма здійснює зміну коефіцієнтів регулятора з початкової точки $(k_{n10}, k_{n20}, k_{n30})$, виводить на екран поточні значення коефіцієнтів та критерію оптимізації I_2 .

Час виконання процедури оптимізації істотно залежить від вибору початкової точки розрахунку та кроку зміни коефіцієнтів. Якщо немає попередньої інформації про характер поверхні критерію оптимізації, то доцільно провести попередній розрахунок зі збільшеними кроками $\Delta T_0, \Delta G$ та Δk_{ni} .

Пошук оптимальних параметрів за допомогою автоматизованих пошукових методів не завжди призводить до глобального екстремуму критерію оптимізації. Починаючи пошук із різних початкових точок $(k_{n10}, k_{n20}, k_{n30})$, можна «вийти» на різні локальні мінімуми, що визначається характером залежності критерію якості від варійованих змінних $I_2 = f(k_{n1}, k_{n2}, k_{n3})$.

Сучасні комп'ютерні програми 3D-графіки дають можливість будувати наочні тривимірні графіки функцій, що дозволяють візуально визначити їх характер та глобальний мінімум. З цією метою використана програма для обчислення критерію оптимізації в області двох параметрів $I_2 = f(k_{n2}, k_{n3})$ при фіксованому коефіцієнті k_{n1} . Значення I_2 обчислюються в площині (k_{n2}, k_{n3}) з кроком Δk_{n2} і Δk_{n3} , а

потім виводяться у зовнішній файл у вигляді матриці. Подальша обробка даних виконується програмою побудови тривимірних графіків.

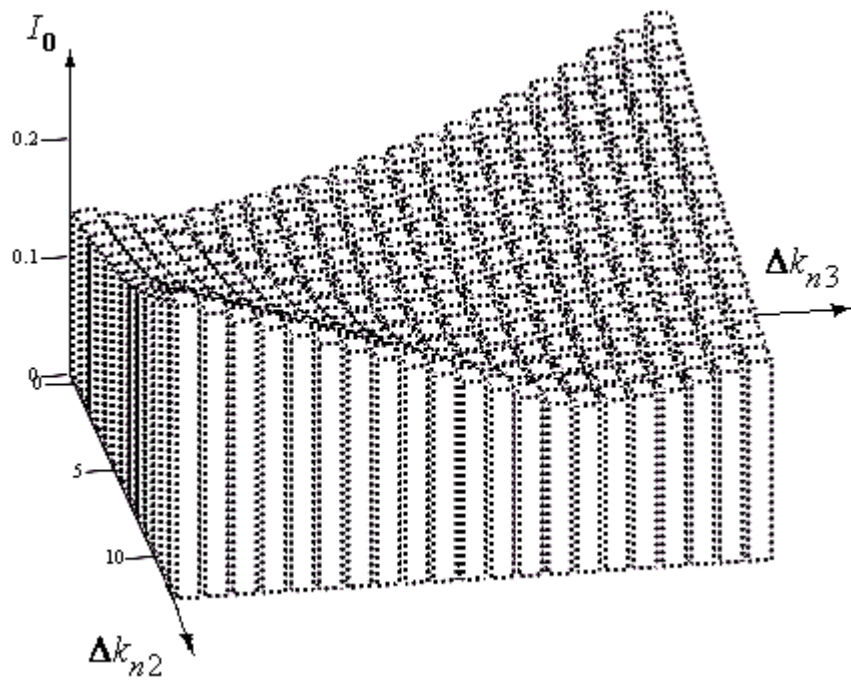


Рис. 7.1, а. Критерій оптимальності I_2 у вигляді стовпчастої гістограми (Bar Chart)

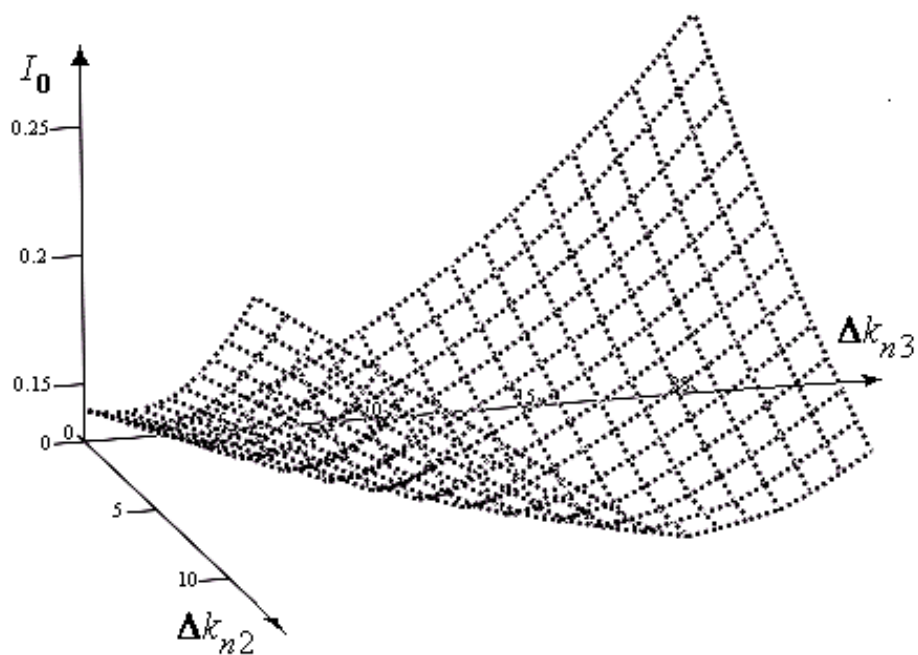


Рис. 7.1, б. Критерій оптимальності I_2 у формі поверхні (Surface)

Тривимірні графіки критерію оптимізації зручно представляти у вигляді стовпчастої гістограми (Bar Chart), рис.7.1, а, в формі поверхні (Surface), рис.7. 1, б або у вигляді контурного креслення (Contour Plot), рис.7. 1, в.

На рис. 7.1 побудовані графіки значень критерію оптимізації I_2 при включенні 75% активно-індуктивного навантаження асинхронного дизель-генератора $k_{n1} = -6, k_{n2} = 3,6 \dots 4,8$ і $k_{n3} = 0,4 \dots 0,8$ з кроком $\Delta k_{n2} = 0,1$ і $\Delta k_{n3} = 0,02$.

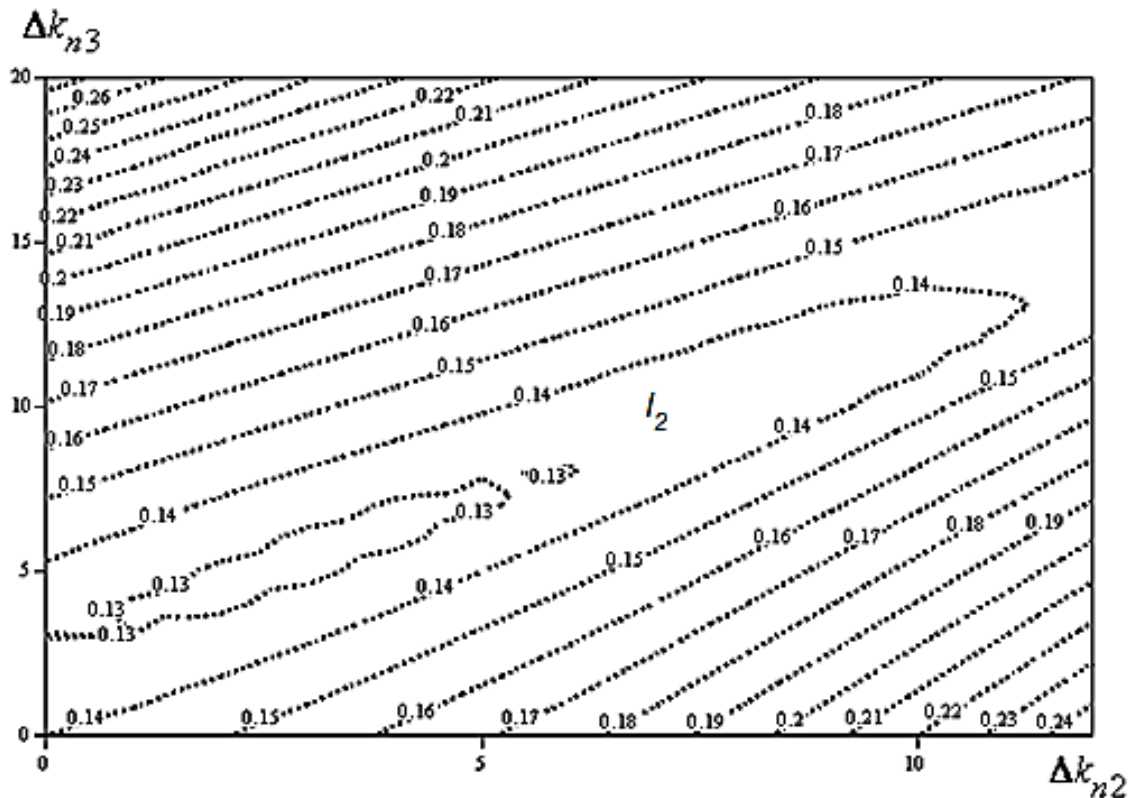


Рис. 7.1, в. Критерій оптимальності I_2 у вигляді контурного креслення (Contour Plot)

Порівняння цих форм представлення функції $I_2 = f(k_{n2}, k_{n3})$ показує, що найбільш зручною для вибору оптимальних коефіцієнтів являється форма у вигляді контурного креслення (Contour Plot), рис.7. 1, в.

Побудова і аналіз поверхонь критерію оптимізації в області налагоджувальних параметрів регулятора напруги k_{n1}, k_{n2} та k_{n3} асинхронного дизель-генератора дозволяє зробити кілька висновків.

Геометрично область мінімальних значень критерію оптимізації являє собою досить велику відносно плоску поверхню, розташовану по діагоналі системи

координат налагоджувальних коефіцієнтів. Позначки величини критерію оптимізації на координатних графіках рис.7.1 свідчать про відсутність значних перепадів в цій області: різниця значень в області мінімальних значень критерію оптимальності становить частки відсотка.

Ця особливість поверхонь визначає вибір методу пошуку оптимальних налагоджувальних параметрів. Пошукові методи малоефективні, оскільки приводять тільки в одну з точок мінімуму на краю плоскої частини мінімальних значень критерію оптимізації. Більш результативним являється метод побудови поверхонь за допомогою 3D-графіки. Після побудови відповідного тривимірного графіка візуально можна вибрати налаштування регулятора в середині плоского «дна» поверхні критерію оптимізації. Такий вибір також забезпечить мінімальну чутливість системи керування до незначних відхилень налагоджувальних параметрів цифрового регулятора від обраного оптимуму.

При трьох оптимізаційних параметрах не вдається графічно представити функцію $I = f(k_{n1}, k_{n2}, k_{n3})$ на одному кресленні. У цьому випадку доводиться зіставляти ряд графіків критерію оптимізації, відповідним фіксованим значенням одного з коефіцієнтів k_{ni} з певним кроком його зміни Δk_{ni} .

Величина інтегрального критерію якості залежить від параметрів електроустановки та налагоджувальних параметрів регулятора k_{ni} , а також від величини і характеру комутованого навантаження. На відміну від неперервного функціоналу, дискретний критерій якості залежить також від часу нанесення збурення відносно моменту спрацьовування імпульсного регулятора ΔT_0 .

На рис.7.2 показані залежності критерію якості I_0 від коефіцієнта цифрового інтегрального регулятора k_{n1} при включенні (графік б) і відключенні (графік а) навантаження асинхронного генератора. Графіки на рис.7.2 побудовані для моментів часу нанесення збурення відносно моменту спрацьовування імпульсного регулятора, які відрізняються на чверть періоду.

Величина критерію I_1 залежить від величини та характеру комутованого навантаження. Графіки такої залежності для асинхронної генераторної установки з цифровим інтегральним регулятором напруги побудовані на рис. 7.3. Як видно із

рисунка, криві I_1 перетинаються, тобто для різного навантаження оптимальні настройки регулятора не збігаються.

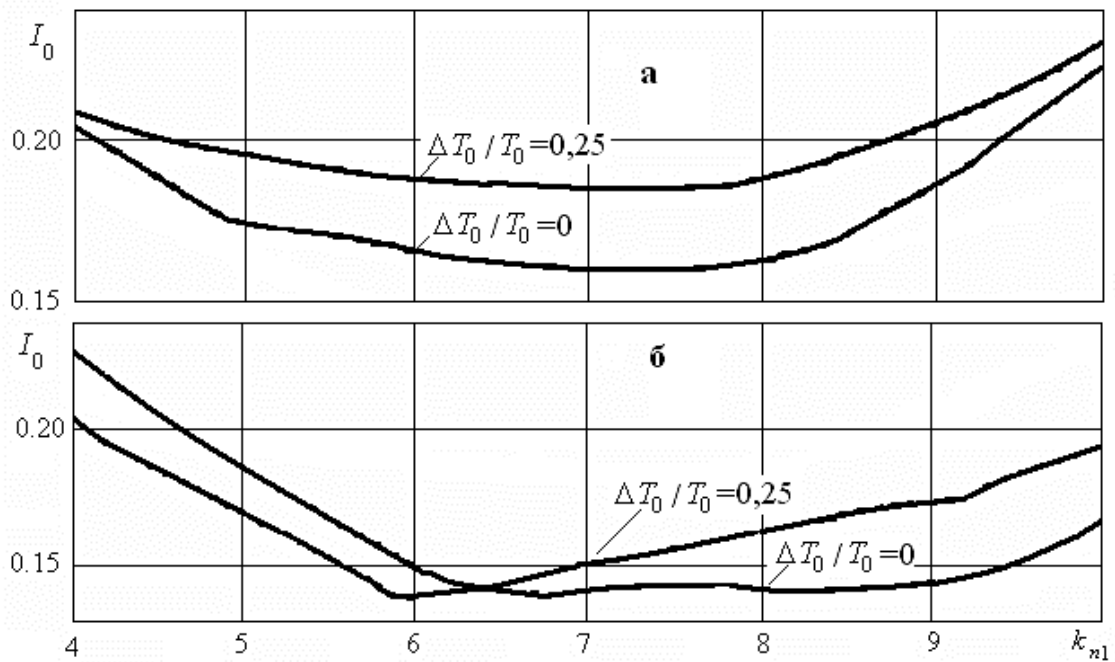


Рис.7.2. Залежність критерію оптимізації від коефіцієнта цифрового регулятора:
а – відключення навантаження; б – включення навантаження

Узагальнений критерій I_2 (7.3) не залежить від вихідних параметрів перехідних процесів, а визначається тільки конструкцією генераторної установки та її системою керування (рис. 7.4), тому він являється найбільш підходящим для оптимізації параметрів та структури цифрового регулятора напруги суднової генераторної установки.

Під оптимізацією структури цифрового регулятора будемо розуміти вибір одного з можливих законів керування шляхом порівняння їх за єдиним критерієм оптимізації. Кожна з порівнюваних систем керування повинна мати оптимальні згідно з цим же критерієм налагоджувальні параметри.

Таким чином, оптимізація структури зводиться до послідовної процедури параметричної оптимізації деякої множини систем керування з різними регуляторами та подальшим порівнянням мінімальних значень їх критеріїв оптимізації.

Розглянемо системи керування судновими асинхронними генераторними установками з регуляторами напруги, які мають один з наступних законів керування:

$$\begin{aligned} u_1^*(t) &= k_{n1} \cdot y^*(t); \\ u_2^*(t) &= k_{n1} \cdot y^*(t) + k_{n3} \cdot u^*(t - T_0); \\ u_3^*(t) &= k_{n1} \cdot y^*(t) + k_{n2} \cdot y^*(t - T_0) + k_{n3} \cdot u^*(t - T_0). \end{aligned}$$

Наведені закони керування мають по одному, двом і трьом налагоджувальних параметрів, тобто мають різну розмірність оптимізаційної задачі. Вказані системи за допомогою розроблених програм зіставлені з трьома описаними раніше критеріями оптимізації I_0, I_1 і I_2 . Мінімальні значення критерію оптимізації I_0 складають відповідно: $(I_0)_3 = 0,147$; $(I_0)_2 = 0,156$; $(I_0)_1 = 0,157$. Приблизно такі ж співвідношення величин зберігаються і для більш загальних критеріїв I_1 і I_2 .

На рис. 7.3 та 7.4 показані залежності критеріїв I_1 і I_2 від коефіцієнта налаштування k_{n1} закону керування $u_1^*(t)$, що дозволяють визначити оптимальне значення налагоджувального коефіцієнта $(k_{n1})_{\text{опт}} = 6.7$.

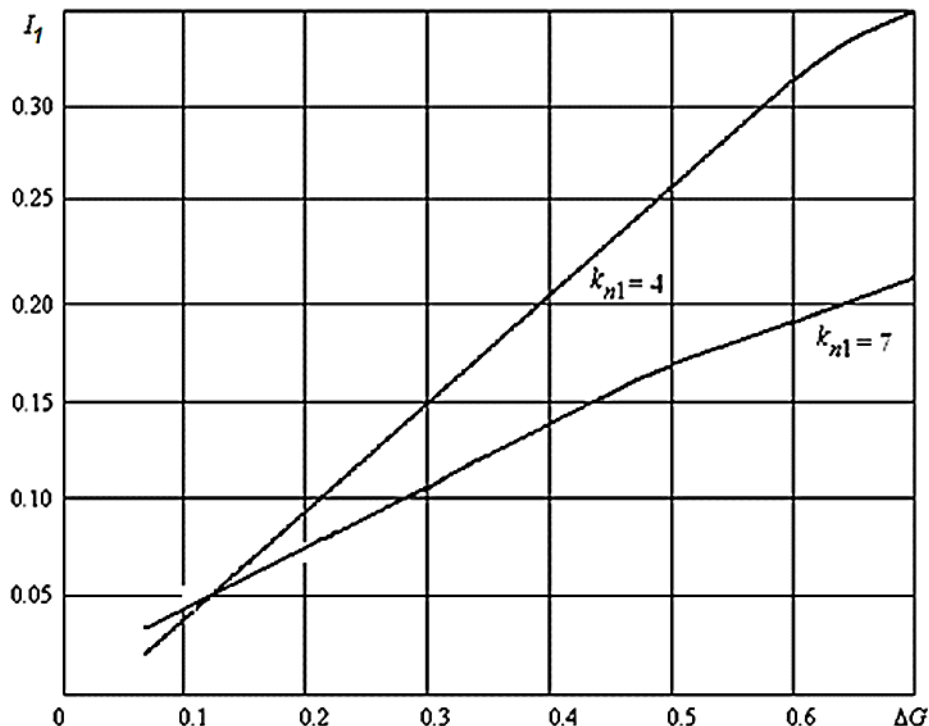


Рис. 7.3. Залежність критерію оптимізації I_1 від величини комутованого навантаження при різних коефіцієнтах налаштування цифрового регулятора

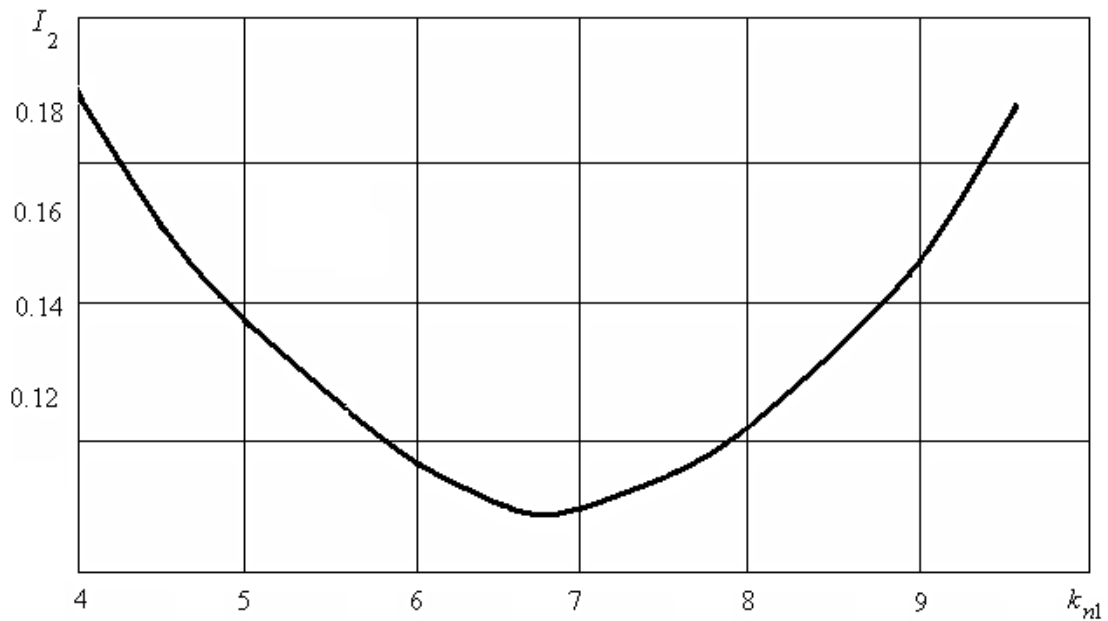


Рис.7.4. Залежність узагальненого критерію I_2 оптимальності від налагоджувального коефіцієнта k_{n1} цифрового регулятора напруги генераторної установки

Порівняння законів керування за критеріями I_0 , I_1 і I_2 показує, що дискретно-імпульсний інтегральний закон $u_1^*(t)$ за величиною критеріїв оптимізації практично рівноцінний більш складному закону $u_2^*(t)$, а від самого складного закону $u_3^*(t)$ відрізняється на 5...7%, що дає підставу рекомендувати для використання більш простий закон регулювання $u_1^*(t)$ [52].

7.3. Порівняння процесів комутації навантаження дизель-генераторних установок з синхронними та асинхронними генераторами

Для об'єктивного зіставлення режимів комутації навантаження синхронних і асинхронних електроустановок потрібно створити рівні умови для порівнюваних об'єктів. Очевидно, що в обох випадках потрібно зіставляти найкращі показники генераторних установок. По-перше, всі параметри приводного двигуна, регулятора частоти обертання і комутуваного навантаження повинні бути однаковими; по-друге, налагоджувальні параметри регуляторів напруги повинні бути оптимальними за однаковими критеріями.

У попередніх параграфах знайдені оптимальні параметри імпульсного регулятора напруги асинхронного генератора.

Виконаємо розрахунок оптимальних налагоджувальних параметрів системи збудження безконтактного синхронного генератора шляхом побудови та оцінки перехідних процесів комутації навантаження за інтегральним критерієм якості:

$$I = \frac{1}{t_{кр}} \int_0^{t_{кр}} |u_{ном} - u_m(t)| dt, \quad (7.4)$$

де $u_m(t)$ – модуль зображуючого вектору напруги статора генератора, $t_{кр}$ – час кінця розрахунку перехідного процесу. Модуль вектору $u_m(t)$ пов'язаний з його проекціями на осі α і β співвідношенням $u_m = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}$. Тривалість перехідного процесу $t_{кр}$ для всіх порівнюваних процесів вибирається однаковою, при цьому час $t_{кр}$ повинен бути більше часу будь-якого з них.

Розрахунок перехідних процесів виконаний за допомогою математичної моделі, в основу якої покладено рівняння узагальненої електричної машини Парка-Горева з однією парою взаємно перпендикулярних обмоток на статорі та однією обмоткою збудження на роторі. Наявність несиметрії ротора синхронного генератора передбачає вибір системи координат (d, q) , жорстко пов'язаної з ротором машини.

Рівняння для потокозчеплень, напруг і струмів синхронного генератора в системі координат (d, q) мають вигляд [92]:

$$\frac{d\Psi_{sd}}{d\tau} = \Psi_{sq}\omega_r - r_s i_{sd} - u_{sd}, \quad \frac{d\Psi_{sq}}{d\tau} = -\Psi_{sd}\omega_r - r_s i_{sq} - u_{sq}, \quad \frac{d\Psi_f}{d\tau} = -u_f - r_f i_f, \quad (7.5)$$

де Ψ_{sd}, Ψ_{sq} – проекції вектору потокозчеплення статора на осі d і q ; $u_{sd}, u_{sq}, i_{sd}, i_{sq}$ – проекції векторів напруги та струму статора на осі d і q ; r_s – опір обмотки статора; Ψ_f, i_f, u_f, r_f – потокозчеплення, струм, напруга та опір обмотки збудження; ω_r – частота обертання ротора генератора; τ – відносний час.

Проекції потокозчеплення статора і ротора визначаються через відповідні проекції струмів:

$$\Psi_{sd} = (L_d + L_{sd})i_{sd} + L_d i_f, \quad \Psi_{sq} = (L_q + L_{sq})i_{sq}, \quad \Psi_f = L_d i_{sd} + L_f i_f, \quad (7.6)$$

де L_{sd}, L_{sq} – індуктивності розсіювання статорних обмоток; L_d, L_q – індуктивності головного контуру намагнічування по осях d, q ; L_f – індуктивність обмотки збудження.

Для рішення системи диференціальних рівнянь у формі Коші (7.5) чисельними методами були визначені змінні, які не мають похідних, через ті змінні, які мають похідні, тобто через потокозчеплення. Із системи рівнянь (7.6) були знайдені струми через потокозчеплення:

$$\begin{aligned} i_f &= [L_d \Psi_{sd} - (L_d + L_{sd})\Psi_f] / (L_d^2 - L_d L_f - L_f L_{sd}); \\ i_{sd} &= (\Psi_f - L_f i_f) / L_d; \quad i_{sq} = \Psi_{sq} / (L_q + L_{sq}). \end{aligned} \quad (7.7)$$

Напруги статора u_{sd}, u_{sq} у системі (7.5) пов'язані зі струмами i_{sd}, i_{sq} через навантаження генератора. Якщо навантаження нелінійне або має у своєму складі індуктивності або ємності, то їх рівняння доцільно записувати в нерухомих відносно статора системах координат (α, β) або (a, b, c) .

Розглянемо типове навантаження суднового синхронного генератора у вигляді паралельно включених ланцюгів з активного навантаження з провідністю g_n і активно-індуктивного ланцюга з опором r_n та індуктивністю L_n . У першому наближенні так може бути представлено нагрівальне, освітлювальне, трансформаторне та електродвигунне навантаження для автономного генератора.

Перетворимо струми статора синхронного генератора з системи (d, q) в систему (α, β) :

$$i_\alpha = i_{sd} \cos \omega_r t - i_{sq} \sin \omega_r t; \quad i_\beta = i_{sq} \cos \omega_r t + i_{sd} \sin \omega_r t. \quad (7.8)$$

Рівняння описаного навантаження генератора у формі Коші в системі (α, β) мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} u_\alpha &= (i_\alpha - i_{L\alpha}) / g_n; \quad u_\beta = (i_\beta - i_{L\beta}) / g_n; \\ \frac{di_{L\alpha}}{dt} &= (u_\alpha - r_n i_{L\alpha}) / L_n; \quad \frac{di_{L\beta}}{dt} = (u_\beta - r_n i_{L\beta}) / L_n, \end{aligned} \quad (7.9)$$

де $i_{L\alpha}, i_{L\beta}$ – струми активно-індуктивного кола навантаження.

Для рішення системи рівнянь (7.5) знайдемо проекції напруги статора u_{sd}, u_{sq} через її проекції на осі (α, β) :

$$u_{sd} = u_{\alpha} \cos \omega_r t + u_{\beta} \sin \omega_r t; \quad u_{sq} = u_{\beta} \cos \omega_r t - u_{\alpha} \sin \omega_r t. \quad (7.10)$$

Напругу збудження u_f синхронний генератор безщіткового виконання отримує від збудника, інерційність якого визначається сталою часу T_B . Збудник та пропорційно-інтегральний регулятор напруги (K_r, T_i – відповідно коефіцієнт підсилення та стала інтегрування регулятора напруги) можуть бути представлені передавальною функцією виду:

$$W_B \cdot W_{PI} = \frac{K_r + 1/T_i p}{T_B p + 1}.$$

Звідки напруга збудження u_f може бути представлена як сума пропорційної u_{fp} та інтегральної u_{fi} складових:

$$u_f = \frac{K_r + 1/T_i p}{T_B p + 1} (1 - u_m) = \frac{K_r (1 - u_m)}{T_B p + 1} + \frac{1 - u_m}{T_i p (T_B p + 1)} = u_{fp} + u_{fi}.$$

Для складових напруги збудження записуємо систему диференціальних рівнянь першого порядку:

$$\frac{du_{fp}}{dt} = [-u_{fp} + K_r(1 - u_m)]/T_B; \quad \frac{du_{fi}}{dt} = u_i; \quad \frac{du_i}{dt} = [-u_i T_i + K_r(1 - u_m)]/T_B T_i \quad (7.11)$$

Отже, система рівнянь (7.5), (7.7) – (7.11) представляє собою модель безщіткового синхронного генератора з пропорційно-інтегральним регулятором, що працює на активно-індуктивне навантаження. Ця модель використана в комп'ютерній програмі [37, 46], що моделює перехідні процеси при зміні його навантаження.

Швидкодія сучасних комп'ютерів дозволяє перейти до оптимізації систем управління методом побудови та аналізу 3D - поверхонь критерію якості в області двох налагоджувальних параметрів цих систем.

При розрахунку перехідних процесів у програмі одночасно обчислюється інтегральний критерій якості I (7.4) при варіаціях параметрів K_r, T_i у заданих межах з постійним кроком ΔK_r і ΔT_i . Поверхні критерію I в області налаштування

регулятора K_r, T_i наведено на рис.7.5. Перехідні процеси обчислювалися при комутації навантаження від 25 до 100 % при різних обмеженнях на збудження: $U_{fmax} = 1.2$, $U_{fmax} = 2.0$ і $U_{fmax} = 20$. Вид, тривалість та перерегулювання перехідного процесу залежать від обмеження на збудження, тому оптимальні налагоджувальні параметри регулятора K_r, T_i будуть різними при зміні U_{fmax} .

Мінімуми функціонала I (7.4) для значень $U_{fmax} = 1,2$; $U_{fmax} = 2,0$ та $U_{fmax} = 20$ знаходяться в точках з координатами $(K_r = 23, T_i = 15)$, $(K_r = 21, T_i = 8)$ і $(K_r = 35, T_i = 9)$ відповідно.

Очевидно, що обмеження на збудження U_{fmax} впливає на перехідний процес до того моменту, поки його величина не перевищує можливого розрахункового максимуму напруги u_f з розглянутим регулятором, що становить 4...5 його номінальних значень.

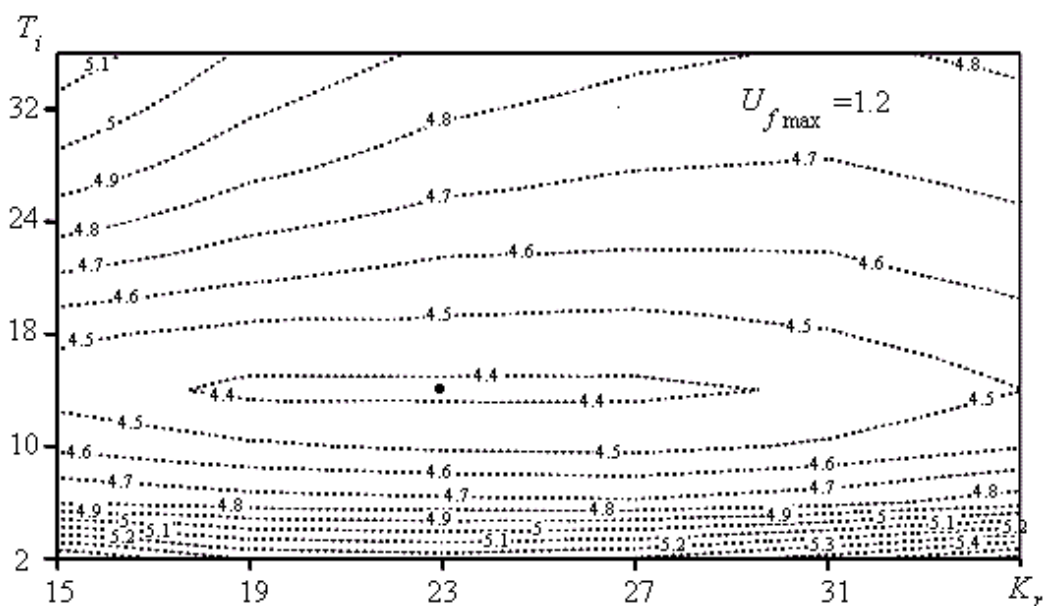


Рис. 7.5. Поверхні критерію якості системи регулювання напруги синхронного генератора при $U_{fmax} = 1,2$

При значеннях $U_{fmax} \leq 1$ перехідний процес істотно затягується, критерій I різко зростає. Однак це явище не має практичного значення при справній системі збудження генератора та може виникнути при аварійній роботі, наприклад, при частковому виході з ладу обертових діодів.

Виконаємо порівняння перехідних процесів синхронної і асинхронної електроенергетичної установки, рис 7.6.

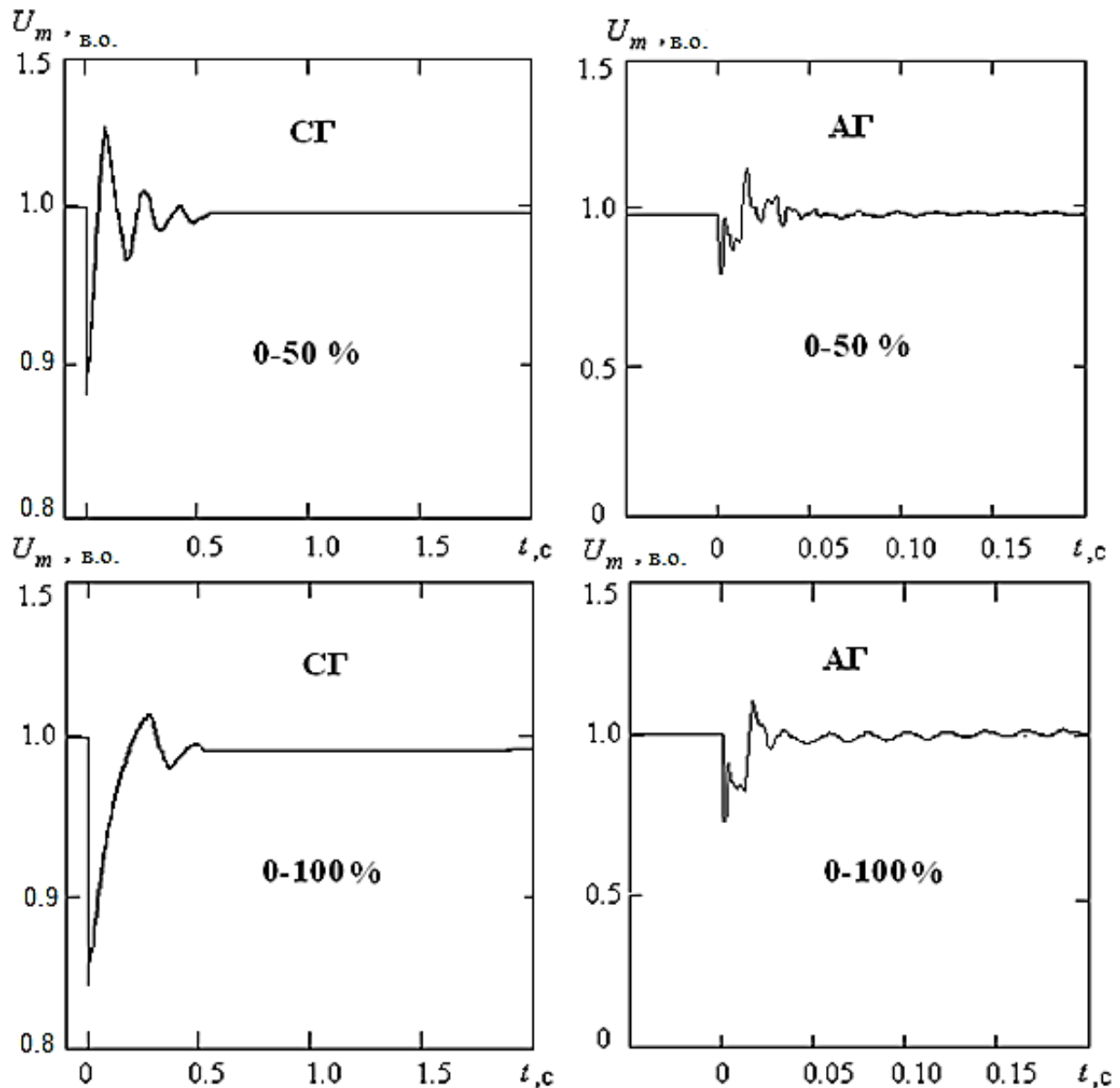


Рис. 7.6. Перехідні процеси включення 50 % і 100 % активно-індуктивного навантаження в синхронній і асинхронній електроенергетичних установках

Величина динамічного провалу напруги синхронної генераторної установки становить 12-17 %, асинхронної – 20-30 %. Час перехідного процесу значно відрізняється. У синхронного генератора він становить 0,5...0,6 с, а у асинхронного – не перевищує 0.05 с, тобто 2 – 3 періоди генеруємої напруги.

Генераторна установка з оптимальними налагоджувальними параметрами регулятора збудження асинхронного генератора робить її практично інваріантною до навантаження.

На рис. 7.7 – 7.10 наведені результати комп'ютерного моделювання перехідних процесів в синхронній та асинхронній генераторних установках з дизельним приводом в режимі комутації 50 % активно-індуктивного навантаження та оптимальними за інтегральним критерієм налагоджувальними параметрами регулятора напруги.

Параметри дизельного двигуна та його регулятора частоти обертання обрані для обох генераторів однаковими і відповідають потужності 400 кВт. При миттєвій зміні навантаження кожний із генераторів практично миттєво виробляє момент опору M_g , що відповідає активному навантаженню генератора. Тому перехідні процеси в каналі стабілізації частоти обертання виявляються приблизно однаковими як по тривалості, так і по амплітуді зміни моменту двигуна M_d та частоти обертання ротора генератора ω_2 .

Процеси, що відбуваються в каналі керування напругою істотно різняться. Інерційність ланцюга збудження синхронного генератора не дозволяє досить швидко компенсувати розмагнічуючу дію комутованого навантаження, що затягує процес відновлення напруги генератора. В асинхронному генераторі керування напругою здійснюється в колі статора, тобто в тому ж місці, де змінюється навантаження. Це дає можливість практично миттєво, за один період генеруємої напруги компенсувати вплив навантаження.

Таким чином, проведений аналіз перехідних процесів при комутації 50 % навантаження для синхронних та асинхронних дизельних генераторних установок, наведених на рис. 7.7 – 7.10, підтверджує перевагу асинхронних генераторів по швидкодії каналу регулювання напруги при однакових характеристиках каналу регулювання частоти [61].

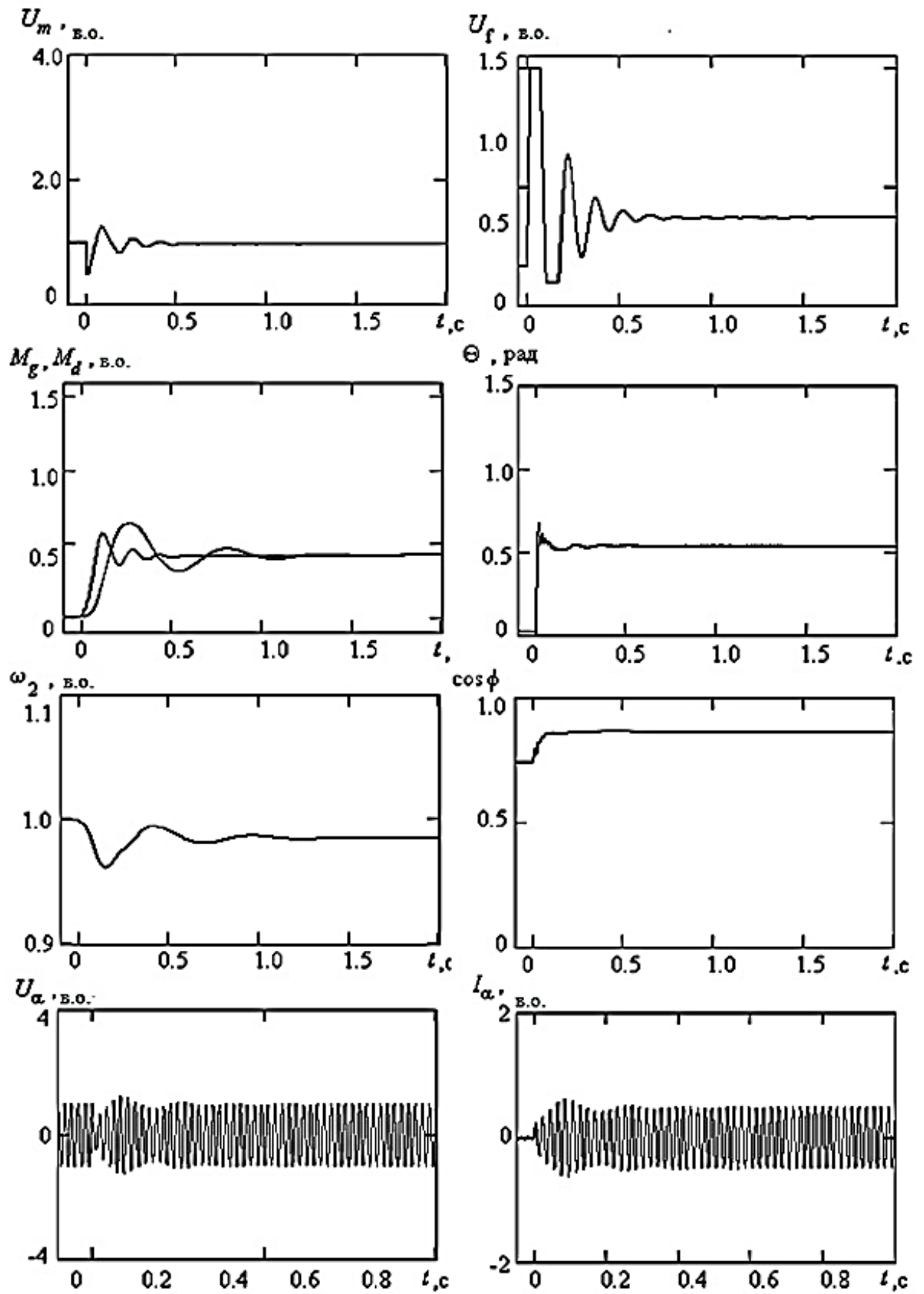


Рис. 7.7. Перехідні процеси в синхронній генераторній установці при включенні 50 % активно-індуктивного навантаження

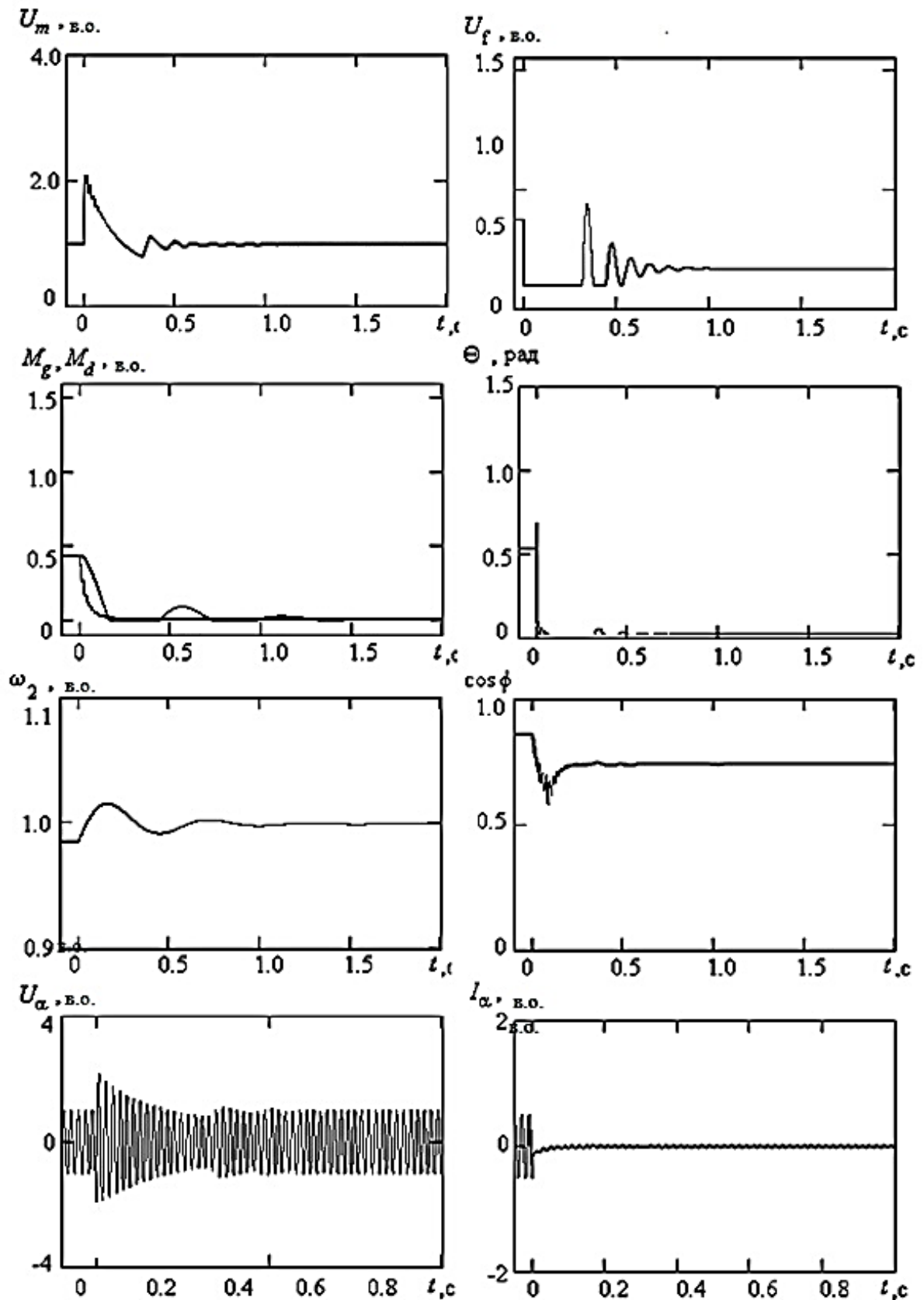


Рис. 7.8. Перехідні процеси в синхронній генераторній установці при відключенні 50 % активно-індуктивного навантаження

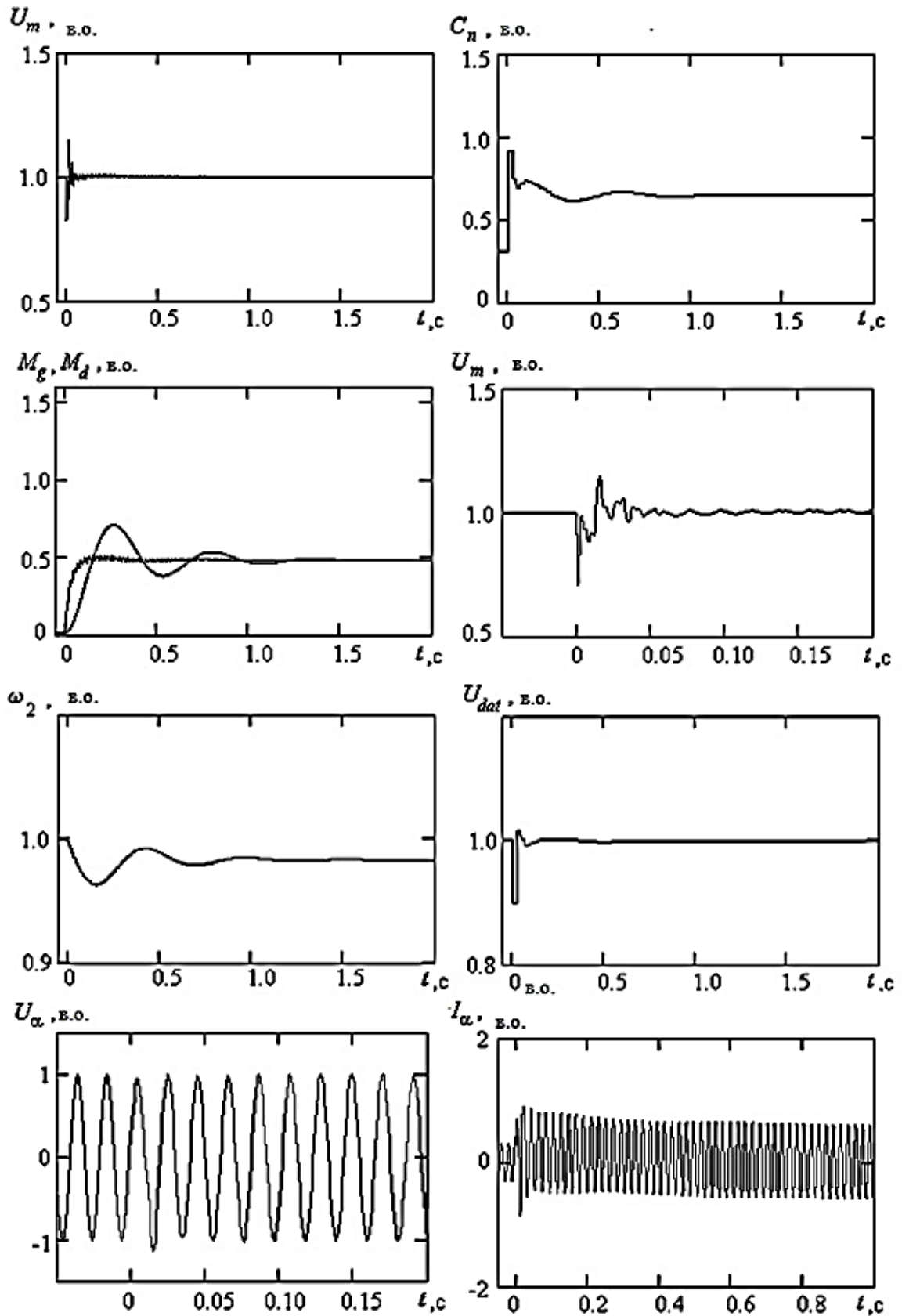


Рис. 7.9. Перехідні процеси в асинхронній генераторній установці при включенні 50 % активно-індуктивного навантаження

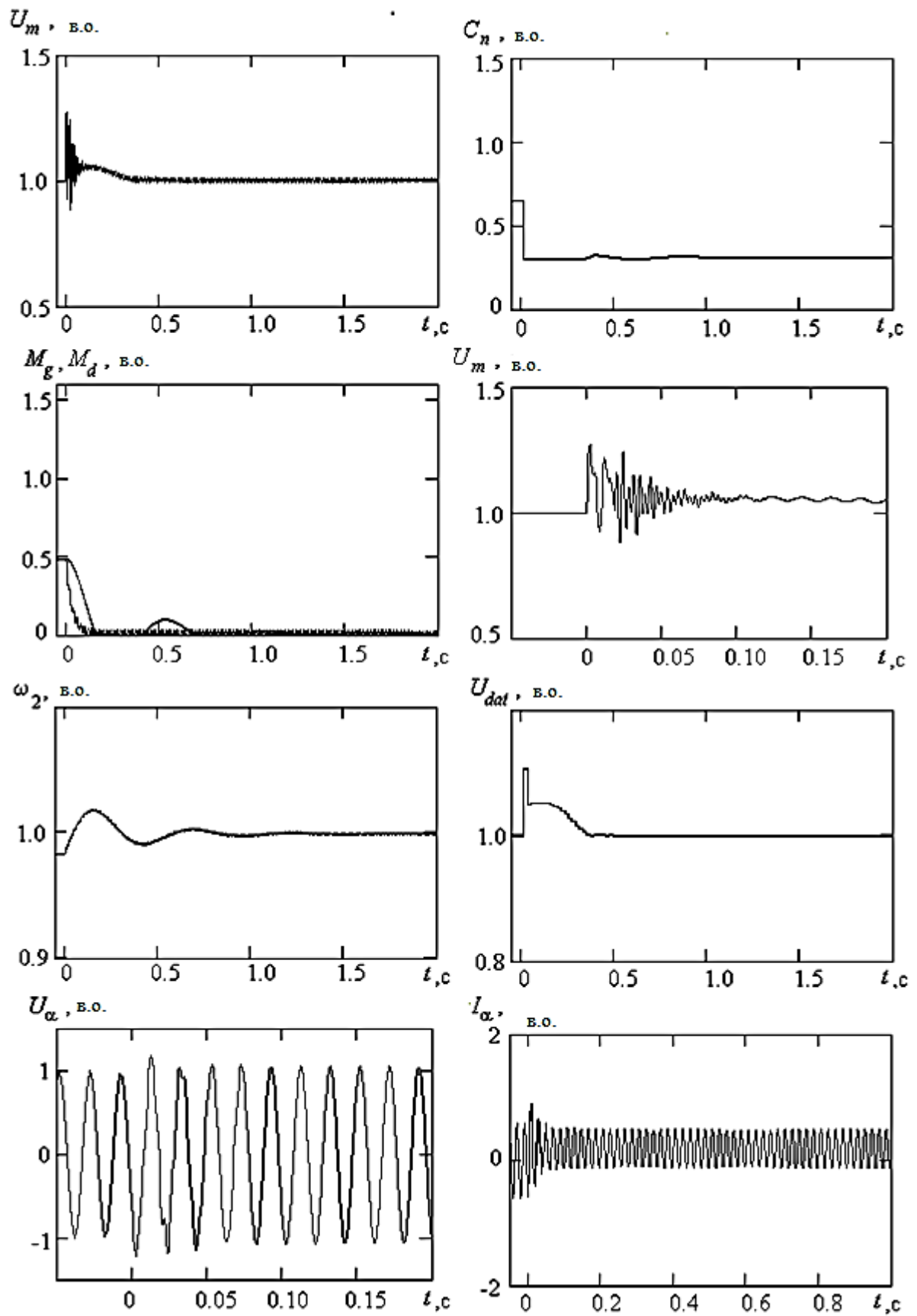


Рис. 7.10. Перехідні процеси в асинхронній генераторній установці при відключенні 50 % активно-індуктивного навантаження

7.4 Порівняльний аналіз режимів включення на паралельну роботу генераторних установок з синхронними та асинхронними генераторами

Розроблені в дисертаційній роботі комп'ютерні моделі дизельних генераторних установок дозволяють моделювати процеси їх включення на паралельну роботу [46]. На цих моделях можна аналізувати перехідні процеси в синхронних, а також в асинхронних генераторних установках. Моделі дозволяють встановлювати різні початкові умови в момент включення генераторних установок на паралельну роботу.

Спочатку розглянемо процеси синхронізації при однакових частотах і різних фазах генераторів, які включаються на паралельну роботу. Кількісну оцінку процесів виконаємо по максимальному динамічному відхиленні частоти обертання $\Delta\omega$ за інтегральним критерієм I , який дорівнює площі під кривою відхилення частоти обертання від номінального значення в сталому режимі.

На рис. 7.11, а та 7.11,б показані процеси включення на паралельну роботу з близькими кутами різниці фаз синхронних генераторів перед включенням. На рис. 7.11,а показано процес синхронізації СГ коли не відбувається випадіння з синхронізму. При невеликому збільшенні кута різниці фаз генераторів (див. рис. 7.11,б) відбувається переверт ротора генератора. Ці два процеси істотно відрізняються за енергетичними показниками. Процес на рис. 7.11, б являється неприпустимим або аварійним, відхилення його частоти $\Delta\omega$, динамічні моменти M_d та інтегральний критерій I значно перевищують аналогічні показники процесу на рис. 7.11, а.

В роботі було проведене дослідження впливу різниці фаз генераторних установок на енергетичні показники суднової електростанції [46]. Побудовані залежності динамічного провалу частоти обертання дизель-генераторів з синхронними та асинхронними генераторами. На рис. 7.12 наведені залежності динамічного провалу частоти обертання синхронних дизель-генераторів $\Delta\omega$ (рис. 7.12, а) та інтегрального критерію якості I (рис. 7.12, б) від різниці фаз генераторів, що включаються на паралельну роботу.

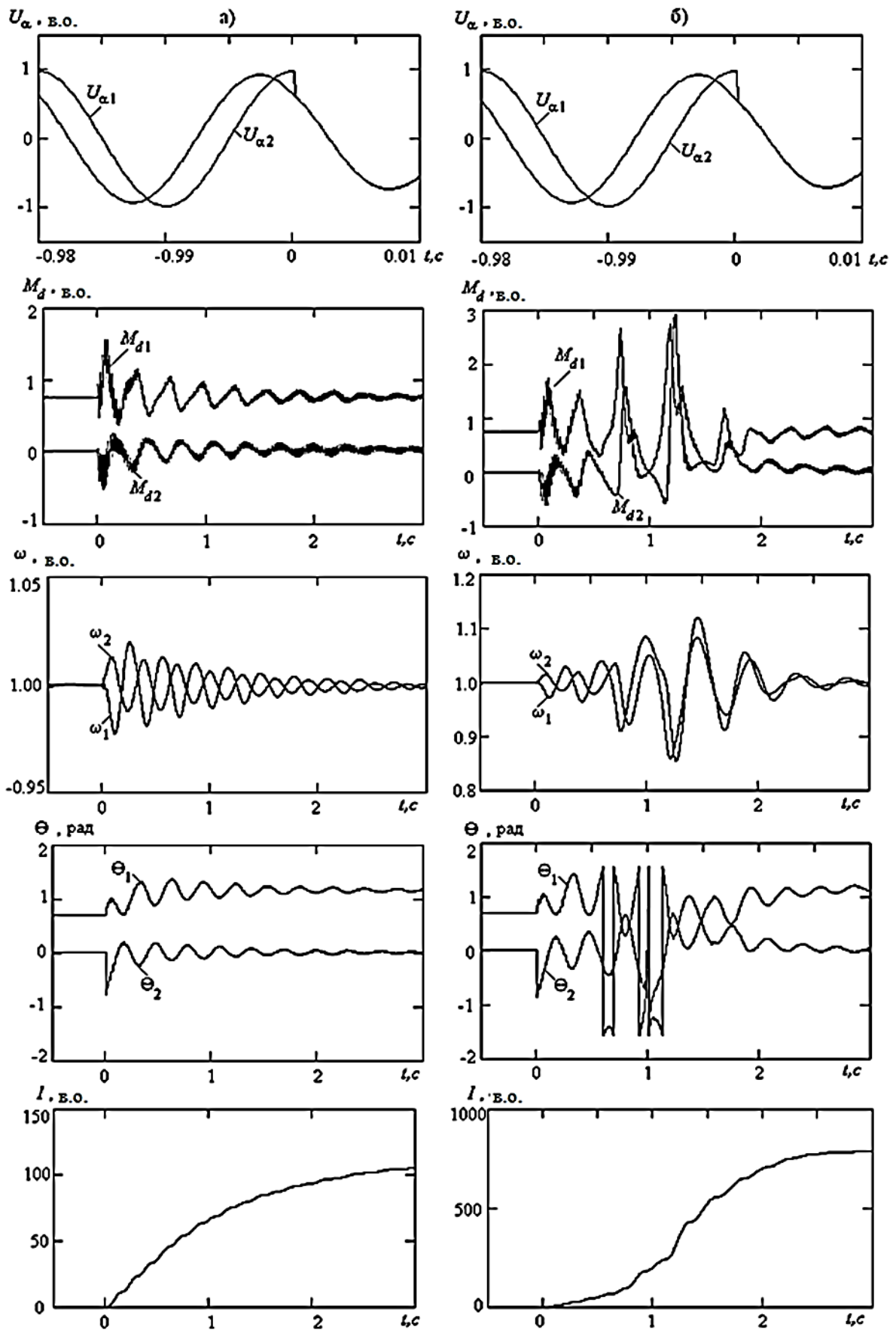


Рис. 7.11. Включения синхронных генераторных установок
на параллельную работу

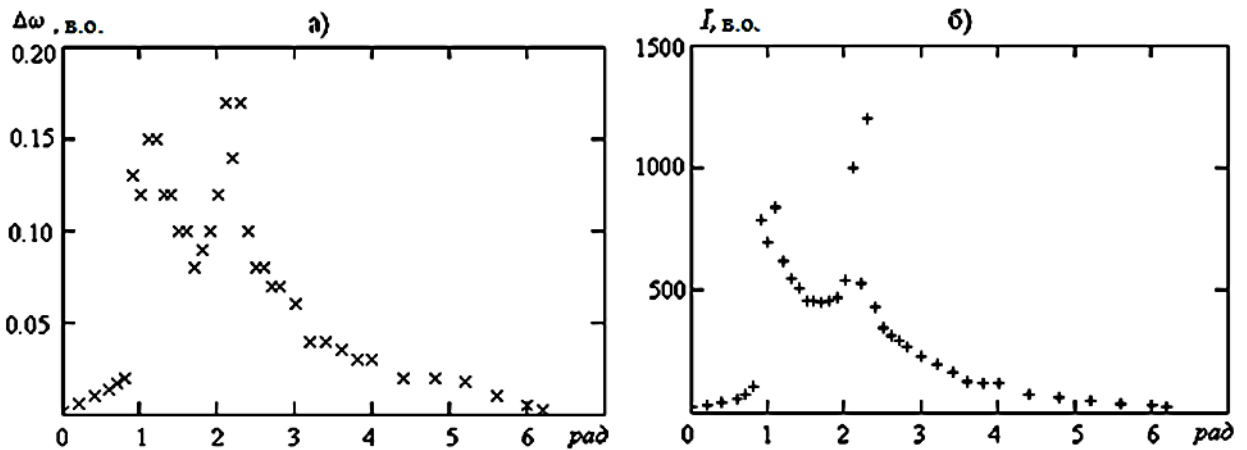


Рис. 7.12. Показники процесу включення синхронних дизель-генераторів на паралельну роботу

На рис.7.13 приведені порівняння провалу частоти обертання для синхронних (а) і асинхронних (б) генераторних установок в залежності від різниці фаз.

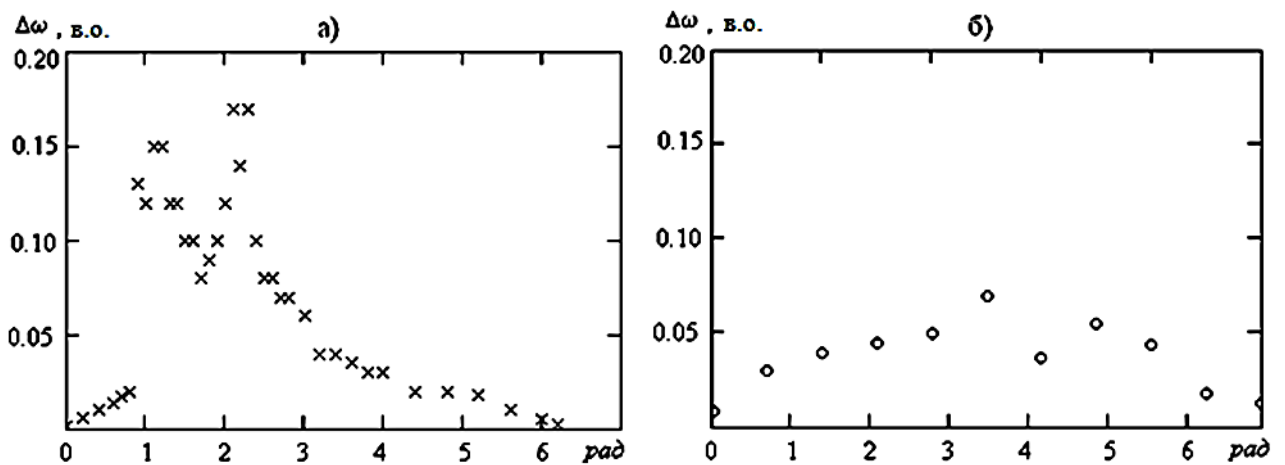


Рис. 7.13. Порівняння показників процесу включення синхронних і асинхронних (б) дизель-генераторів на паралельну роботу

На рис.7.14 наведені результати комп'ютерних досліджень процесів включення асинхронних дизель-генераторів на паралельну роботу при різних різницях фаз та однакових частотах обертання.

Порівняння показників процесів включення синхронних (рис. 7.11) і асинхронних (рис. 7.14) дизель-генераторів на паралельну роботу показує, що

динамічний момент синхронізації M_d має принципово різний характер. Для асинхронних генераторів у гіршому випадку він близький до пускового моменту асинхронної машини, становить 4 – 7 номінальних значень, але діє нетривалий час, менше 0,1 секунди. Динамічний момент синхронізації загасає за один період. Короткочасність моменту не призводить до значних провалів частоти обертання, як видно з рис. 7.13 максимальна частота динамічного відхилення частоти обертання не перевищує 7 %, що цілком припустимо.

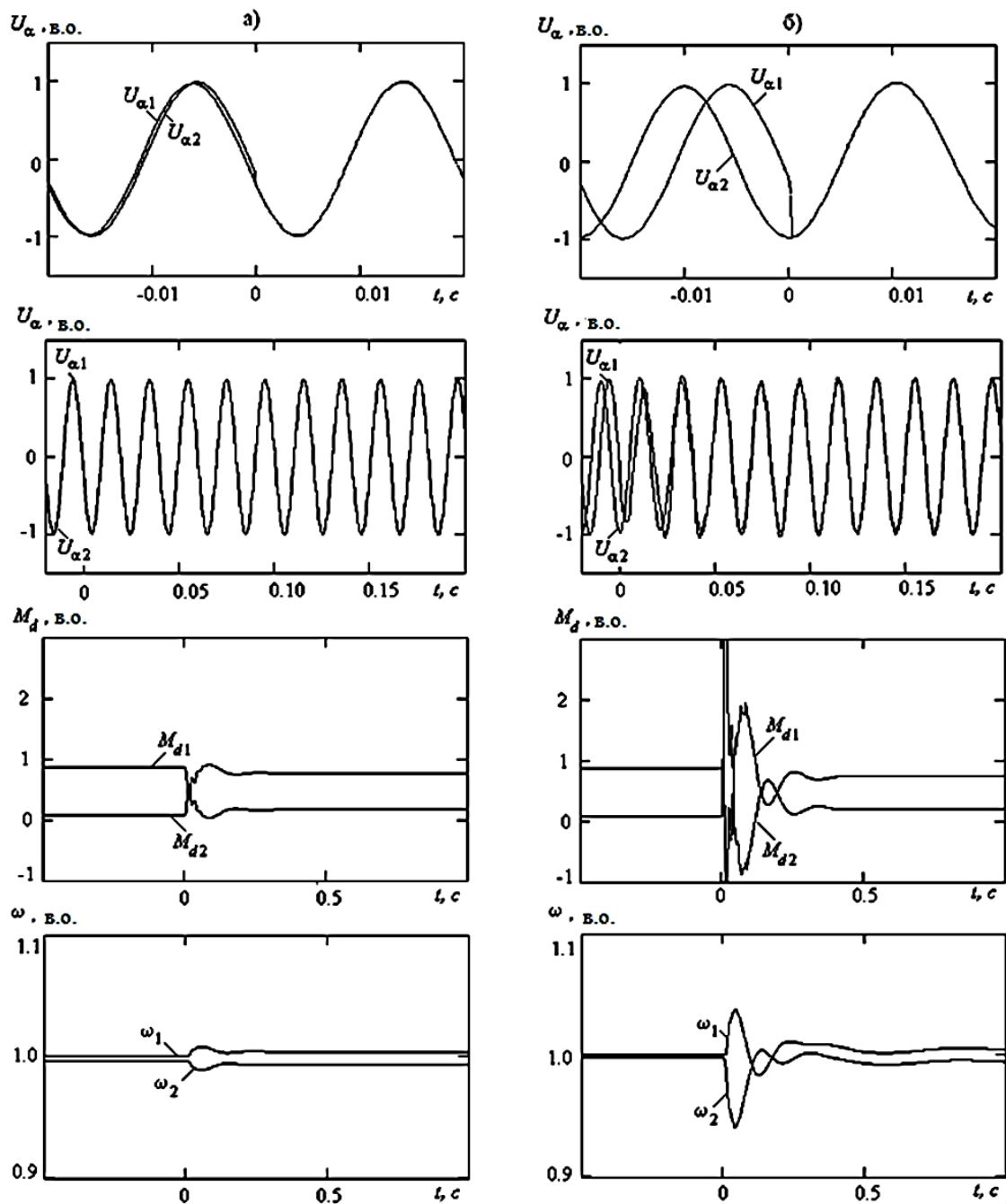


Рис. 7.14, а, б. Включення асинхронних дизельних генераторних установок на паралельну роботу

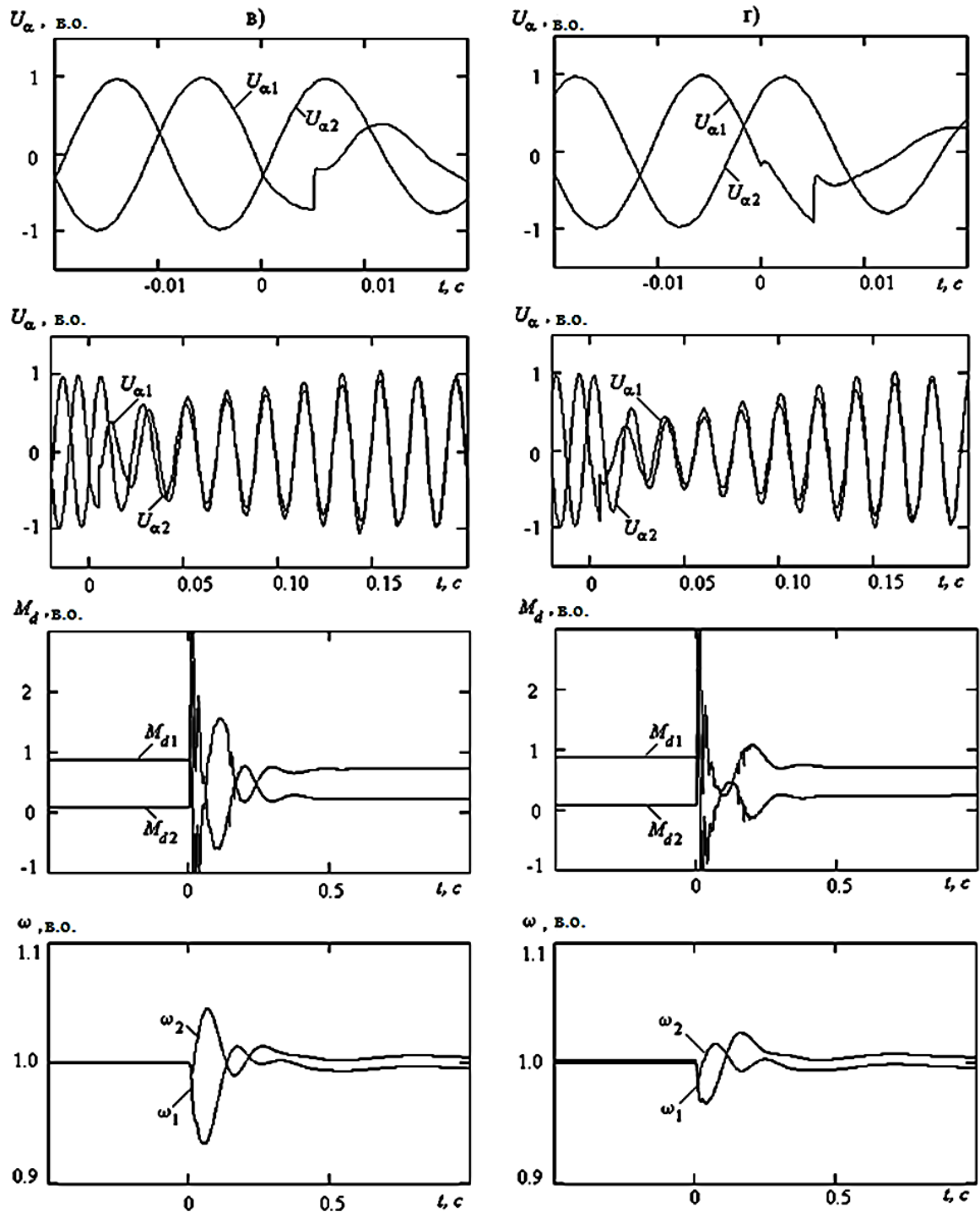


Рис. 7.14, в, г. Включення синхронних дизельних генераторних установок на паралельну роботу

При включенні синхронних генераторних установок на паралельну роботу існує область значень різниці фаз, при якій генератори випадають із синхронізму, при цьому різко зростає тривалість перехідного процесу та провал частоти

обертання, див. рис. 7.11, б і 7.11 а. Провал частоти обертання досягає 15-17 %, а час процесу синхронізації – 2...5 секунд.

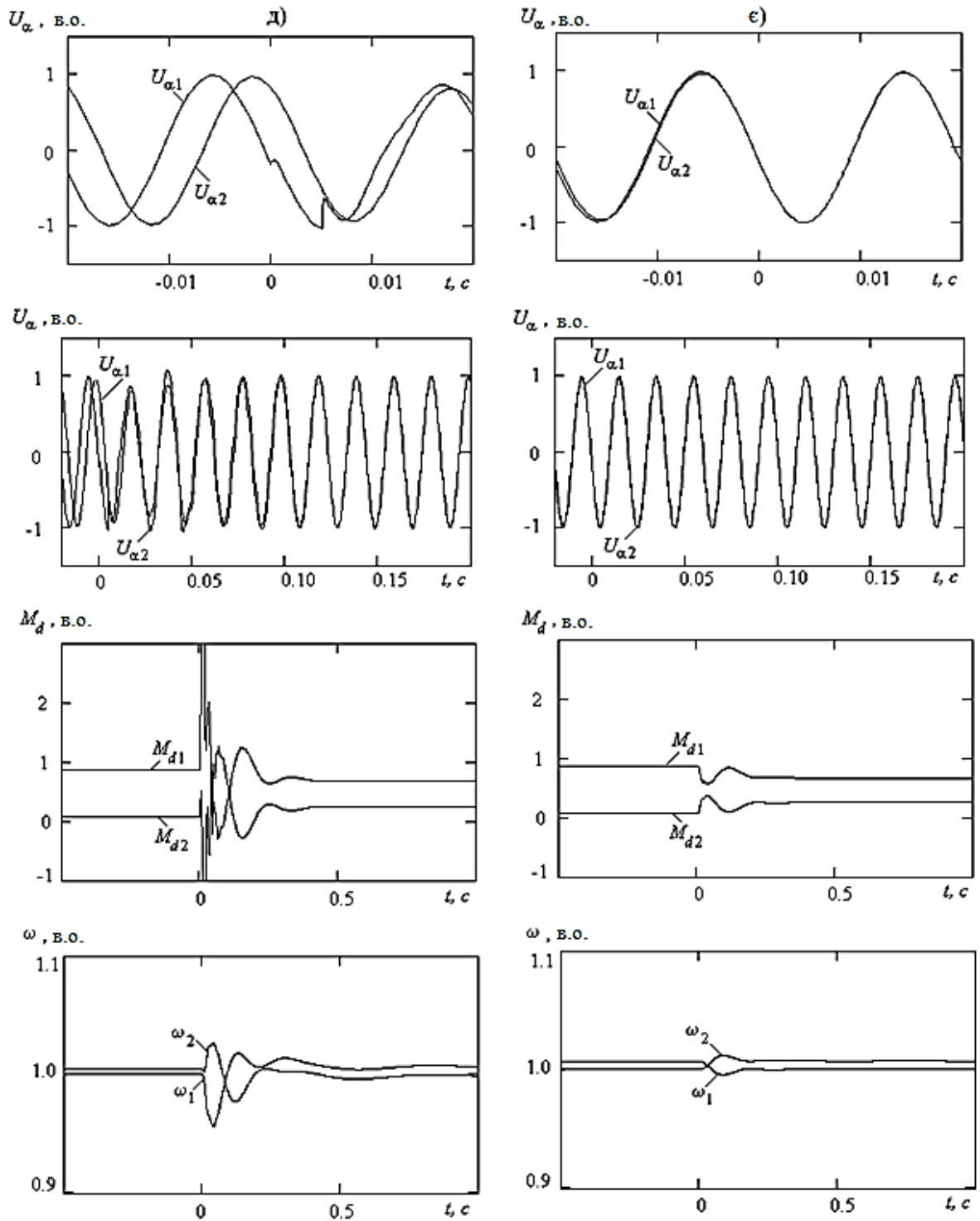


Рис. 7.14, д, е. Включення асинхронних дизельних генераторних установок на паралельну роботу

Далі проведено дослідження процесу синхронізації при однакових фазах, але різних частотах обертання генераторних установок. Відповідні перехідні процеси для синхронних та асинхронних дизель-генераторів наведені на рис. 7.15 та 7.16.

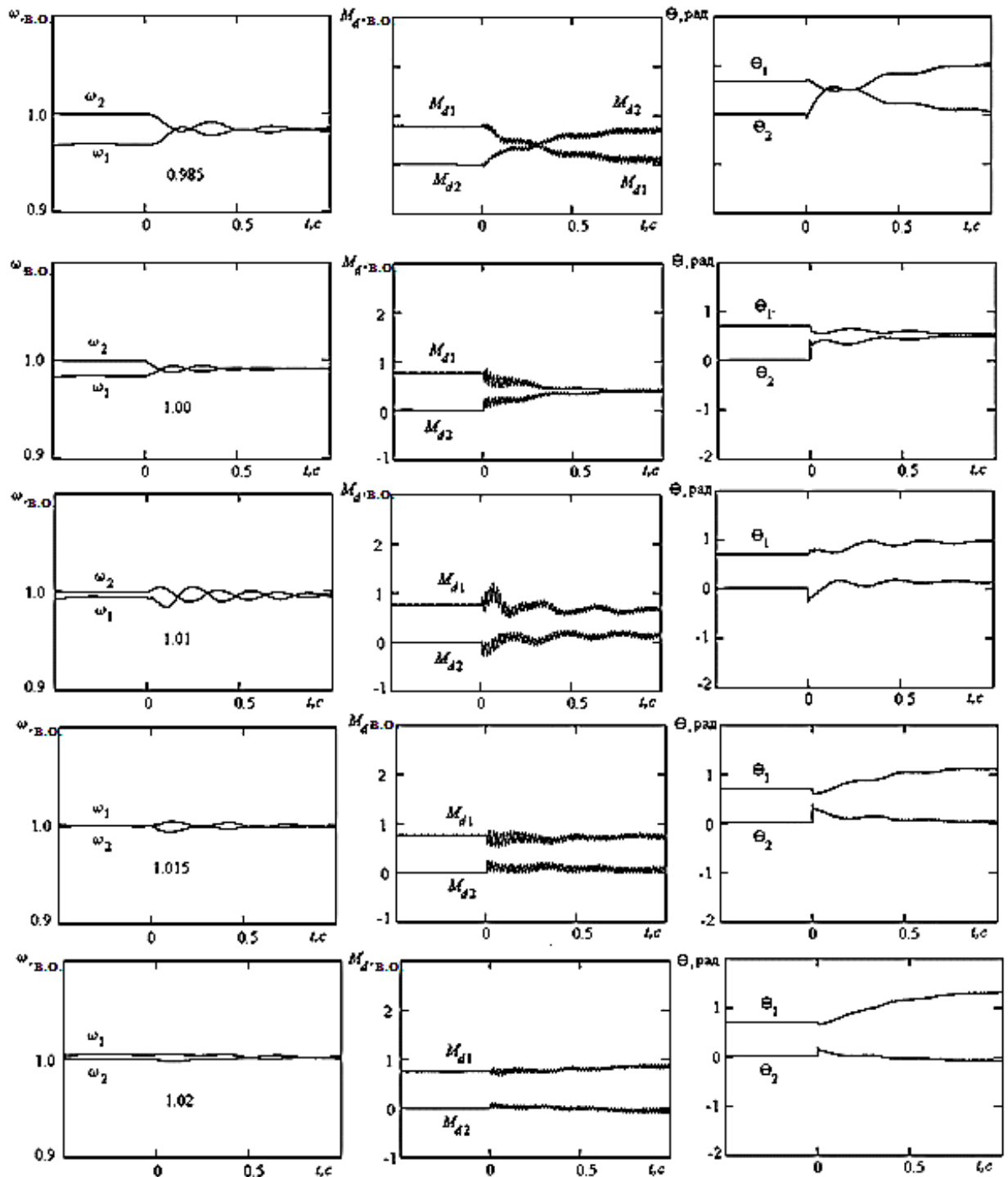


Рис. 7.15. Включення синхронних генераторних установок на паралельну роботу при різних частотах обертання

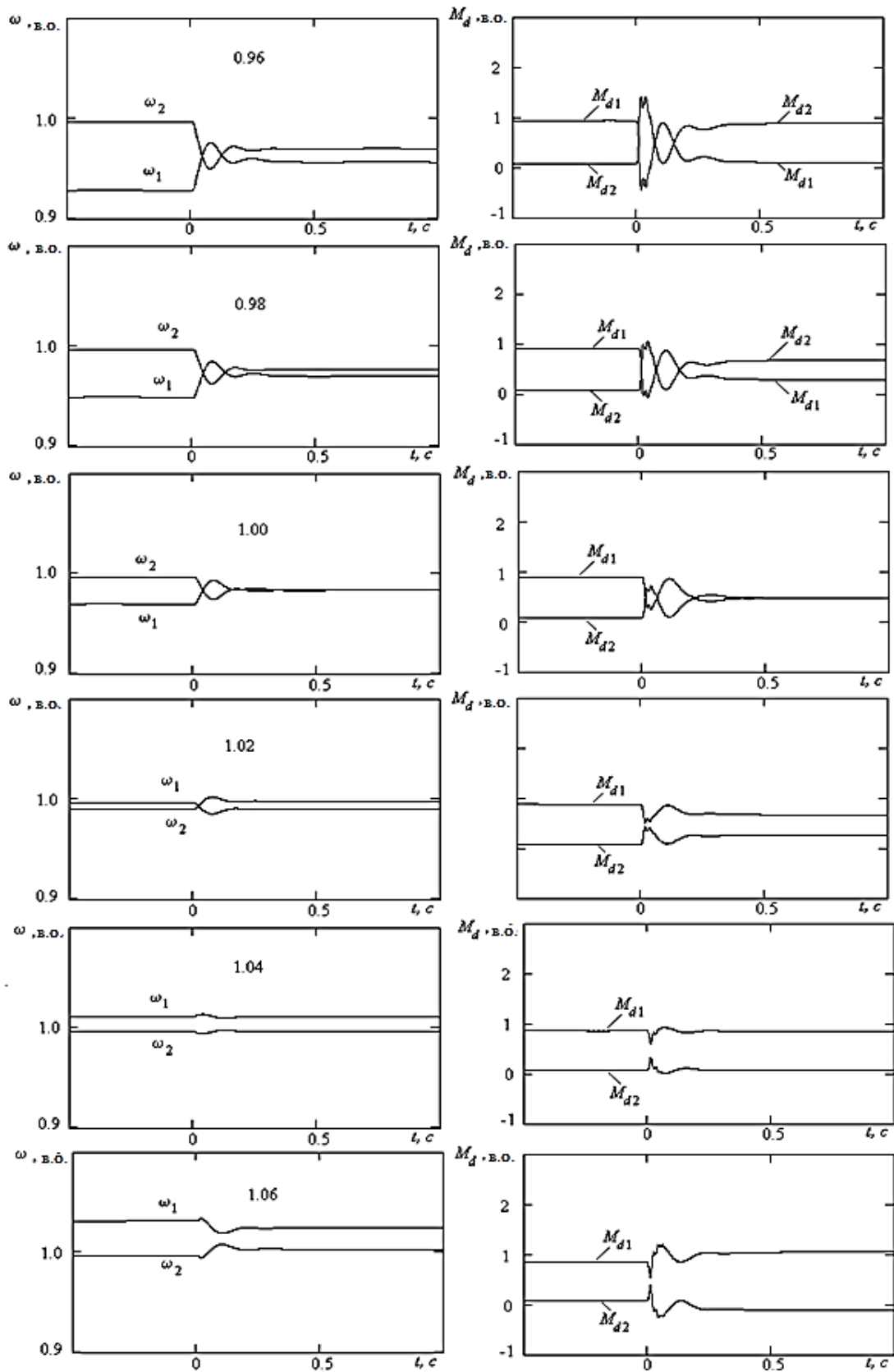


Рис. 7.16. Включения асинхронных генераторных установок на параллельную работу при різних частотах обертання

Порівняння процесів синхронізації генераторів за умовою однакових фаз та різних частотах обертання показує, що вони відбуваються ідентично, але з урахуванням ковзання асинхронних генераторів [46]. При однакових частотах генерованого струму розподіл навантаження між генераторами залишається незмінним, як і до включення. Коли однаковими являються уставки регуляторів частоти обертання приводних двигунів, то після включення на паралельну роботу розподіл навантаження встановиться пропорційним потужності генераторів, якщо нахили (статизм) навантажувальних характеристик однакові.

Якщо ж частота обертання навантаженого генератора в момент синхронізації менше частоти обертання підключеного генератора на величину статизма, то після включення на паралельну роботу таких генераторів навантаження приймає генератор, який підключається. Якщо різниця частот обертання більше статизма, то генераторна установка переходить в режим двигуна.

7.5 Висновки до розділу 7.

1. Аналіз перехідних процесів синхронної електроенергетичної установки при змінах навантаження показує, що вид, тривалість та перерегулювання перехідного процесу синхронного генератора, а також оптимальні налагоджувальні параметри регулятора напруги залежать від форсувальних обмежень на збудження.

2. Час відновлення напруги у синхронного генератора майже на порядок більше ніж у асинхронного генератора. Асинхронна генераторна установка з оптимальними налагоджувальними параметрами регулятора збудження робить її практично інваріантною до навантаження.

3. Аналіз перехідних процесів комутації навантаження та включення на паралельну роботу для синхронних і асинхронних дизельних генераторних установок підтверджує перевагу асинхронних генераторів по швидкодії каналу регулювання напруги при однакових характеристиках каналу регулювання частоти.

4. Застосування в суднових автономних електроенергетичних системах конденсаторних установок динамічної компенсації реактивної потужності навантаження відкриває можливості, по-перше, збільшення швидкодії каналу регулювання

напруги для синхронних генераторних установок шляхом регулювання реактивного струму статорного кола, по-друге, спрощує впровадження асинхронних генераторних установок, які, як показав порівняльний аналіз їхніх режимів роботи з традиційними синхронними генераторними установками, мають переваги (конструктивні, енергетичні, економічні розглянуті в параграфі 1.5) [46, 61, 142, 226], та завдяки яким можуть бути в майбутньому основними джерелами електроенергії на судні.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-прикладну проблему динамічної компенсації реактивної потужності в судновій автономній електроенергетичній системі на основі запропонованих підходів до аналізу та синтезу систем керування АЕЕС, до складу якої входять генераторні агрегати з синхронними і асинхронними генераторами, типове активно-індуктивне навантаження та конденсаторна установка компенсації реактивної потужності для підвищення швидкодії, стійкості та надійності таких систем завдяки розробленим законам функціонування регуляторів та їх апаратній реалізації.

Розроблені концептуальні засади проектування, модернізації та експлуатації суднових електроенергетичних систем з установками динамічної компенсації реактивної потужності для підвищення енергоефективності експлуатації морських суден, зниження енергоспоживання, які спрямовані на зниження викидів вуглекислого газу в атмосферу об'єктами морського транспорту.

В результаті виконаної роботи по темі дисертації отримані наступні результати.

1. Обґрунтована необхідність динамічної компенсації реактивної потужності для автономної суднової електроенергетичної системи з огляду на швидкодіючі електромагнітні перехідні процеси при комутації активно-індуктивного навантаження та електроприводів співвимірної потужності, а також на швидкодіючі механічні процеси в енергетичних установках.

2. Обґрунтована доцільність компонування суднових автономних електроенергетичних систем додатковою установкою компенсації реактивної потужності для підвищення в цілому енергоефективності експлуатації морських суден і зниження енергоспоживання, що спрямовані на зниження викидів вуглекислого газу в атмосферу об'єктами морського транспорту завдяки зниженні встановленої потужності генеруючих установок на стадії їх проектування та побудови нових об'єктів морського транспорту, при модернізації суден під час встановлення додаткового електрообладнання при незмінній потужності генераторних агрегатів та

оптимальному завантаженні суднової електростанції в експлуатаційних режимах роботи, включаючи живлення від стаціонарної (берегової) енергосистеми.

3. У мережах з допустимими нелінійними спотвореннями (для суднових мереж до 10 %) найбільш перспективною є конденсаторна компенсація реактивної потужності шляхом комутації секцій конденсаторів за допомогою тиристорних ключів. При цьому динамічна компенсація реактивної потужності навантаження дозволяє істотно поліпшити перехідні процеси при комутації змішаного навантаження та пусках електроприводів співвимірної потужності. Так, час відхилення напруги вдається зменшити до двох-трьох періодів змінного струму при комутації навантаження.

4. Пошук законів керування реактивним струмом в автономній енергетичній установці, що містить генератори та конденсаторні блоки, повинен проводитися з урахуванням їх взаємного впливу і взаємодії. Робота регулятора збудження генератора й регулятора реактивного струму навантаження повинна бути узгодженою та може бути реалізована на одному керуючому контролері.

5. Основними методами дисертації являються комп'ютерне моделювання та фізичне дослідження процесів на експериментальних установках, в суднових електростанціях і на натурних тренажерах. Результати випробувань дозволили удосконалити адекватні математичні моделі типових режимів роботи автономних генераторних установок з керуванням реактивної потужності, дозволили отримати нові науково-технічні рішення в керуванні реактивної потужності суднових електроагрегатів, а також створити тренажерний комплекс сучасної суднової електростанції.

6. На створеному в університеті тренажері судновий інженер отримує знання, що дозволяють йому ефективно реалізовувати необхідні функції управління судновою електроенергетичною системою, її технічної експлуатації, завдання діагностики та параметризації. Запропонована програма тренажерної підготовки повністю охоплює мінімальні компетенції, знання, розуміння та професіоналізм морського фахівця.

Найбільш підходящою регулюючою координатою для використання в системах динамічної компенсації реактивної потужності в суднових автономних

електроенергетичних системах являється *реактивна провідність навантаження*. Це справедливо як для статичного навантаження, так і при пуску електродвигунів співвимірної потужності. Для обробки інформації, необхідної для вимірювання, контролю та керування реактивної потужності в колах трифазного змінного струму у функції реактивної провідності навантаження пропонується розроблений давач реактивної провідності навантаження суднової електромережі.

7. Як показали дослідження систем керування синхронної генераторної установки з компенсацією реактивної потужності, радикальним способом поліпшення динамічних властивостей системи являється введення додаткового зворотного зв'язку між регулятором напруги та компенсатором реактивної потужності. Крім координати реактивної потужності для керування величиною компенсуючої ємності пропонується додатково використовувати інформацію про відхилення напруги синхронного генератора. Порівнюючи динамічні властивості синхронної генераторної установки з компенсацією реактивної потужності, можна рекомендувати UI – закон керування як оптимальний.

8. Аналіз та порівняння процесів імпульсної зміни керуючої ємності з різними періодами дискретизації, починаючи від половини періоду до десяти періодів змінного струму, показує, що найбільш ефективною системою являється УКРП із зміною ємності один раз впродовж періоду мережі. Коливання в системі стабілізації напруги генератора виявляються не гірше, ніж в неперервній системі, а час повної компенсації реактивної потужності становить не більше 0.4 с.

9. Порівняння процесів у системі з дискретними UI – і UII – законами показує зовсім невелику перевагу більш складного закону. Тому використання пропорційної складової регулюючої координати реактивної потужності на додаток до інтегральної складової являється невиправданим. Якщо використовувати тільки пропорційний компенсатор, то задовільних процесів отримати не вдається. Компенсація коефіцієнта потужності до величини, близької до одиниці вимагає великого коефіцієнта підсилення k_q при якому система стабілізації напруги практично втрачає стійкість. Найкращою структурою являється система компенсації з імпульсним UI – регулятором реактивної потужності.

10. Максимальна величина пускового струму асинхронного двигуна при повній компенсації реактивної потужності може бути знижена вдвічі. Застосування аналогових компенсуючих пристроїв дозволяє вирішити задачу компенсації реактивної потужності під час пуску асинхронного двигуна від автономної генераторної установки співвимірної потужності. Використання пропорційного закону регулювання дозволяє в $K_{\Pi} + 1$ разів зменшити реактивну провідність мережі у квазістатичному режимі.

11. Порівняння типових лінійно-імпульсних законів регулювання реактивної провідності електродвигуна, який запускається від дизель-генератора співвимірної потужності показує, що найкращі процеси компенсації досягаються при використанні інтегрального закону регулювання.

12. Характер динамічних процесів у імпульсній системі компенсації істотно залежить від зміщення моменту пуску двигуна відносно моменту комутації конденсаторів. Найбільше динамічне відхилення і мінімальний час регулювання виникає при зсуві моменту пуску відносно моменту комутації на півперіоду змінного струму. При виборі сталої інтегрування інтегрального компенсатора такою, що дорівнює періоду комутації та періоду мережі $T_1 = T_0 = T_s$ процеси регулювання закінчуються за 1...4 періоди мережі.

13. Отриманий аналітичний опис дискретних процесів компенсації реактивної потужності дозволяє проводити розрахунки систем з різними типовими законами, вибирати оптимальні налагоджувальні параметри імпульсних регуляторів реактивної потужності. Порівняння перехідних процесів компенсації реактивної провідності при пуску електродвигуна, отриманих на повній моделі і розрахованих аналітично практично збігаються.

14. Передавальна функція напруги асинхронного генератора за збудженням та навантаженням може бути представлена трьома складовими:

$$W_{ug} = W_g + W_{\sigma} + W_L = \frac{k_b}{T_g p + 1} + \frac{k_{\sigma}}{T_{\sigma}^2 p^2 + 2\alpha_{\sigma} T_{\sigma} p + 1} + \frac{k_L}{T_L p + 1}$$

Процеси збудження і розсіювання непорівнянні за часом, тому передатні функції W_σ і W_L в сумі з W_g можуть розглядатися як пропорційні ланки з коефіцієнтами k_σ та k_L . Знайдені аналітичні вирази коефіцієнтів передачі по каналах збудження, частоти обертання і навантаження, а також сталої часу збудження.

Чисельні значення коефіцієнтів передачі та сталої часу при експериментальному дослідженні та при моделюванні практично збігаються з результатами, отриманими аналітично. Похибка не перевищує 5%.

Описані динамічні властивості асинхронного генератора мають враховуватися при побудові систем керування напруги асинхронних генераторних установок, а також при дослідженні суднових електроенергетичних систем до складу яких, крім асинхронних генераторів, входять синхронні генератори та конденсаторні компенсатори реактивної потужності.

15. Оптимізація структури та налагоджувальних параметрів регулятора напруги асинхронного генератора по швидкодії, яка проведена аналітично та шляхом моделювання перехідних процесів підтверджує, що найкращим для асинхронного генератора являється імпульсний інтегральний регулятор. Пропорційний імпульсний регулятор асинхронного генератора не забезпечує необхідної точності стабілізації напруги, а при збільшенні коефіцієнта підсилення призводить до коливальності, а потім до нестійкості системи. Використання диференційної складової для асинхронних генераторів недоцільно. Введення Д-складової робить її більш коливальною.

16. Запропонована методика, що використана для побудови перехідних процесів в системі керування напругою асинхронного генератора з імпульсними регуляторами може бути застосована і для систем динамічної конденсаторної компенсації реактивної потужності.

17. Аналіз перехідних процесів комутації навантаження та включення на паралельну роботу для синхронних і асинхронних дизельних електроустановок підтверджує перевагу асинхронних генераторів по швидкодії каналу регулювання напруги при однакових характеристиках каналу регулювання частоти, що наряду з

конструктивними, енергетичними та економічними перевагами визначає як більш ефективну СЕЕС з асинхронними генераторними установками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Агунов А. В. Статический компенсатор неактивных составляющих мощности с полной компенсацией гармонических составляющих тока нагрузки / А.В. Агунов. // Электротехника. – 2003. – №2. – С. 47-50.
2. Агунов М. В. Новый подход к измерению электрической мощности / М. В. Агунов, А. В. Агунов, Н. М. Вербова. // Промышленная энергетика. – 2004. – №2. – С. 30-33.
3. Аллаев К. Р. К совместной работе синхронных и асинхронных генераторов в электрической системе / К. Р. Аллаев. // Изв. АН УзССР. Серия техн.наук. – 1976. – №3. – С. 24-27.
4. Аллаев К. Р. Несимметричные короткие замыкания в синхронном и асинхронном генераторах / К. Р. Аллаев, С. Ж. Хайдаров. // Изв. АН УзССР. Серия техн.наук. – 1983. – №1. – С. 18-23.
5. Алюшин Г. Н. Асинхронные генераторы повышенной частоты. Основы теории и проектирования / Г. Н. Алюшин, Н. Д. Торопцев. – Москва: Машиностроение, 1974. – 352 с.
6. Арион В. Д. Применение динамического программирования к задачам электроэнергетики / В. Д. Арион, В. Г. Журавлев. – Кишинев: Штиинца, 1981. – 134 с.
7. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / Под ред. А. Э. Кравчика и др. – Москва: Энергоиздат, 1982. – 503 с.
8. Балагуров В. А. Построение внешних характеристик асинхронного генератора / В. А. Балагуров, А. А. Кецарис. // Электротехника. – 1974. – №2. – С. 24–26.
9. Балагуров В. А. Расчет внешних характеристик асинхронного генератора с регулированием напряжения посредством подмагничивания спинки статора / В. А. Балагуров, А. А. Кецарис, В. В. Лохнин. // Электротехника. – 1974. – №5. – С. 15-16.
10. Баранов А. П. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы: Учебник для вузов. 2-е изд, перераб. и доп. / А. П. Баранов. – Санкт Петербург: Судостроение, 2005. – 528 с.

11. Баринов В. А. Режимы энергосистем: Методы анализа и управления / В. А. Баринов, С. А. Савалов. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 440 с.
12. Баркан Я. Д. Автоматизация регулирования напряжения в распределительных сетях / Я. Д. Баркан. – Москва: Энергия, 1971. – 232 с.
13. Баркан Я. Д. Автоматическое управление режимом батарей конденсаторов / Я. Д. Баркан. – Москва: Энергия, 1978. – 112 с.
14. Белоусов В. Н. Пути экономии энергоресурсов в народном хозяйстве / В. Н. Белоусов, Ю. В. Копылов. – Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.
15. Беляев В. Н. Рабочие режимы судовых вспомогательных энергетических установок с асинхронными дизель-генераторами: дис. канд. техн. наук : 05.08.05 / Беляев В. Н. – Одесса, 1990. – 148 с.
16. Берковский А. М. Мощные конденсаторные батареи / А. М. Берковский, Ю. И. Лысков. – Москва: Энергия, 1967. – 168 с.
17. Бертинов А. И. Авиационные генераторы / А. И. Бертинов. – Москва: Оборониздат, 1959. – 593 с.
18. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – Москва: Высшая школа, 1984. – 637 с.
19. Богаенко И. Н. Регулируемые компенсирующие устройства реактивной мощности / И. Н. Богаенко. – Киев: Техніка, 1992. – 137 с.
20. Болотин Б. И. Инженерные методы расчетов устойчивости судовых автоматизированных электростанций / Б. И. Болотин, В. Л. Вайнер. – Ленинград: Судостроение, 1974. – 332 с.
21. Бородулин Б. М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог / Б. М. Бородулин, Л. А. Герман, Г. А. Николаев. – Москва: Транспорт, 1983. – 184 с.
22. Бохян С. К. Внезапное короткое замыкание самовозбуждающегося индукционного генератора / С. К. Бохян. // Труды ВНИИКЕЕ. – Ереван. – 1971. – №4. – С. 54-60.

23. Бояр-Созонович С. П. Автономный асинхронный генератор с цифровым регулятором напряжения / С. П. Бояр-Созонович, Л. В. Вишневецкий. // Изв. АН СССР Энергетика и транспорт. – 1988. – №5. – С. 156-161.
24. Бояр-Созонович С. П. Расчет варикондного звена в цепи возбуждения самовозбуждающегося асинхронного генератора / С. П. Бояр-Созонович, В. В. Волошин. // Энергетика. – 1982. – №2. – С. 31-36.
25. Бурбело М. Й. Компенсація реактивної потужності асинхронних двигунів в різкозмінних режимах навантаження / М. Й. Бурбело. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – №1. – С. 65-68.
26. Бурбело М. Й. Динамічна компенсація реактивної потужності в пускових режимах електроприводів / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 104 с. – (ISBN 978-966-641-368-3).
27. Бушер В. В. Метод демпфирования колебаний груза с динамической коррекцией длины подвеса для контейнерных перегружателей [Электронный ресурс]/В. В. Бушер, Н. И. Муха, А. И. Шестака // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Энергосберегающие технологии. – науч. журнал. – 2015. – С. 58-63.
Режим доступа к ресурсу: journals.uran.ua/eejet/article/download/43405/41485.
28. Важнов Д. И. Переходные процессы в машинах переменного тока / Д. И. Важнов. – Ленинград: Энергия, 1980. – 256 с.
29. Веников В.А. Статические источники реактивной мощности / В. А. Веников, Л. А. Жуков, И. И. Карташев, Ю. П. Рыжов. – Москва: Энергия, 1975. – 136 с.
30. Вербицкая Т. Н. Электрические свойства сегнетокерамики и варикондов и их применение / Т. Н. Вербицкая. // Электричество. – 1960. – №8. – С. 16-18.
31. Веретенник А. М. Автоколебательные процессы в системе стабилизации частоты судового дизель-генератора / А. М. Веретенник. // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – Одесса: ОНМА. – 2005. – №12. – С. 30-36.
32. Веретенник А. М. Моделирование процессов стабилизации напряжения синхронного генератора в режиме компенсации реактивной мощности / А. М. Веретенник. // Киев: Техніка. – 2003. – Вип. 61. – С. 29-32.

33. Веретенник А. М. Расчет автоколебаний в системе регулирования частоты вращения синхронного дизель-генератора / А. М. Веретенник. // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – Одесса: ОНМА. – 2004. – №10. – С. 90-95.
34. Вишневский Л. В. Анализ качества дискретных законов управления напряжением генераторных установок / Л. В. Вишневский. // Киев: Техніка. – 2000. – №55. – С. 46-52.
35. Вишневский Л. В. Теория, методы расчета систем управления и рабочие режимы судовых электроустановок с асинхронными генераторами: дис. докт. техн. наук: 05.09.03 / Вишневский Л. В. – Санкт Петербург, 1991. – 400 с.
36. Вишневский Л. В. Допустимые нелинейности регуляторов частоты вращения судовых дизель-генераторов / Л. В. Вишневский, А. М. Веретенник. // Автоматизация судовых технических средств. - Одесса: ОНМА. – 2005. – №10. – С. 11-17.
37. Вишневский Л. В. Моделирование генераторов переменного тока с различными типами роторов / Л. В. Вишневский, А. М. Веретенник. // Киев: Техніка. – 2001. – №57. – С. 50-54.
38. Вишневский Л. В. Оптимизация регулятора возбуждения автономного синхронного генератора / Л. В. Вишневский, А. М. Веретенник. // Киев: Техніка. – 2003. – №60. – С. 22-27.
39. Вишневский Л. В. Расчет параметров автоколебаний в системе стабилизации частоты судового генератора / Л. В. Вишневский, А. М. Веретенник. // Киев: Техніка. – 2005. – №64. – С. 28-32.
40. Вишневский Л. В. Энергетические показатели многопоточных валогенераторов переменной частоты вращения / Л. В. Вишневский, А. М. Веретенник. // Киев: Техніка. – 2005. – №65. – С. 34-38.
41. Вишневский Л. В. Выбор критерия для оценки процесса включения генераторов на параллельную работу / Л. В. Вишневский, А. М. Веретенник, И. Е. Войтецкий. // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – Херсон. – 2007. – №2. – С. 136-139.

42. Включение синхронных генераторов в многоагрегатную судовую электростанцию / Л. В. Вишневский, А. М. Веретенник, И. Е. Войтецкий, И. П. Козырев. // *Электромашинобудування та електрообладнання*. – Киев: Техніка. – 2007. – №68. – С. 26-29.
43. Вишневский Л. В. Влияние нелинейностей дискретных регуляторов на динамические свойства импульсных систем управления / Л. В. Вишневский, А. М. Веретенник, Н. И. Муха. // *Труды Одесского политехнического университета*. – Одесса. – 2002. – №2(18). – С. 155-158.
44. Вишневский Л. В. Компьютерная оптимизация цифрового регулятора напряжения судовой электроустановки / Л. В. Вишневский, А. М. Веретенник, Н. И. Муха. // *Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб.* – Одесса: ОГМА. – 2003. – №8. – С. 79-85.
45. Вишневский Л. В. Критерии оптимальности настроек цифровых регуляторов возбуждения генераторных электроустановок / Л. В. Вишневский, А. М. Веретенник, Н. И. Муха. // *Электромашинобудування та електрообладнання*. – Киев: Техніка. – 2002. – №59. – С. 50-55.
46. Вишневский Л. В. Моделирование включения синхронных генераторов в судовую сеть / Л. В. Вишневский, А. М. Веретенник, Н. И. Муха, И. П. Козырев. // *Электромашинобудування та електрообладнання*. – Киев: Техніка. – 2006. – №66. – С. 201-204.
47. Вишневский Л. В. Постоянные времени асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением / Л. В. Вишневский, Н. И. Муха. // *Электромашинобудування та електрообладнання*. – Киев: Техніка. – 1999. – №53. – С. 21-26.
48. Вишневский Л. В. Качество переходных процессов в импульсных системах стабилизации напряжения судовых дизель генераторов / Л. В. Вишневский, Н. И. Муха, А. М. Веретенник. // *Автоматизация судовых технических средств*. – Одесса: ОГМА. – 2002. – №7. – С. 13-18.
49. Вишневский Л. В. Компьютерное моделирование судовых вспомогательных электроустановок / Л. В. Вишневский, Н. И. Муха, А. М. Веретенник. // *Судовые энергетические установки*. – Одесса: ОГМА. – 2001. – №6. – С. 23-30.

50. Вишневский Л. В. Расчет напряжений в электроустановках с импульсными регуляторами / Л. В. Вишневский, Н. И. Муха, А. М. Веретенник. // Автоматизация судовых технических средств. - Одесса: ОГМА. – 2003. – №8. – С. 8-15.
51. Вишневский Л. В. Способы реализации дискретных регуляторов на электронных элементах / Л. В. Вишневский, Н. И. Муха, А. М. Веретенник. // Судовождение. - Одесса: ОГМА. – 2002. – №5. – С. 25-29.
52. Вишневский Л. В. Управление напряжением автономных асинхронных генераторных установок. – Монография / Л. В. Вишневский, Н. И. Муха, Минь Куан Дао. – Одесса: НУ «ОМА». ISBN: 978-966-7591-71-7, 2016. – 196 с. – (Национальный университет "Одесская морская академия").
53. Вишневский Л. В. Управление судовыми конденсаторными установками компенсации реактивной энергии / Л. В. Вишневский, Н. И. Муха, С. А. Дудко. // Електротехнічні та комп'ютерні системи: наук.-техн. сб. – Київ: Техніка. – 2011. – №3(79). – С. 330-333.
54. Вишневский Л. В. Пуск асинхронных электродвигателей с компенсацией реактивной мощности. – Монография / Л. В. Вишневский, Н. И. Муха, С. С. Павленко. – Одесса: НУ «ОМА». ISBN: 978-966-7591-67-0, 2016. – 161 с. – (Национальный университет "Одесская морская академия").
55. Патент на винахід UA112396 Україна, МПК (2006.01), G05F 1/70, H02J 3/18, H02J 3/38, H02P9/46. Спосіб управління автономною електроенергетичною системою / Вишневський Л.В., Муха М.Й., Тумольський О.П., Дудко С.А.; заявник і патентовласник автори патенту. – № а2015 09542; заявл. 05.10.2015; опубл. 25.08.2016, Бюл. №16. – 4с.
56. Патент на винахід UA 116656 Україна, МПК (2006.01), G05F 1/70, H02J 3/18, H02J 3/38, H02P 9/46. Спосіб управління автономною електроенергетичною системою та пристрій для його здійснення /Вишневський Л.В., Муха М.Й., Тумольський О.П., заявка № а 2015 11808 від 30.11.2015, опубл.25.04.2018, Бюл. № 8, книга 1.

57. Вишневский Л. В. Оптимальное управление напряжением асинхронного генератора / Л. В. Вишневский, И. А. Новосад. // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. - Одесса: ОГМА. – 1993. – №1. – С. 19-28.
58. Вишневский Л. В. Универсальная математическая модель генератора переменного тока / Л. В. Вишневский, В. П. Мироненко. // Изв.ВУЗ Электромеханика. – 1986. – №3. – С. 33-40.
59. Вишневский Л. В. Системы управления асинхронными генераторными комплексами / Л. В. Вишневский, А. Е. Пасс. – Киев - Одесса: Лыбидь, 1990. – 68 с.
60. Вишневский Л. В. Расчет динамики параллельно работающих дизель-генераторов: Программа ГосФАП. - № 50850000746 / Л. В. Вишневский. – Москва: Главный вычислительный центр Министерства Морского Флота, 1985. – 10 с.
61. Вишневский Л.В. Повышение технико-экономических показателей автономных электроустановок путем применения асинхронных генераторов [Текст] / Вишневский Л.В., Веретенник А.М., Муха Н.И. // Sciences of Europe (Global science center LP). – Praha (Czech republic), vol.2, No 5 (5), 2016. Technical science. – pp. 67-72.
<http://european-science.org/wp-content/uploads/2016/11/VOL-2-No-5-5-2016.pdf>.
62. Голубев В. К. Современные системы управления судовыми теплоэнергетическими комплексами / В. К. Голубев. – Москва: Мортехинформреклама, 1986. – 36 с.
63. Гордеев В. И. Оптимизация и регулирование электропотребления промышленных предприятий. Учебное пособие / В. И. Гордеев. – Новочеркасск: Новочеркасский политехнический институт, 1986. – 128 с.
64. ГОСТ 10032-80. Дизель-генераторы стационарные, передвижные, судовые вспомогательные. Технические требования к автоматизации. – Введ. 1982–01–01. – Москва: ИПК издательство стандартов, 1999. – 7 с.
65. ГОСТ 10511-83. Системы автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ) судовых, тепловозных и промышленных дизелей. Общие технические требования. – Введ. 1983–12–06. – Москва: ИПК издательство стандартов, 2004. – 14 с.

- 66.ГОСТ 11102-75. Приборы и устройства приемные и исполнительные дизельной автоматики. Типы, основные параметры и технические требования. – Введ. 1977–07–01. – Москва: ИПК издательство стандартов, 1975. – 6 с.
- 67.ГОСТ 11928-83. Системы аварийно-предупредительной сигнализации и защиты автоматизированных дизелей и газовых двигателей. Общие технические условия. – Введ. 1984–01–01. – Москва: ИПК издательство стандартов, 2004. – 11 с.
- 68.ГОСТ 14228-80. Дизели и газовые двигатели автоматизированные. Классификация по объему автоматизации. – Введ. 1982–01–01. – Москва: ИПК издательство стандартов, 1981. – 8 с.
- 69.ГОСТ 18174-83. Системы дистанционного автоматизированного управления главными судовыми дизелями. Общие технические требования. – Введ. 2010–04–19. – Москва: ИПК издательство стандартов, 1984. – 7 с.
70. Гительсон С. М. Оптимальные распределения конденсаторов на промышленных предприятиях / С. М. Гительсон. – Москва: Энергия, 1967. – 152 с.
71. Гудко Є. І. Про доцільність установлення конденсаторних батарей у промислових електричних мережах у сучасних економічних умовах / Є. І. Гудко, О. Д. Демов, Л. Б. Терешкевич. // *Енергетика и электрификация*. – 1997. – №2.
72. Гулевич А. И. Производство силовых конденсаторов / А. И. Гулевич, А. П. Киреев. – Москва: Высшая школа, 1969. – 440 с.
73. Дранкова А. О. Использование нейронных сетей прямого распространения для прогнозирования технического состояния судовых дизель-генераторов // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*, Збірник наукових праць. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу, Теорія і практика / А. О. Дранкова, Н. И. Муха. // Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №36. – С. 505-506.
74. Дранкова А. О. Лаборатория микроконтроллерного управления и моделирования электромеханических систем / А. О. Дранкова, Н. И. Муха, А. И. Шестака. // *Электротехнические и компьютерные системы*. Научно-технический журнал. – Київ: Техніка. – 2014. – №15(91). – С. 435-440.

75. Евдокунин Г. А. Исследование статической устойчивости режимов дальних линий электропередачи с управляющим шунтирующим реактором / Г. А. Евдокунин, А. А. Рогозин. // Электричество. – 1996. – №8.
76. Энергосбереження - пріоритетний напрямок державної політики України / Ковалко М.П., Денисюк С.П., Відпов. Ред. Шидловський А.К. – Київ: УЕЗ, 1998. – 506 с.
77. Ермилов А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А. А. Ермилов. – Москва: Энергия, 1969. – 304 с.
78. Ермуратский В. В. Конденсаторы переменного тока в тиристорных преобразователях / В. В. Ермуратский, В. П. Ермуратский. – Москва: Энергия, 1979. – 224 с.
79. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах / Ю. С. Железко. – Москва: Энергия, 1981. – 200 с.
80. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю. С. Железко. – Москва: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
81. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. – Москва: ЭНАС, 2009. – 456 с.
82. Заболотный И. П. Разработка минимальной сложности математической модели генератора для анализа длительных переходных процессов в энергосистемах / И. П. Заболотный, И. Диа. // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика. – Донецк: ДонГТУ. – 1998. – №2. – С. 181-188.
83. Замятин В. Я. Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры: Справочник / В. Я. Замятин, Б. В. Кондратьев, В. М. Петухов. – Москва: Радио и связь, 1987. – 576 с.
84. Зорин В. В. Системы электроснабжения общего назначения / В. В. Зорин, В. В. Тисленко. – Чернигов: ЧГТУ, 2005. – 341 с.
85. Зубков Ю. Д. Асинхронные генераторы с конденсаторным возбуждением / Ю. Д. Зубков. – Алма-Ата: Изд-во АН Каз.ССР, 1949. – 112 с.

86. Иванов А. А. Асинхронные генераторы для гидроэлектрических электростанций небольшой мощности / А. А. Иванов. – Москва - Ленинград: Госэнергоиздат, 1948. – 28 с.
87. Ильяшов В. П. Автоматическое регулирование мощности конденсаторных установок / В. П. Ильяшов. – Москва: Энергия, 1966. – 62 с.
88. Ильяшов В. П. Конденсаторные установки промышленных предприятий / В. П. Ильяшов. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 156 с.
89. Инструктивные материалы Главгосэнергонадзора – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 400 с.
90. Инструкция по автоматическому регулятору конденсаторной установки типа ВАКО – Рига: Рижский опытный завод Латвглавэнерго, 1973. – 24 с.
91. Кадеев Г. Д. Дифференциальные уравнения асинхронной машины, учитывающие нелинейность магнитной цепи / Г. Д. Кадеев. // Изв. ВУЗ Электромеханика. – 1971. – №1. – С. 19-22.
92. Казовский Е. Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока / Е. Я. Казовский. – Москва - Ленинград: Госэнергоиздат, 1958. – 400 с.
93. Кицис С.И. Исследование регулировочных свойств асинхронного генератора / Кицис С.И.. // Электричество. – 1980. – №2. – С. 36-41.
94. Кицис С.И. К исследованию процессов установления при самовозбуждении асинхронных машин / Кицис С.И.. // Изв. АН СССР Энергетика и транспорт. – 1971. – №4. – С. 147-153.
95. Кицис С.И. Переходные процессы в асинхронном самовозбуждающемся генераторе при внезапном трехфазном коротком замыкании / Кицис С.И.. // Электричество. – 1980. – №10. – С. 23-29.
96. Ковач К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац. – Москва - Ленинград: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
97. Константинов Б. А. Компенсация реактивной мощности / Б. А. Константинов, Г. З. Зайцев. – Ленинград: Энергия, 1976. – 104 с.
98. Константинов В. П. Синхронизация судовых синхронных генераторов / В. П. Константинов. – Ленинград: Судостроение, 1978. – 216 с.

99. Костенко М. П. Электрические машины / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. – Москва - Ленинград: Энергия, 1965. – 704 с.
100. Костырев М. Л. Уравнения асинхронного вентильного стартер-генератора / М. Л. Костырев, А. И. Скороспешкин. // Изв.АН СССР Энергетика и транспорт. – 1975. – №3. – С. 36-45.
101. Костырев М. Л. Уравнения и параметры многообмоточного асинхронного вентильного генератора с короткозамкнутым ротором / М. Л. Костырев. // Электричество. – 1979. – №4. – С. 25-29.
102. Копылов И. П. Применение вычислительных машин в инженерных и экономических расчетах / И. П. Копылов. – Москва: Высшая школа, 1980. – 256 с.
103. Кочкин В. П. Реактивная мощность в электросетях. Технологии управляемой компенсации / В. П. Кочкин. // Новости электротехники. – 2007. – №3. – С. 34-44.
104. Красик В. В. Автоматические устройства компенсации реактивной мощности в электросетях предприятий / В. В. Красик. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.
105. Красношапка М. М. Генераторы переменного тока стабильной и регулируемой частоты / М. М. Красношапка. – Киев: Техника, 1974. – 168 с.
106. Крутов В. И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания / В. И. Крутов. – Москва: Машгиз, 1963. – 623 с.
107. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления / Б. Куо. – Москва: Машиностроение, 1980. – 448 с.
108. Кухта О. К вопросу об эффективности компенсации реактивной мощности / О. Кухта, Е. Симонова. // Энергетическая политика Украины. – 2004. – №9. – С. 90-93.
109. Кюрегян С. Г. Расчет характеристик автономного асинхронного генератора / С. Г. Кюрегян, А. М. Ткаченко. // Электротехника. – 1966. – №11. – С. 20-22.
110. Лайон В. Анализ переходных процессов в электрических машинах переменного тока методом симметричных составляющих / В. Лайон. – Москва: Госэнергоиздат, 1958. – 400 с.

111. Лищенко А. И. Асинхронные машины с массивным ферромагнитным ротором / А. И. Лищенко, В. А. Лесник. – Киев: Наукова думка, 1984. – 168 с.
112. Лищенко А. И. Математическая модель и алгоритм расчета режимов асинхронного стартер-генератора с транзисторным преобразователем / А. И. Лищенко, В. А. Лесник, Л. И. Мазуренко. // Техническая электродинамика. – 1989. – №5. – С. 55-61.
113. Лищенко А. И. . Дифференциальные уравнения и расчет переходных процессов асинхронного генератора с учетом насыщения / А. И. Лищенко, В. А. Лесник, А. П. Фаренюк. // Техническая электродинамика. – 1984. – №1. – С. 56-65.
114. Лищенко А. И. Математическая модель автономной электроустановки с асинхронным генератором и регулируемой системой возбуждения / А. И. Лищенко, В. А. Лесник, А. П. Фаренюк. // Техническая электродинамика. – 1989. – №6. – С. 81-88.
115. Маркушевич Н. С. Регулирование напряжения и экономия электроэнергии / Н. С. Маркушевич. – Москва: Энергоатомиздат, 1984. – 104 с.
116. Мелешкин Г. А. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах / Г. А. Мелешкин. – Санкт Петербург: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2005. – 376 с.
117. Мелешкин Г. А. Генераторные установки отбора мощности на судах / Г. А. Мелешкин. – Ленинград: Судостроение, 1967. – 232 с.
118. Минин Г. П. Реактивная мощность. 2-е изд., перераб. / Г. П. Минин. – Москва: Энергия, 1978. – 88 с.
119. Миняйло О. С. Нелинейные искажения при работе автономного асинхронного генератора / О. С. Миняйло. // Вестник Львовского политехнического института. – 1979. – №133. – С. 43-51.
120. Мироненко В. П. Устойчивость параллельной работы асинхронных дизель-генераторов: дис. канд. техн. наук: 05.08.05 / Мироненко В. П. – Одесса, 1987. – 213 с.
121. Моніторинг, діагностика та управління процесами та обладнанням суднових енергетичних установок. Рукопис. Заключний звіт з НДР, Інв. № 0716U002367,

- ОНМА, керівник роботи Муха М.Й. – № ДР 0113U000637 – Одеса, 2015. – 178 с.
122. Муха Н. И. Управление реактивной мощностью автономных генераторных установок. Монография / Н. И. Муха, Л. В. Вишне夫斯基, С. А. Дудко. – Одесса: Национальный университет "Одесская морская академия", 2016. – 144 с. – (ISBN: 978-966-7591-68-7).
123. Муха Н. И. Диагностика дизель-генераторов автономных рефрижераторных установок / Н. И. Муха, О. В. Глазева, А. О. Дранкова. // Холодильна техніка і технологія: Науково-технічний журнал. Одеса: ОДАХ. – 2008. – №4. – С. 86-88.
124. Муха Н. И. О практической подготовке судовых электромехаников и механиков / Н. И. Муха, А. О. Дранкова. // Электротехнические и компьютерные системы. Научно-технический журнал. - Киев: Техника. – 2014. – №15 (91). – С. 416-422.
125. Муха Н. И. О технико-эксплуатационных требованиям к полномасштабному тренажеру судовой автоматизированной электроэнергетической системы. Материалы научно-технической конференции «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетике» / Н. И. Муха, А. О. Дранкова. // Севастополь: СевНТУ. – 2013. – С. 161-166.
126. Муха М.Й. Полномасштабный тренажер судовой автоматизированной электроэнергетической системы для подготовки и проверки компетентности морских инженеров/ Н. И. Муха, А. О. Дранкова. // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 60895 від 28.07.2015 р., заявка від 14.04.2015 № 60510. – 57 с.
127. Муха Н.И. Тренажер судовой автоматизированной электроэнергетической системы / [Н. И. Муха, А. О. Дранкова, В. Н. Волошин та ін.]. // Авиационно-космическая техника и технология: науч.-тех. журнал. – Харьков: ХАИ. – 2011. – №9 (86). – С. 207-211.
128. Муха Н.И. Тренажерная подготовка – важная часть практической подготовки судовых электромехаников и механиков /Н. И. Муха, А. О. Дранкова // Сучасні

- інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINNTT-2016) [Збірка матеріалів VIII Міжнародної науково-практичної конференції (24-26 травня 2016 р., м. Херсон)]. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2016. – С. 64-69.
129. Муха М.Й., Дранкова А.О. Тренажер суднової електроенергетичної системи // Патент на корисну модель UA99959 Україна, МПК (2015.01), G09B 09/00, заявка № u201501660 від 25.02.2015, опубл. 25.06.2015, Бюл. № 12. – 6 с.
130. Муха Н.И., Дранкова А.О. Тренажер судовой электроэнергетической системы // Международная заявка № PCT/UA2015/000093 от 02.10.2015.
131. Муха Н.И. Анализ алгоритмов управления судовыми установками компенсации реактивной энергии / Муха Н.И., Дудко С.А.//Науково-виробничий журнал «Електромеханічні і енергозберігаючі системи». – Кременчук: КНУ, 2011. – Вип. 3 (15). – С. 83-86.
132. Муха Н. И. Аналитическое определение коэффициентов передачи асинхронного дизель-генератора / Н. И. Муха, С. А. Дудко, М. К. Дао. // Одесса: Видавництво «Техніка». – 2010. – №76. – С. 94-97.
133. Муха Н. И. Реализация дискретно-импульсных законов управления компенсацией реактивной энергии в судовых электроустановках / Н. И. Муха, С. А. Дудко. // Вісник СевНТУ. Збірник наукових праць. Серія: Механіка, енергетика, екологія. - Севастополь: СевНТУ. – 2012. – №132. – С. 86-92.
134. Муха Н. И. Судовые системы отбора и передачи мощности / Н. И. Муха, С. А. Дудко. // «АВТОМАТИКА-2008» Доклады XV международной конференции по автоматическому управлению, 23-26 сентября 2008 г. Том4. - Одесса: ОНМА. – 2008. – С. 6-9.
135. Муха Н. И. Идентификация параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя на основе экспертных оценок / Н. И. Муха, А. И. Кувшинов, О. А. Онищенко. // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – Одесса: ОНМА. – 2007. – №12. – С. 78-85.
136. Муха Н. И. Информационный подход к мониторингу технического состояния судовых дизель-генераторных установок / Н. И. Муха, А. Р. Миська, А. О.

- Дранкова. // *Авиационно-космическая техника и технология: науч.-техн. журнал.* – Харьков: ХАИ. – 2010. – №8. – С. 136-139.
137. Муха Н. И. Динамические свойства системы стабилизации напряжения в режиме пуска асинхронного двигателя от судовой электростанции / Н. И. Муха, С. С. Павленко. // *Электротехнические и компьютерные системы: научно-техн. журнал.* – Киев «Техника». – 2013. – №9. – С. 50-56.
138. Муха Н. И. Дискретное управление конденсаторным компенсатором реактивной мощности в пусковых режимах мощных асинхронных двигателей / Н. И. Муха, С. С. Павленко. // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ», Збірник наукових праць. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика.* - Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №36. – С. 412-416.
139. Муха Н. И. Компенсация реактивной энергии в судовой электроэнергетической системе при пусках асинхронных двигателей / Н. И. Муха, С. С. Павленко, С. А. Дудко. // *Електромеханічні та енергозберігаючі системи: тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія й практика».* – Кременчук: КрНУ. – 2012. – №3. – С. 283-287.
140. Муха Н. И. Практическая подготовка судовых электромехаников на полномасштабном тренажерном комплексе / Н. И. Муха. // *Електромеханічні та енергозберігаючі системи: тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія й практика».* – Кременчук: КрНУ. – 2012. – №3. – С. 589-593.
141. Вишневикий Л.В. Согласованное управление автономной электроэнергетической установкой / Вишневикий Л.В., Тумольский А.П. – *Электротехнические и компьютерные системы.* – Киев: «Техника» - 2015, вып. № 19 (95). – С.150-153.
142. Муха Н.И. Перспективная компоновка судовых автономных электроэнергетических систем / Муха Н.И. – *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017, вип. 27 (1249). – С. 285-288.

143. Новиков А. В. Емкостное самовозбуждение асинхронного генератора / А. В. Новиков, С. Г. Кюрегян. // Изв. ВУЗ Электромеханика. – 1967. – №2. – С. 173-179.
144. О направлениях исследований в области компенсации реактивной мощности (дискуссия). // Электричество. – 1981. – №10. – С. 7–13, 61–76; 1983. – № 5. – С. 58-72.
145. О стимулировании повышения качества электроэнергии в действующих электрических сетях (дискуссия). // Промышленная энергетика. – 1984. – №1. – С. 48–57; № 2. – С. 47-56.
146. Паластин Л. М. Синхронные машины автономных источников питания / Л. М. Паластин. – Москва: Энергия, 1980. – 384 с.
147. Пасс А. Е. Анализ судовых биротативных валогенераторов / А. Е. Пасс, Л. В. Вишневский. // Кибернетика на морском транспорте. – 1981. – №10. – С. 76-84.
148. Пасс А. Е. Исследование динамики асинхронного самовозбуждающегося генератора вблизи установившегося состояния / А. Е. Пасс, Л. В. Вишневский. // Изв. ВУЗ Электромеханика. – 1980. – №6. – С. 591-596.
149. Пасс А. Е. Расчет коэффициентов передачи асинхронного самовозбуждающегося генератора / А. Е. Пасс, Л. В. Вишневский. // Электромашиностроение и электрооборудование. – Киев: Техника. – 1981. – №33. – С. 84-89.
150. Петухов М. В. Дослідження математичної моделі параметричного статичного компенсатора реактивної потужності [Електронний ресурс] / М. В. Петухов, А. В. Гадай, Ю. В. Грицюк // Lviv Polytechnic National University Institutional Repository <http://ena.lp.edu.ua>. – 2001. – Режим доступу до ресурсу: ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/35076/1/31_154-159.pdf.
151. Петухов М. В. Интегральные показатели энергетического процесса тиристорных компенсаторов реактивной мощности при их живлении від мережі обмеженої потужності / М. В. Петухов, Ю. В. Грицюк, А. В. Гадай. // Вісник Приазовського державного технічного університету. – Маріуполь: ПДТУ. – 2005. – С. 100-104.

152. Постников И. М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин / И. М. Постников. – Киев: Техника, 1966. – 415 с.
153. Постников И. М. Перспективные асинхронные турбогенераторы со статорным возбуждением / И. М. Постников, В. И. Постников, Л. Б. Остапчук. // Изв. АН СССР Энергетика и транспорт. – 1985. – №2. – С. 19-25.
154. Правила технической эксплуатации морских и речных судов // Нормативные документы морского транспорта Украины. – Том 2. – Одесса, 2000. – 405 с.
155. Радин В. И. Применение асинхронных генераторов как автономных источников переменного тока / В. И. Радин, В. А. Винокуров. // Электротехника. – 1967. – №8. – С. 17-20.
156. Разработка асинхронных генераторных комплексов для систем электроснабжения подвижных объектов 9П218 – Одесса: Отчет о НИР № 617 (ОВИМУ). - № ГР 81092587. – 1981. – 132 с; 1982. – 121 с.
157. Расчет потребности в конденсаторных установках для действующих промышленных предприятий / [Ю. С. Железко, А. В. Артемьев, А. П. Калюкин та ін.]. // Промышленная энергетика. – 1983. – №11. – С. 48-51.
158. Серийные средства измерения показателей качества электроэнергии / [А. К. Шидловский, С. Г. Таранов, В. В. Брайко та ін.]. // Промышленная энергетика. – 1983. – №8. – С. 19-21.
159. Сипайлов Г. Д. Математическое моделирование электрических машин (АВМ) / Г. Д. Сипайлов, Д. В. Лоос. – Москва: Высшая школа, 1980. – 176 с.
160. Справочник по теории автоматического управления/ Под ред. А.А. Красовского – Москва: Наука, 1987. – 712 с.
161. Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности / Под ред. Р.М. Матура – Москва: Энергоатомиздат, 1987. – 160 с.
162. Статические компенсаторы реактивной мощности в электрических системах – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 174 с.
163. Супронович Г. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок / Г. Супронович. – Москва: Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.

164. Супрун Г. Ф. Изменение напряжения самовозбуждающихся синхронных генераторов с демпферными контурами при включении активно-индуктивной нагрузки / Г. Ф. Супрун. // Электричество. – 1961. – №3. – С. 79-84.
165. Тамм Г. Ф. Основы теории электричества / Г. Ф. Тамм. – Москва: Наука, 1976. – 616 с.
166. Теория и методы расчета асинхронных турбогенераторов/ Под ред. И.М. Постникова – Киев: Наукова думка, 1977. – 176 с.
167. Торопцев Н. Д. Методы анализа режимов самовозбуждающихся асинхронных генераторов, работающих на общую сеть / Н. Д. Торопцев. // Труды КИИГА. - Вопросы авиационной электротехники. - Киев. – 1969. – №111. – С. 19-29.
168. Трещев И. И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока / И. И. Трещев. – Ленинград: Энергия, 1980. – 256 с.
169. Ту Ю. Т. Цифровые и импульсные системы автоматического управления / Ю. Т. Ту. – Москва: Машиностроение, 1964. – 703 с.
170. Цыпкин Я. З. Основы теории автоматических систем / Я. З. Цыпкин. – Москва: Наука, 1977. – 560 с.
171. Шидловский А. К. Контроль качества электроэнергии и требования к средствам измерения / А. К. Шидловский, И. П. Гринберг, Ю. С. Железко. // Электричество. – 1982. – №12. – С. 22-28.
172. Шидловский А. К. Частотно-регулируемые источники реактивной мощности / А. К. Шидловский, В. С. Федий. – Киев: Наукова думка, 1980. – 304 с.
173. Шишкин С. А. Реактивная мощность потребителей и сетевые потери электроэнергии / С. А. Шишкин. // Энергосбережение. – 2004. – №4.
174. Шпринцин В. Н. Судовые валогенераторы / В. Н. Шпринцин. – Ленинград: Судостроение, 1965. – 237 с.
175. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. – [Введ. с 1999-01-01]. – М.: Стандартиформ, 2006. – 35 с.

176. Jungwirth P. Power factor correction on site // EPCOS COMPONENTS, 2005. – №4. – 37 p.
177. Arkkio A.: Analysis of induction motors based on the numerical solution of the magnetic field and circuit equations. Acta polytechnica Scandinavica, Helsinki, 1987. – 97 p.
178. Application of fuzzy logic in power systems. Part3 Example applications / Song Yong-Hua, Johns Allan T. // Power Engineering Journal, April,1999. – P. 97 – 103.
179. Demenko A., Nowak L, Plachta B.: Finite element analysis of induction generator transients. COMPEL» The International Journal for Computation and Mathematics in Electronic Engineering, v. 13, Nr 1,1994, s. 113–116.
180. Demenko A., Nowak L., Numerical calculation of eddy-current loss in hollow conductors of electrical machine windings, Proceedings of 4-th International IGTE Symposium and European TEAM Workshop, Edited by Richter, Graz 1990, pp. 173-178.
181. Doncer R., Gcyscn W.: A three phase self-excitation generator loaded by controlled rectifier bridge. Part 1, Proc. J., IEE (IPEC), Tokyo, 1983, Nr 183, p. 643–649.
182. Gientkowski Z., Muckc J.: The voltage source inverter applied as reactive power source in voltage stabilization circuit for the asynchronous generator. Conf. Power Electronics, Motion Control, Warsaw, 20-22 Sept. 1994, p. 1256–1209.
183. Guiqui L.: Electrical power generating arrangement and method utilizing in induction generator. Patent USA Nr 3832625, (336140), 1974.
184. Hayashi Y., Sato N.: Extension of commutating range of converter for induction generator. Conf. rec. IEEE ind. Appl., Toronto, 1985, p. 621–626.
185. EPCOS Product Profile 2017. Power Factor Correction. [Электронный ресурс] // TDK. – 2017. – Режим доступа до ресурсу: <https://en.tdk.eu/download/174004/fb6fb19fae2445f847108cde7a10068d/pfc-katalog-pp.pdf>.
186. Jorge Mari, Michal-Wolfgang Waszak, Simon Schramm: Electric power generation with magnetically geared machine. Patent USA Nr 8044527 (019885/0588), 2011.
187. Hellenics K., Vas P., Brown J.: The analysis of a saturated self-excited asynchronous generator. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 6, n. 2, 1991, p. 336–345.

188. Adisa A. Modelling and Analysis of Squirrel Cage Induction Motor with Leading Reactive Power Injection [Электронный ресурс] / A. Adisa // Tshwane University of Technology. – 2012. – Режим доступа до ресурсу: http://cdn.intechopen.com/pdfs/40918/InTech-Modelling_and_analysis_of_squirrel_cage_induction_motor_with_leading_reactive_power_injection.pdf.
189. LeGal C., Canal M. Method pour une planification optimale de la compensation de energie reactive sur les reseaux de distribution. – AIM Liege. – CIRED, 1971.
190. Marphy B.E., Nagarai M.: Design-based computational procedure performance prediction and analysis of self-excited induction generators. IEE Proc., v. 135, Pt. B, Nr 1, 1988, p. 8–16.
191. Mc Quin N.P., Williams P.N.: Transient electrical and mechanical behavior or large induction generator installations. 4. Intern. Conf. on Electr. Mach. and Drives, IEEE Conf. Publ., Nr 310, 1989, p. 251-255.
192. Melkebeek J.A., Novotny D.M.: Steady state modeling of regeneration and self-excitation in induction machines. IEEE Trans. on Appar. and Syst., v. 8, 1988 p. 2725-2733.
193. Mucko J., Gientkowski Z., Kaczmarek Z.: Induction generator with capacitive stabilizing voltage network. XII Symposium on Phenomena in Nonlinear Circuits, Poznan, 1991, p. 299-304.
194. Murthy S.S., Nagamani C.: Studies on the use of conventional induction motors as self-excited induction generators. IEEE Trans, on En, Conv., v. 3, Nr 4, 1988, p. 842-848.
195. Murthy S.S., Singh B.P.: Suitability of using normally-designed induction motor as a capacitor self-excited induction generator. Proc. of the Intern, Conf, on Electrical Machines, Switzerland, 1984, p. 1173-1176.
196. Naganathan G., Sharaf A.M.: Microprocessor control of wind driven squirrel cage induction generator. Europ. Conf. on Power Electronics and Appl., v.1, Brussels, 1985, p. 2.7-2.12.
197. PoleCap PFC Capacitors for Outdoor Low-Voltage PFC Applications. Published by EPCOS AG. 03,2005. – Ordering No. EPC. 2 6015-7600.

198. Salameh Z.M., Kazda L.F.: Analysis of a double output induction generator using direct three-phase model - I. Commutation angle analysis, *IEEE Trans. Energy Convers.*, v. EC-2, Nr 2, 1987, p.175-181.
199. Singh S.P., Jain M. P.: Steady-state analysis of a self-excited induction generator with AC/DC conversion scheme for small scale generation. *EL Pow. Sys. Reserch*, v. 20, Nr 2, 1991, p. 95-104.
200. Singh S.P., Jain M.P.: Performance characteristics and optimum utilization of a cage machine induction generator. *IEEE Trans. on En. Conv.*, v. 5, Nr 4, 1990, p. 679-685.
201. Nailen R.L.: Spooks on the power line? - induction generators and the public utility. *Petrol, and Chemic, Ind. Conf.*, *IEEE Trans. Meeting, N.Y.*, 1983, p.192-200.
202. Nakata T., Takahashi N.: Direct finite element analysis of flux and current distributions under specified conditions. *IEEE Trans. Magn.*, vol. 18, 1982, p. 325-330.
203. Strangas E.G.: Coupling the circuit equations to the non-linear time dependent field solution in inverter driven induction motors. *IEEE Trans. Magn.*, vol. 2, p. 2408-2411.
204. Tandem A.K., Berg G.J.: Steady state analysis of capacitor self-excited induction generators. *IEEE Trans, on Pow. App. and Sys.*, v. PAS-103, Nr 3, 1984, p. 612-618.
205. Thode H.W., Azbill D.C.: Typical application of induction generators and control system considerations. *IEEE Trans, on Ind. Appl.*, v.IA-20, Nr 6, 1984, p. 1418-1423.
206. Ueda R., Sonoda T., Koga K.: Investigations of self-excitation conditions in self-excited type induction generator. *Conf. Rec.-IEEE/IAS Annual Meeting*, p. 889-895.
207. Watson D.B., Duke R.M.: Response of a self-excited induction generator to rectifier harmonics. *Intern. Journal of Electr. Eng. Education*, v. 25, Nr 1, 1988, p. 15–25.
208. Ерошкин А. В. Сравнительный анализ вариантов технического решения плавного пуска мощных асинхронных электродвигателей [Электронный ресурс] / А. В. Ерошкин, Ю. И. Шейкин // *Тороид*. – 2011. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.toroid.ru/article1.html>.

209. Low voltage motors Motor guide [Электронный ресурс] // АБВ. – 2014. – Режим доступа до ресурсу: <http://new.abb.com/docs/librariesprovider53/about-downloads/low-voltage-motor-guide.pdf>.
210. Загорский А. Низковольтные асинхронные двигатели. Преимущества тиристорных пусковых устройств [Электронный ресурс] / А. Загорский, З. Захарова, И. Пар // Новости электротехники. – 2006. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.news.elteh.ru/arh/2006/37/09.php>.
211. Microprocessor controlled “TAMPER PROOF” power factor control relay [Электронный ресурс] // BELUK. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: http://www.processtechnique.com/pdf/PFC_Catalogue/Regulator_CXD.pdf.
212. Power Factor Correction. Power Factor Controller BR7000-I series [Электронный ресурс] // TDK. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: http://www.processtechnique.com/pdf/PFC_Catalogue/Regulator_CXD.pdf.
213. Power Factor Correction: Thyristor Module TSM-LC-I for dynamic PFC [Электронный ресурс] // TDK. – 2012. – Режим доступа до ресурсу: http://www.processtechnique.com/pdf/PFC_Catalogue/Regulator_CXD.pdf.
214. SKM500 Marine Generator [Электронный ресурс] // CINCR0. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.sincro.com.au/manual/skm500-marine-generator>.
215. Comparison between Direct-On-Line, Star-Delta and Auto-transformer Induction Motor Starting Method in terms of Power Quality [Электронный ресурс] // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2009. – 2009. – Режим доступа до ресурсу: <http://new.abb.com/docs/librariesprovider53/about-downloads/low-voltage-motor-guide.pdf>.
216. Tomar A. Starting Time Calculation for Induction Motor [Электронный ресурс] / A. Tomar, A. Garg // Electr Electron System. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.omicsonline.org/open-access/starting-time-calculation-for-induction-motor-2332-0796-1000136.php?aid=57248&view=mobile>.
217. Vijay K. G. Power Factor Improvement of Induction Motor by Using Capacitors [Электронный ресурс] / K. G. Vijay // International Journal of Engineering Trends

- and Technology. – 2013. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.ijettjournal.org/volume-4/issue-7/IJETT-V4I7P138.pdf>.
218. Howell M. Correcting induction motor power factor [Электронный ресурс] / M. Howell // Electrical Apparatus Service Association Inc. – 2014. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.plantengineering.com/single-article/correcting-induction-motor-power-factor/79ef3367298419400cbd845cf65cb3dc.html>.
219. Brushless Constant-Voltage Synchronous Alternators 1FC. Low-Voltage for ship-board and industrial use. Pula, Croatia: Uljanik TESU d.d., 2007. – 15 p.
220. MJB. Data Sheets Three-phase Synchronous Generators. Power generation, 160 – 630 frame sizes Industrial application. Arzignano (VI), Italy: Marelli Motori S.p.A., 2013. – 73 p.
221. Synchronous Alternators Sincro. SKM Brushless marine alternators. Terrey Hills, Australia, 2013. – 29 p.
222. Three-phase Asynchronous Generators. G11R - G22R. Langenhagen, Germany: VEM motors GmbH, 2015. – 17 p.
223. M. Mukha “About practical preparation on the full mission simulator complex of the ship’s automated electric power plant”. *Proceedings of the 13–th International Conference on the Engine Room Simulators, September, 20–21*. – Odessa, Ukraine: National University “Odessa Maritime Academy”, 2017. – pp. 57–64, ISBN 978-966-7591-72-4.
224. PLC-based ship’s electromechanical systems laboratory / M. Mukha, A. Drankova, V. Bousher, A. Shestaka// *Proceedings of the 13–th International Conference on the Engine Room Simulators, September, 20-21*. – Odessa, Ukraine: National University “Odessa Maritime Academy”, 2017. – pp. 183-190, ISBN 978-966-7591-72-4.
225. M. Mukha “A Full Mission Simulator of the Ship’s Automated Electric Power System for Training and Competence Testing of Marine Engineers”. *David Publishing Company. Journal of Shipping and Ocean Engineering*, vol. 4, (2017) P. 153-160. doi 10.17265/2159-5879/2017.04.002.

226. M. Mukha “Comparative analysis of technical and economic characteristics of generator sets on the basis of synchronous and asynchronous generator”, *Computational problems of electrical engineering*, vol. 7, no 1, 2017, pp. 57-61, ISSN 2224-0977.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Узагальнений алгоритм моделювання СЕЕС

Для вирішення завдань дисертаційної роботи з оптимізації структури і параметрів дискретних керуючих пристроїв суднової електроенергетичної системи розроблений пакет прикладних програм для дослідження динамічних процесів в типових режимах роботи. Розробка програм базується на досвіді моделювання групи вчених НУ ОМА під керівництвом А.Є. Паса і Л.В. Вишневського [15, 35, 59, 60, 120, 141, 156].

Програми, розроблені особисто дисертантом, об'єднані під загальним заголовком ASGEN. Програми написані на мові високого рівня Турбо ПАСКАЛЬ (версія 7.0).

Узагальнений алгоритм моделювання, який покладений в основу пакета програм ASGEN, наведено на рис. А.1. Всі програми починаються з заголовка і коментарів щодо позначення деяких змінних. Потім йде опис міток, використовуваних типів змінних і констант. У програмах ASGEN система рівнянь генераторів, приводів і навантаження записуються у вигляді процедури ASG. Функція Ланжевена (2.6), що використана для апроксимації кривої намагнічування, описується у вигляді вбудованої функції під ім'ям Lang. Потім йде частина програми, що організує підготовку зовнішніх файлів і лістингів для запису значень розрахункових змінних - результатів моделювання. Введення змінних вихідних даних для моделювання організовується з клавіатури комп'ютера в процесі виконання програми. Тут вводяться значення початкового і змінного навантаження, точність інтегрування і режим виведення отриманих результатів.

Масиви обчислюваних значень змінних виводяться в зовнішні файли на жорсткому диску, які в подальшому використовуються для графічного представлення перехідних процесів або поверхонь критеріїв якості з використанням зручніших мов, наприклад, GRAPHER або MathCad. Тут же задається час перехідного процесу і час збіжності для сталого процесу.

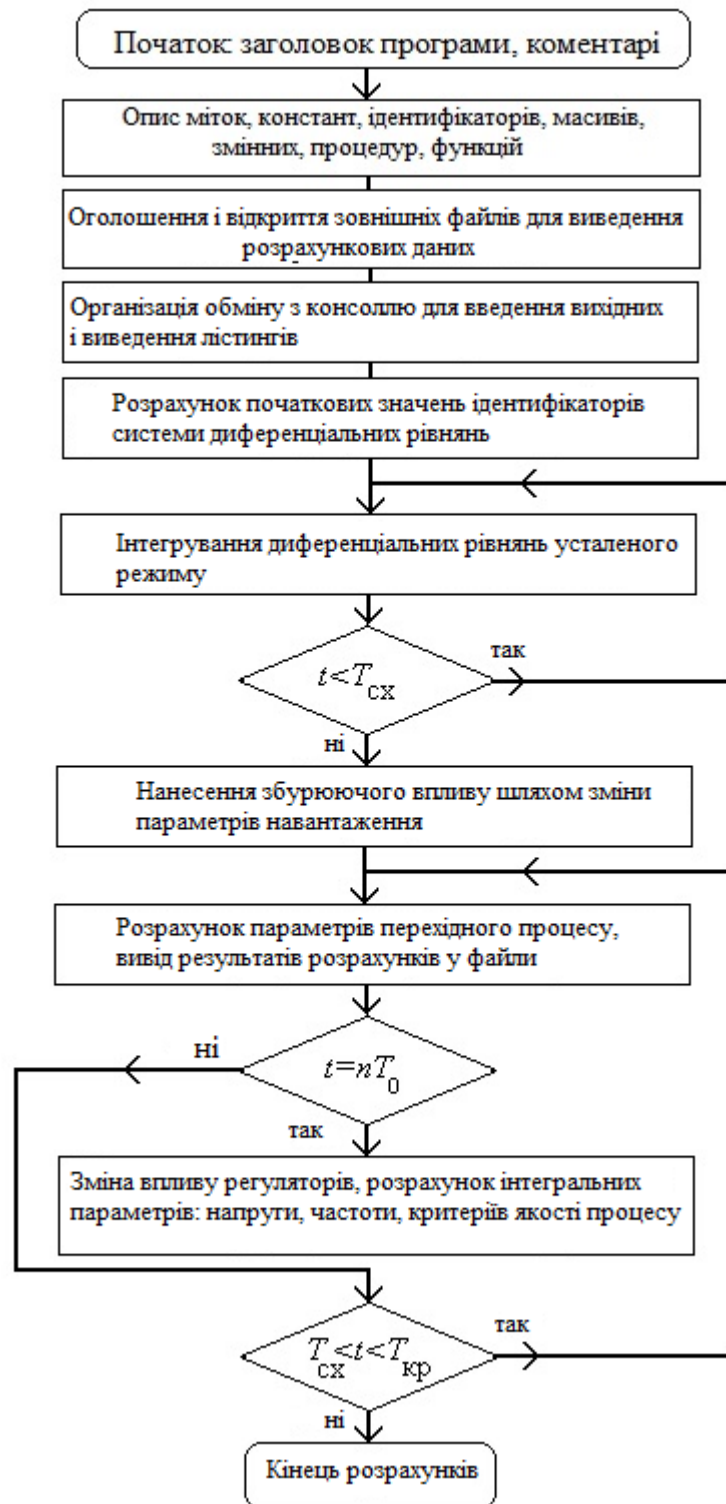


Рис. А.1. Загальний алгоритм роботи програм для дослідження перехідних процесів в суднових електроенергетичних установках

Чисельне рішення диференціальних рівнянь починається заданням початкових значень всіх диференційованих змінних, які обчислюються за спрощеними рівняннями сталих процесів. В результаті початкові значення змінних визначаються

з великими похибками, проте вони повинні забезпечити збіжність подальшого вирішення. Для уточнення значень змінних початкового усталеного режиму в програмі здійснюється попередній розрахунок протягом заданого часу збіжності. Потім проводиться нанесення збурення шляхом зміни параметрів навантаження, частоти обертання або зміни задаючої дії регуляторів.

Для чисельного рішення систем диференціальних рівнянь в програмах використаний метод Рунге-Кутта четвертого роду спільно з методом Мерсона [160] автоматичного вибору кроку інтегрування по заданій точності. Початковий крок інтегрування і точність рішення задаються у вихідних даних. Передбачена можливість зміни точності для різних періодів перехідного процесу, що дозволяє скоротити час розрахунку за програмою.

Поза циклу чисельного інтегрування обчислюються параметри, що не входять в систему диференціальних рівнянь, такі як модуль вектору напруги, частота струму, параметри дискретного регулятора напруги, значення критеріїв якості.

ДОДАТОК Б

Акти використання результатів дисертаційної роботи Мухи Миколи Йосифовича на тему: «Динамічна компенсація реактивної потужності в суднових автономних електроенергетичних системах»



ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор

Національного університету

«Одеська морська академія»

О.М. Шемякін

19» грудня 2017 р.

АКТ

ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Мухи Миколи Йосифовича

на тему: «Динамічна компенсація реактивної потужності в суднових автономних електроенергетичних системах»

Науково-технічна комісія у складі: голови – декана факультету електромеханіки і радіоелектроніки, к.т.н. доцента Будашка В.В. та членів: завідувача кафедри суднової електромеханіки і електротехніки, д.т.н., професора Захарченка В.М., декана судномеханічного факультету, к.т.н., професора Колегаєва М.О., начальника навчального відділу університету Пархоменка М.М. склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Мухи М.Й. впроваджені в навчальний процес Національного університету «Одеська морська академія», зокрема:

1. При підготовці магістрів та бакалаврів спеціальності 271 «Річковий та морський транспорт», зі спеціалізації «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики» та спеціалізації «Експлуатація суднових енергетичних установок» («Управління судновими технічними системами та комплексами») результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі у дисциплінах, які передбачені навчальними планами: «Моделювання суднових електромеханічних та електроенергетичних процесів», «Оптимізація робочих режимів суднових електроприводів», «Управління експлуатацією і ремонтом суднових електромеханічних систем».
2. Концептуальні засади проектування, модернізації та експлуатації суднових електроенергетичних систем з компенсаторами реактивної потужності, метод вимірювання параметра реактивної потужності в навантаженні - реактивної провідності, який визначив технічну реалізацію чутливих елементів системи компенсації реактивної потужності, закони компенсації реактивної потужності навантаження, а також метод збільшення швидкодії суднової автономної електроенергетичної установки та зниження динамічних відхилень напруги генератора при комутації навантаження сумірної потужності шляхом введення перехресного зв'язку від каналу стабілізації напруги генератора в канал компенсації реактивного навантаження були використані у створеному в університеті повномасштабному тренажерному комплексі су-

днової автоматизованої електроенергетичної системи. Цей тренажерний комплекс відповідає вимогам Міжнародної Конвенції про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 р. з поправками (розділ А/1-12) та реальній конфігурації і компоновці суднової автоматизованої електростанції з реальними споживачами і типовим навантаженням, повною мірою використовується для практичної підготовки, а також перевірки компетентності майбутніх офіцерів машинної команди – механіків і електромеханіків. Крім цього зазначений тренажерний комплекс використовується для наукової і науково-технічної підготовки магістрів, аспірантів і докторантів, проведення фундаментальних і прикладних досліджень в галузі експлуатації та автоматизації морських транспортних засобів за наступними основними напрямками:

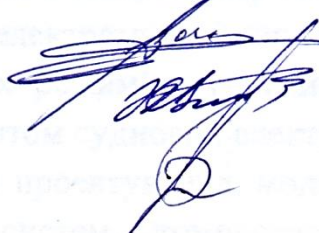
- Підвищення ефективності роботи суднової електроенергетичної установки шляхом оптимальної компоновки електростанції з системою динамічної компенсації реактивної потужності та вирішенням проблем електромагнітної сумісності силового обладнання і систем управління.
- Енергозбереження засобами суднового автоматизованого електроприводу, створення інтелектуальних систем управління судновими автоматизованими електромеханічними системами і комплексами.
- Створення інтелектуальних систем контролю, управління і моніторингу судновими головними і допоміжними енергетичними установками, включаючи віддалений моніторинг.

Голова комісії



В.В. Будашко

Члени:



В.М. Захарченко

М.О. Колегаєв

М.М. Пархоменко



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
Національного університету
«Одеська морська академія»

В.А. Голіков

«18» грудня 2017 р.

АКТ

ПРО ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Мухи Миколи Йосифовича

на тему: «Динамічна компенсація реактивної потужності в суднових автономних електроенергетичних системах»

Науково-технічна комісія у складі: голови – начальника науково-дослідної частини університету, к.т.н. проф. Савчука В.Д. та членів: завідувача кафедри суднової електромеханіки і електротехніки, д.т.н., проф. Захарченка В.М., декана факультету електромеханіки і радіоелектроніки, к.т.н. доц. Будашка В.В. склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Мухи М.Й. впроваджені в науково-дослідні роботи Національного університету «Одеська морська академія», зокрема:

1. При виконанні міжвузівської держбюджетної науково-дослідної роботи за темою «Розробка високоефективних систем управління судновим допоміжним холодильним і компресорно-насосним обладнанням засобами автоматизованого електроприводу» (керівник роботи Муха М.Й., державна реєстрації ДР № 0109U001532) використані алгоритми компенсації реактивної потужності при дослідженні пускових і робочих режимів асинхронних двигунів холодильних та компресорних установок (розділи 1.2, 1.5 заключного звіту).
2. При виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи за темою «Моніторинг, діагностика та управління процесами та обладнанням суднових енергетичних установок» (керівник роботи Муха М.Й., державна реєстрації ДР № 0113U000637) використані ідея динамічної компенсації реактивної потужності, методи та технічні засоби керування реактивним струмом навантаження в пускових режимах електроприводів сумірної потужності в суднових автономних енергетичних системах (розділи 4, 5 заключного звіту).
3. Практичні результати дисертаційної роботи, концептуальні засади проектування суднових електроенергетичних систем з компенсаторами реактивної потужності, закони компенсації реактивної потужності навантаження, а також метод збільшення швидкодії та підвищення стійкості суднової електроенергетичної установки стали теоретичною базою для виконання держбю-

джетної науково-дослідної роботи за темою «Підвищення ефективності роботи суднових електроенергетичних та електромеханічних систем» (керівник роботи Муха М.Й., державна реєстрація ДР № 0116U002392), що виконується на кафедрі суднової електромеханіки і електротехніки починаючи з 2016 р. з використанням обладнання тренажерного комплексу суднової автоматизованої електроенергетичної системи.

Голова комісії



В.Д. Савчук

Члени:




В.М. Захарченко

В.В. Будашко



Приватний
вищий навчальний заклад
«Інститут післядипломної освіти»
«ОДЕСЬКИЙ МОРСЬКИЙ ТРЕНАЖЕРНИЙ ЦЕНТР»
Україна
65023 Одеса, вул. Пастера, 16
р/р 26005312517502 в АБ «Південний» м. Одеса
МФО328209, тел./факс (048)723-52-20

**АКТ ПРО ВИКОРИСТАННЯ
результатів дисертаційної роботи
Мухи Миколи Йосифовича
на тему: «Динамічна компенсація реактивної потужності в суднових
автономних електроенергетичних системах»**

Цим актом засвідчується, що в приватному вищому навчальному закладі «Інститут післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр» результати дисертаційної роботи Мухи М.Й. впроваджені у навчальний процес для слухачів курсів підвищення кваліфікації у рамках розроблених дисертантом напрямків та програм підготовки і перевірки компетентності офіцерів машинної команди суден, які проводяться на обладнанні тренажерного комплексу суднової автоматизованої електроенергетичної системи, зокрема:

1. В курсах підвищення кваліфікації для суднових електромеханіків та механіків з напрямків «Ship's power management systems & emergency distribution. Суднові системи керування електричною енергією і аварійне живлення», «Programmable logic controller (basic and advanced). Програмовані логічні контролери (базовий і розширений)», «Marine high voltage installations: electrical safety, maintenance, adjusting. Морські високовольтні установки: електробезпека, обслуговування, налаштування» використані алгоритми динамічної компенсації реактивної потужності в пускових і робочих режимах асинхронних двигунів суднових механізмів, методики конфігурування контролерів управління судновою електростанцією та компенсатором реактивної потужності задля забезпечення необхідних динамічних характеристик, а також підвищення стійкості та надійності всієї автономної електроенергетичної системи в типових експлуатаційних (включаючи і аварійні) режимах роботи завдяки розробленим алгоритмам функціонування регуляторів та їх апаратної реалізації.
2. В курсах підвищення кваліфікації для суднових електромеханіків з напрямків «Control communication and information network on shipboard. Суднові керуючі та інформаційні мережі», «Energy efficient operation of

ships. Енергоефективна експлуатація суден», «Automated electric drive technology. Технології автоматизованого електроприводу» використані практичні результати дисертаційної роботи, концептуальні засади проектування та перспективного компонування судових електроенергетичних систем з синхронними та асинхронними генераторними агрегатами і компенсаторами реактивної потужності, метод вимірювання параметра реактивної потужності в навантаженні - реактивної провідності, на базі якого реалізовано давач реактивної потужності системи регулювання реактивною потужністю, а також метод збільшення швидкодії та підвищення стійкості судової електроенергетичної установки шляхом введення перехресного зв'язку від каналу стабілізації напруги генератора в канал компенсації реактивного навантаження.

Директор ПВНЗ

«Інститут післядипломної освіти»

«одеський морський тренажерний центр»

К.т.н., професор




Ю.В. Пашченко

19.12.2017

ДОДАТОК В
Патенти України







Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 60895

Твір навчального характеру "Полномасштабний тренажер судової автоматизованої електроенергетической системи для підготовки та перевірки компетентности морських інженерів"

(вид, назва твору)

Автор(и) Муха Микола Йосифович, Дранкова Алла Олегівна

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації: 28.07.2015



Голова Державної служби інтелектуальної власності України


А.Г. Жарінова

ДОДАТОК Г

Полномасштабный тренажер судовой автоматизированной электроэнергетической системы для подготовки и проверки компетентности морских инженеров

Оглавление

1. Область применения и назначение тренажера полномасштабной судовой автоматизированной электроэнергетической системы.
2. Техничко-эксплуатационные возможности тренажера судовой автоматизированной электроэнергетической системы.
3. Описание тренажера полномасштабной судовой автоматизированной электроэнергетической системы.
4. Направления, задачи, методика проведения практической подготовки и проверки компетентности судовых инженеров.
5. Пример реализации целей и задач практической подготовки и проверки компетентности судовых инженеров.
6. ПРИЛОЖЕНИЯ:
 - чертежи, алгоритмы;
 - программное обеспечение;

1. Область применения и назначение тренажера полномасштабной судовой автоматизированной электроэнергетической системы

Областью применения тренажера полномасштабной судовой автоматизированной электроэнергетической системы (далее тренажер полномасштабной САЭЭС) является подготовка и проверка компетентности судовых механиков и электромехаников в рамках дипломного и последипломного образования по программам, базирующихся на международных и национальных стандартах.

Кроме того, областью использования тренажера является проведение научно-практических исследований, направленных на дальнейшее совершенствование технических средств автоматизации силового электрооборудования, процессов выработки, распределения и потребления электроэнергии, а также методов эффективного обучения и проверки компетентности судовых инженеров.

Тренажер полномасштабной САЭЭС предназначен для обучения курсантов и студентов морских учебных заведений, подготовки и проверки компетентности судовых специалистов (механиков и электромехаников) по несению вахты и обслуживанию современных интегрированных систем автоматического управления судовой электростанцией и отдельными судовыми электромеханическими системами

и комплексами в период учебного процесса и практики, а также при прохождении курсов повышения квалификации по программам последипломного образования (повышения квалификации).

2. Техничко-эксплуатационные возможности тренажера судовой автоматизированной электроэнергетической системы

Полномасштабный тренажерный комплекс САЭЭС соответствует требованиям Международной Конвенции ПДНВ 78 с манильскими поправками 2010 [1], предъявляемых к тренажерам.

Тренажер в полной мере отвечает целям и задачам практической подготовки, а также целям и задачам проверки компетентности офицеров машинной команды (судовых механиков и электромехаников) по функциям «Электрооборудование, электронная аппаратура и системы управления» и «Техническое обслуживание и ремонт» стандартов А-III/1, А-III/2, А-III/6 Международной Конвенции ПДНВ 78 с манильскими поправками, а также соответствующим компетенциям, которыми должны обладать судовые механики и электромеханики в результате обучения.

Для судовых механиков по следующим компетенциям:

- эксплуатация электрооборудования, электронной аппаратуры и систем управления;

- техническое обслуживание и ремонт электрического и электронного оборудования;

- устранение неполадок, приведение в рабочее состояние электрического и электронного оборудования управления.

- Для судовых электромехаников по следующим компетенциям:

- надзор за эксплуатацией электрических и электронных систем, а также систем управления;

- надзор за работой автоматических систем управления двигательной установкой и вспомогательными механизмами;

- эксплуатация генераторов и систем распределения;

- эксплуатация и техническое обслуживание силовых систем с напряжением более 1000 вольт;

- эксплуатация компьютеров и компьютерных сетей на судне;

- техническое обслуживание и ремонт электрического и электронного оборудования;

- техническое обслуживание и ремонт систем автоматики и управления главной силовой установкой и вспомогательными механизмами;

– техническое обслуживание и ремонт электрических, электронных систем и систем управления палубными механизмами и грузоподъемным оборудованием.

Тренажерный комплекс полномасштабной САЭЭС спроектирован также для обеспечения научной и научно-технической подготовки магистров, аспирантов и докторантов, проведения фундаментальных и прикладных исследований в области эксплуатации и автоматизации морских транспортных средств, что будет также способствовать повышению качества образования и подготовки научных и инженерных кадров.

Тренажер полномасштабной САЭЭС, обеспечивающий практическую подготовку и проверку компетенций офицеров машинной команды по выше упомянутым функциям «Электрооборудование, электронная аппаратура и системы управления», и «Техническое обслуживание и ремонт» отвечает общим эксплуатационным требованиям (Раздел А-I/12, части 1 и 2) Кодекса ПДНВ 78 с Манильскими поправками [1], предъявляемых к тренажерам, выполнен на реальном оборудовании и средствах автоматики, отвечает реальной конфигурации и компоновке судовой автоматизированной электростанции с реальными потребителями и типовой нагрузкой. Эти общие эксплуатационные и другие требования, которым тренажер соответствует, следующие:

- тренажер соответствует целям и задачам подготовки, а также целям и задачам проверки компетентностей офицеров машинной команды;
- тренажер воспроизводит реальные условия эксплуатации САЭЭС для получения обучаемым навыков технического обслуживания и ремонта, отвечающих целям подготовки, а также предоставляется возможность продемонстрировать эти навыки для целей оценки компетентностей;
- тренажер обеспечивает контролируемую эксплуатационную обстановку, включая нештатные и аварийные ситуации, отвечающие целям и задачам подготовки, а также позволяет имитировать различные эксплуатационные ситуации;
- тренажер обеспечивает возможность обучаемому с любого компьютеризированного рабочего места или непосредственно с помощью реальных органов управления управлять как электростанцией, так и отдельными электромеханическими объектами в автоматизированном или автоматическом режимах работы, проследить за рабочими параметрами объектов управления. Тренажер также предоставляет обучаемому доступ к учебно-методическим и справочным материалам;
- тренажер обеспечивает возможность инструктору отслеживать и регистрировать действия обучаемого с целью дальнейшего анализа допущенных ошибок.

Кроме этого, тренажер выполнен с возможностью удаленного управления, мониторинга и дистанционного доступа к учебно-методическим и справочным материалам.

3. Описание тренажера полномасштабной судовой автоматизированной электроэнергетической системы

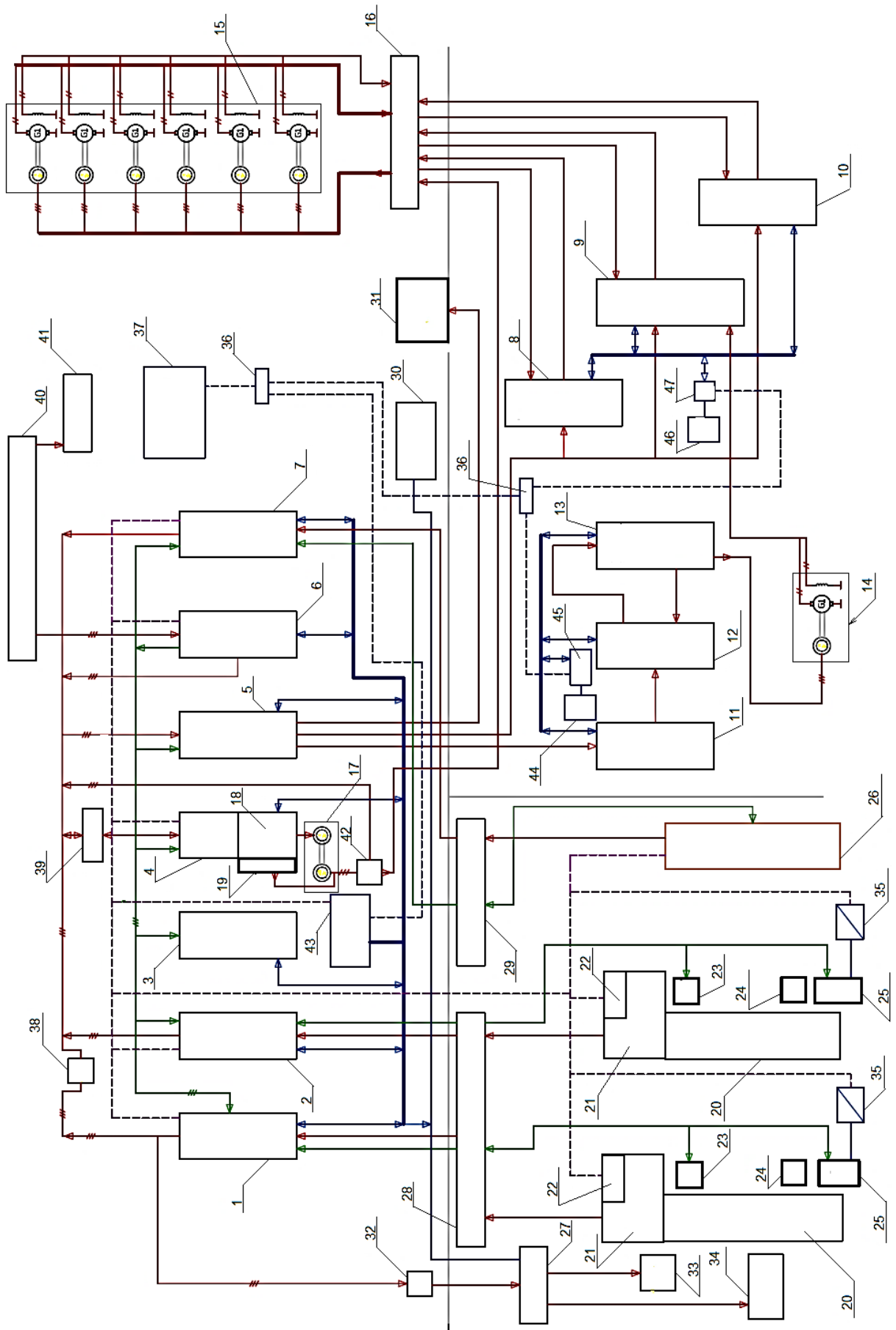
Функциональная схема полномасштабного тренажера САЭЭС в привязке к секциям ГРЩ приведена на фиг. 1.

Обозначения на фиг.1 и состав оборудования:

1,2 – секции дизель-генераторов (ДГ) № 1 и № 2 ГРЩ, содержащие генераторные автоматические выключатели серии Masterpact NT06N1 с блоком управления Micrologic 7P и коммуникационным модулем связи, измерители параметров сети, шины ГРЩ, микроконтроллеры генераторов С6200, С6250 и дизелей М2500, коммутационно-защитную аппаратуру и блоки питания цепей управления и сигнализации, щитовые приборы и органы управления, сигнализации;

3 – секция синхронизации и управления ГРЩ, содержащая три модуля аварийно-предупредительной сигнализации, щитовые приборы с двойными шкалами, синхроскоп, переключатель выбора режимов работы электростанции, моторизованные задающие потенциометры возбуждения синхронных генераторов и оборотов дизелей, коммутационно-защитную аппаратуру и блоки питания цепей управления и сигнализации, микроконтроллер Modicon M340 SCADA с модулями расширения, органы управления и сигнализации, шины ГРЩ;

4 – секция асинхронного валогенератора ГРЩ с конденсаторным возбуждением (4 ступени конденсаторов) и системы динамической компенсации реактивной мощности, содержащая микроконтроллеры асинхронного генератора С6200, С6250 и микроконтроллеры BR-7000-T15 и MMI7000 компенсатора реактивной мощности и блока регулирования качества электроэнергии, тиристорные ключи для подключения соответствующих ступеней конденсаторов компенсатора с весовыми коэффициентами 1-2-4-8, микроконтроллер Alpha 2 для управления конденсаторами возбуждения асинхронного генератора, генераторный автоматический выключатель NSX100N с блоком управления Micrologic 2E, коммутационно-защитную аппаратуру и блоки питания цепей управления и сигнализации, щитовые приборы и органы управления и сигнализации, частотный преобразователь Altivar 71 приводного асинхронного электродвигателя, соединенного муфтой с валом асинхронного генератора, с возможностью изменения частоты вращения агрегата (например, имитируя режимы работы гребного вала, волнение и т.п.);



Фиг. 1 – Функциональная схема полномасштабного тренажера САЭС

5 – секция ГРЩ групповых потребителей № 1 (трехфазная резистивная нагрузка в виде теплого пола в помещении дизель-генераторов, соединенная «звездой», учебная лаборатория электрических машин и электропривода суммарной мощностью 12 кВт, два отдельных электромеханических модуля, состоящих из частотно-управляемых электроприводов с нагрузочными генераторами постоянного тока) содержащая отдельные фидерные дистанционно управляемые автоматические выключатели каждого из указанных потребителей, коммутационно-защитную аппаратуру и блоки питания цепей управления и сигнализации, щитовые приборы и органы управления и сигнализации;

6 – секция отдельного энергоснабжения от береговых сетей (питание с берега), включает устройство контроля параметров сети, микроконтроллер C6200, прибор контроля последовательности фаз, автоматический выключатель, коммутационно-защитную аппаратуру и блоки питания цепей управления и сигнализации, щитовые приборы и органы управления и сигнализации;

7 – секция аварийного (стояночного) дизель-генератора (аварийный распределительный щит АРЩ), содержащая многофункциональный микроконтроллер PPM-3 EDG, генераторный автоматический выключатель Terasaki TN32 с блоком контроля и управления, коммутационно-защитную аппаратуру и блоки питания цепей управления и сигнализации, щитовые приборы и органы управления и сигнализации;

8, 9, 10 - секции групповых потребителей № 2 (шесть отдельных электромеханических модулей, состоящих из частотно-управляемых электроприводов с преобразователями частоты различных производителей и нагрузочными генераторами постоянного тока, с преобразователями напряжения постоянного и переменного тока (комплектные электроприводы) также различных производителей с нагрузочными генераторами постоянного тока (или другими электродвигателями, управляемыми от отдельных преобразователей)), содержащие микроконтроллер FX3U с модулями расширения, осуществляющего управление всеми выше перечисленными электромеханическими модулями, реализующий типовой для судовых механизмов и комплексов характер нагрузок, графический дисплей и устройство ввода-вывода типа GT1575-VNBD, связанный с FX3U и отражающий все мнемосхемы упомянутых электромеханических модулей с возможностью их дистанционного управления, визуализации, параметрирования и т.п., коммутационно-защитную аппаратуру и блоки питания цепей управления и сигнализации, щитовые приборы и локальные органы управления каждого из преобразователей, лампочки сигнализации;

11 – высоковольтная коммутационно-распределительная секция (типа AD1- комплектная ячейка силового ввода) ГРЩ серии MCset 7,2 кВ, содержащая высоковольтный вакуумный автоматический выключатель выкатного исполнения типа Evolis (Merlin Gerin) 7P1630, многофункциональный микропроцессорный

терминал защит серии SEPAM S20, а также дополнительно установленные программируемый логический контроллер серии QJ61BT11N, Q00UICPU с модулями ввода/вывода – QX80, контроллер D1000 для защиты от электрической дуги и графический дисплей с устройством ввода-вывода типа GT14 для визуализации состояния элементов и устройств высоковольтного оборудования, а также их местного и дистанционного управления, коммутационно-защитную аппаратуру и блоки питания цепей управления и сигнализации, щитовые цифровые приборы;

12 – высоковольтная трансферно-фидерная секция МТР+FVNR (AAM59148), содержащая высоковольтные вакуумные основной и вспомогательный (шунтирующий) контакторы выкатного исполнения, высоковольтные предохранители, многофункциональный микропроцессорный терминал защит серии SEPAM S40, коммутационно-защитную аппаратуру и блоки питания цепей управления и сигнализации, щитовые цифровые приборы;

13 – высоковольтная секция УНО электропривода типа RVSS, содержащая тиристорный преобразователь напряжения с микроконтроллером управления и пользовательским дисплеем, коммутационно-защитную аппаратуру и органы управления;

14 – электромеханический модуль, содержащий синхронный с постоянными магнитами электродвигатель (или асинхронный) соединенный муфтой с нагрузочным генератором постоянного тока, который в свою очередь подключен на несколько ступеней резисторов, коммутируемых с помощью программируемого контроллера по алгоритму, например, соответствующему типовому характеру нагрузки гребного вала судна;

15 – комплекс электромеханических модулей, содержащих электродвигатели (асинхронные или постоянного тока) соединенные муфтой с нагрузочными генераторами постоянного тока, которые в свою очередь подключены на несколько ступеней резисторов, коммутируемых с помощью программируемого контроллера по алгоритму, например, соответствующему типовому характеру нагрузки судовых механизмов;

16, 27, 28, 29, 40 – распределительные щиты силовых цепей, цепей управления и коммуникационных связей, содержащие коммутационно-защитную аппаратуру, блоки питания цепей управления и сигнализации, щитовые приборы и локальные органы управления вспомогательных систем тренажера, лампочки сигнализации, функциональные преобразователи;

17 – валогенераторная установка, состоящая из асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением и приводным асинхронным электродвигателем;

18 – силовые тиристорные модули (12 шт) системы динамической компенсации реактивной мощности типа TSM – LC-I, многофункциональный измерительный интерфейс MMI7000-S;

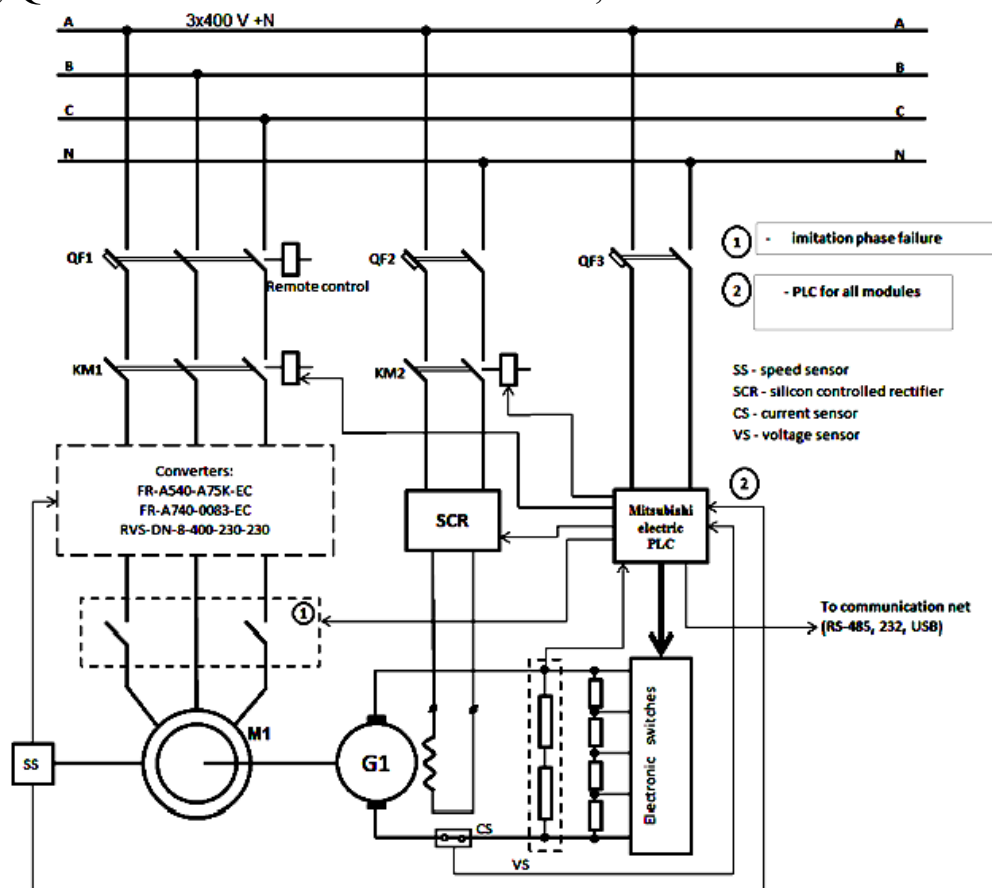
- 19 – 4 ступени конденсаторных блоков с весовыми коэффициентами 1-2-4-8 серии PhiCap с элементами защиты для системы возбуждения асинхронного генератора;
- 20, 21 – дизель-генераторные установки PowerLink (две установки) модель GMS10PX, дизель 20, модель PX380G, синхронный бесщеточный генератор 21 STAMFORD типа P. I044E1;
- 22 – микроконтроллеры дизель-генераторной установки типа DSE-7320 (два комплекта);
- 23 – автоматический регулятор напряжения и система возбуждения синхронных генераторов типа AS480 AVR (два комплекта);
- 24 – исполнительный механизм (сервопривод, актуатор) топливной рейки дизеля типа ADC-225S-24(два комплекта);
- 25 – цифровой регулятор оборотов дизеля типа SDG514-0101(два комплекта);
- 26 – аварийный (стояночный) дизель-генератор, модель ALIZE 6000E / 7500TE, двигатель модели HONDA GX 390 OHV с дистанционным электростартерным запуском, синхронный генератор 5,6 кВт, 400 В, фирмы SDMO (Франция);
- 30 – станция пожарной сигнализации, модель JABLOTRON OASIS JA-83K;
- 31 – распределительный щит лаборатории электрических машин и электропривода суммарной мощностью около 12,5 кВт (мощный потребитель электростанции);
- 32 – переключающее устройство;
- 33 – трехфазная резистивная нагрузка (теплый пол в помещении дизель-генераторов), соединенная в «звезду»;
- 34 – система вентиляции и кондиционирования в помещениях тренажера (трехфазный наружный блок) суммарной мощностью 6 кВт;
- 35 – коммуникационный преобразователь-адаптер;
- 36 – коммуникационный переключатель;
- 37 – система дистанционного управления и контроля режимных параметров оборудования тренажерного комплекса на базе микроконтроллерного комплекта Modicon M340 с модулями расширения SCADA;
- 38 – секционный разъединитель (ручной) типа Interpact INS-40-160 4P;
- 39 – 4 ступени конденсаторных блоков с весовыми коэффициентами 1-2-4-8 серии PhiCap с элементами защиты для системы динамической компенсации реактивной мощности;
- 41 – коммутационный шкаф, содержащий интернет-ввод, настраиваемый коммутатор с 24 портами D-Link, маршрутизатор (роутер) Atheros AR9344, систему видеонаблюдения с 18 IP видеокамерами типа NVIP-2DN3020V/IR-1P, WiFi-точка доступа с возможностью создания общего покрытия (роуминг), программный контроллер: access point indoor 2-range Pro-series, 2 ports 10/100/1000, 802.11 a/b/g/n, PoE, WEP, WPA-PSK, WPA-TKIP, WPA2 AES, 802.11i, 2.4 ГГц / 5 ГГц;
- 42 - дистанционное переключающее устройство RCA iC60 4P;

43 – программируемый логический контроллер Modicom M340 с модулями расширения SCADA;
 44 – графический дисплей типа GT14;
 45 – программируемый логический контроллер серии QJ61BT11N, Q00UCPU с модулями ввода/вывода – QX80;
 46 – графический дисплей типа GT1575-VNBD;
 47 – программируемый логический контроллер FX3U с модулями расширения.
 Секции групп потребителей с одной стороны представляют собой автоматизированные электромеханические системы отдельных судовых механизмов с их типовой нагрузкой, с другой – отдельные судовые комплексы или, например, отдельную лабораторию.

Функциональная схема одной такой электромеханической системы с PLC – управляемой нагрузкой представлена на фиг. 2.

Обозначение на схеме фиг.2:

QF1 – дистанционно управляемый автоматический выключатель с модулями защиты; QF2, QF3 – автоматические выключатели;



Фиг. 2 – Функциональная схема электромеханического модуля с PLC – управляемой нагрузкой

KM1, KM2 – контакторы;

Converters – преобразователи частоты (напряжения), используемые в тренажере;

SCR – управляемый преобразователь напряжения для питания обмотки возбуждения нагрузочного генератора G1;

PLC – программируемый логический контроллер фирмы Mitsubishi Electric;

SS – датчик частоты вращения вала электромеханического агрегата;

CS, VS – датчики тока нагрузки (шунт) и напряжения генератора постоянного тока;

Electronic switches – электронные управляемые ключи (твердотельные реле);

M 1 – электродвигатель.

В качестве силовых преобразователей таких электромеханических модулей используются различные преобразователи, например, частотные преобразователи FR – A740, FR – A540, Altivar 71 фирм Mitsubishi Electric и Schneider Electric или преобразователи напряжения RVS-DN, Altistart 48 фирм Solcon и Schneider Electric. Рабочим механизмом (нагрузкой) каждого из электродвигателей служит нагрузочный генератор постоянного тока, соединенный с его валом, нагрузка которого в свою очередь имитируется подключением с помощью соответствующего микроконтроллера нагрузочных резисторов по определенному алгоритму, соответствующему характерной нагрузке реального судового механизма.

Программируемый логический контроллер Modicon M340 фирмы Schneider Electric с модулями расширения и соответствующей средой для программирования Unity Pro S v.7.0 выбран в качестве платформы для визуализации и дистанционного управления режимами работы всего тренажерного комплекса или его отдельных устройств. Диспетчерское (операторское) управление и сбор режимных данных оборудования тренажера, а также организация и проведение непосредственного учебного процесса практической подготовки и оценки компетентности обучаемых осуществляется посредством специализированного программного обеспечения – SCADA Expert Vijeo Citect V7.40.

Гибкость конфигурации оборудования и системы автоматики тренажерного комплекса расширяет функциональные возможности по его модернизации, интегрированию дополнительного оборудования и программных продуктов отдельных элементов и устройств. Все оборудование комплекса, включая отдельные элементы, а также средства автоматики объединены в единую коммуникационную управляющую и информационную сеть с поддержкой основных коммуникационных протоколов, используемых на судах, таких как Modbus, Fielbus, CANopen, Ethernet, CC-Link а также с возможностью удаленного управления, мониторинга и передачи данных.

Система автоматического управления судовой электростанцией (Power Management System, PMS) выполнена на базе микроконтроллеров C6200.0100

FlexGen Advanced фирмы SELCO и микроконтроллеров PPM-3 EDG фирмы DEIF, встроенных в каждую генераторную секцию, а также секцию питания с берега.

Основная электростанция состоит из двух дизель-генераторных агрегатов модели GMS10PX фирмы Powerlink Machine Co, номинальной мощностью генераторов 8 кВт, напряжением 380/220 В. Приводные двигатели синхронных бесщеточных генераторов № 1 и № 2 – дизели типа PX380G. Управление дизелями осуществляется микроконтроллерами DSE7320 (локальный ПЛК) фирмы Deep Sea Electronics Plc и микроконтроллерами M2500 фирмы SELCO, которые встроены в каждую секцию синхронного генератора. Третьим основным генератором является асинхронный валогенератор (АВГ) на базе серийной асинхронной машины типа АИР 100S4 с конденсаторным возбуждением мощностью 3,0 кВт. Приводной двигатель АВГ (на реальном судне главный двигатель судна) – в тренажере использован асинхронный электродвигатель типа АИР 100 L4, мощностью 4,0 кВт. Для питания и управления приводным электродвигателем АВГ (т.е. имитацией поведения гребного вала на реальном судне в зависимости от режима работы главного двигателя, погодных условий плавания и т.п.) используется преобразователь частоты фирмы Schneider Electric Altivar 71.

На компьютере инструктора установлена операционная система сервера и специализированное программное обеспечение SCADA Expert Vijeo Citect V7.40, посредством которого, можно управлять как электростанцией, так и отдельными электромеханическими объектами в автоматизированном или автоматическом режимах работы, устанавливать приоритеты управления операторами, контролировать и регистрировать их действия. На сервере (компьютере инструктора) устанавливается также все дополнительное программное обеспечение всех контроллеров, силовых преобразователей и т.п. Компьютер инструктора подключен к Интернету.

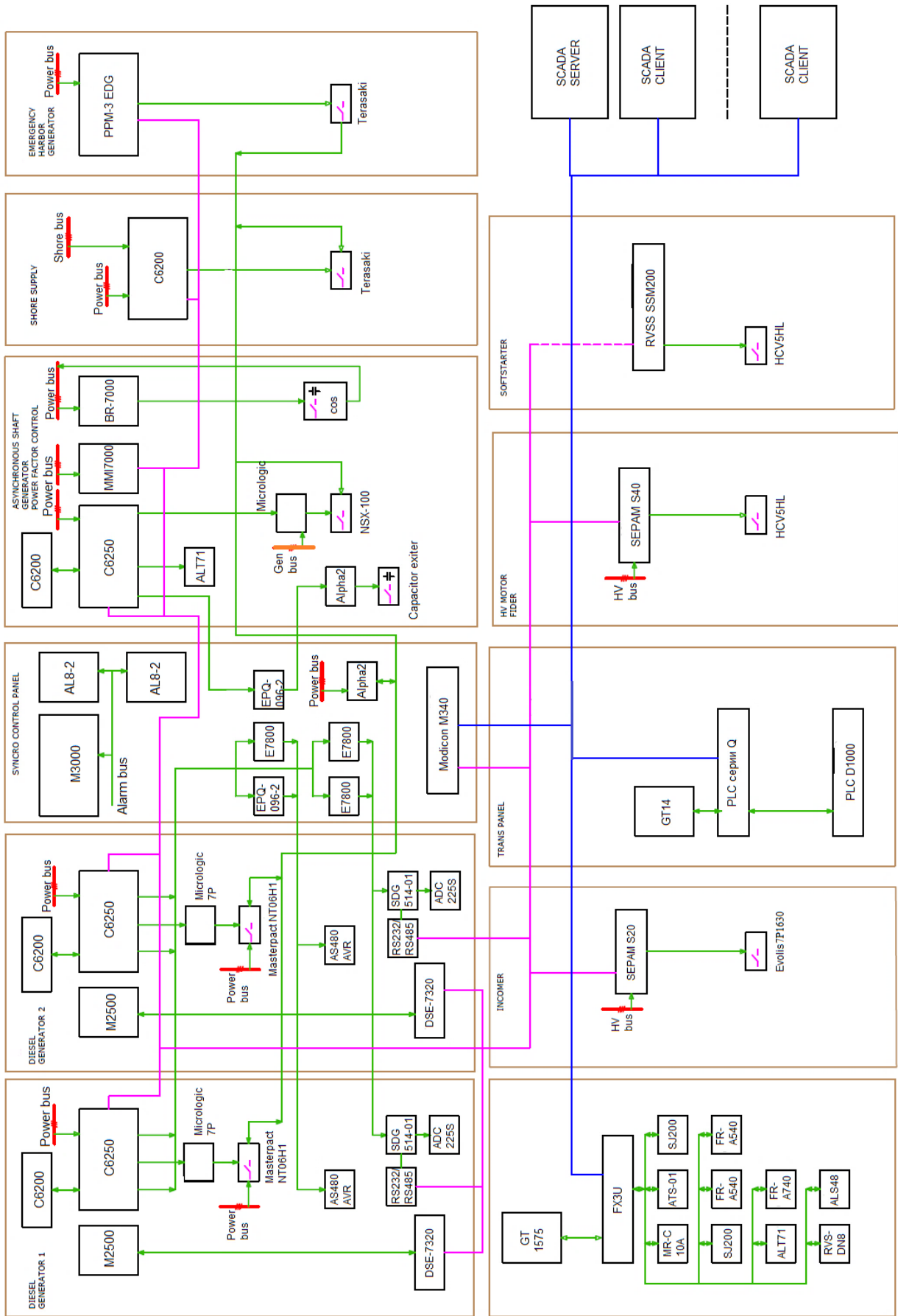
Компьютеризированные рабочие места операторов (обучаемых) и инструктора объединены в единую информационную и управляющую сеть с возможностью передачи управления тренажером в целом или его локальным объектом любому обучаемому (в соответствии с приоритетом), а также возможностью решать задачи параметрирования, настройки, визуализации и т.п.

Схема сетей управления и коммуникаций тренажера с привязкой к секциям ГРЩ, отдельными элементами и модулями представлена на фиг. 3. Здесь розовой сплошной линией показана коммуникационная сеть Modbus, синей сплошной линией показана коммуникационная сеть Ethernet, зеленой сплошной линией показана коммуникационная сеть Safety System bus.

Однолинейная схема ГРЩ секций 1 – 7, а также секций 8 – 13, показывающая общую структуру системы генерирования и распределения электроэнергии тренажерного комплекса СЭЭС представлена на фиг. 4 а,б.

Общие технические характеристики контроллеров управления судовой электростанцией (Power Management System, PMS) серии C6200 FlexGen. Контроллеры C6200 FlexGen имеют сертификаты морских классификационных обществ, обеспечивают большой выбор вариантов конфигурации судовой электростанции пользователем, подключение к механизмам и устройствам дистанционного управления и мониторинга.

Модельный ряд контроллеров C6200 FlexGen состоит из трех типов блоков управления – FlexGen Basic, FlexGen Compact, FlexGen Advanced, которые обеспечивают различные уровни функционирования (см. таблицу 2). В тренажерном комплексе используется модель контроллера C6200.0100 FlexGen Advanced для всех трех основных генераторных агрегатов и для отдельного энергоснабжения от береговых сетей (питание с берега).



Фиг. 3 – Схема сетей управления и коммуникаций тренажера с привязкой к секциям ГРЩ

Обзор возможных функций всех моделей контроллеров серии C6200 FlexGen приведен в таблице 1.

Таблица 1
Обзор функций моделей контроллеров C6200 FlexGen

Функции	FlexGen Basic	FlexGen Compact	FlexGen Advanced
Трёхфазное измерение действующих значений напряжений и токов	x	x	x
Управление частотой	x	x	x
Автоматическая синхронизация	x	x	x
Распределение активных нагрузок	x	x	x
Управление напряжением / подгонка напряжения		x	x
Распределение реактивных нагрузок		x	x
Защита от обратной активной мощности	x	x	x
Защита от обратной реактивной мощности		x	x
Защита по скорости изменения частоты RoCoF (df/dt)		x	x
Защита от векторного сдвига		x	x
Защита от перегрузки по полному току ($I >$) и активному току ($P >$)			x
Защита от короткого замыкания ($I >>$)			x
Защита от повышенного напряжения ($U >$)	x	x	x
Защита от пониженного напряжения ($U <$)	x	x	x
Повышенная частота ($F >$)	x	x	x
Пониженная частота ($F <$)	x	x	x
Контроль обесточивания / блокировка одновременного включения	x	x	x
Внешнее отключение автоматического выключателя		x	x
Отключение двигателя при неисправности			x
Отключение второстепенных потребителей (PM)			x
Запуск / остановка в зависимости от нагрузки			x
Блокировка пуска мощных потребителей (PM)			x
Динамическое управление работой параллельно с береговой сетью		x	x
Аналоговые входы / выходы		x	x
Интерфейс MODBUS RTU (RS485)	x	x	x

Основные функции системы управления электростанцией на базе контроллера C6200 FlexGen Advanced в зависимости от комплектации и типовых режимов работы СЭЭС тренажера приведены в таблице 2.

Таблица 2
Основные функции системы управления СЭЭС на базе
C6200 FlexGen Advanced

Обозначения функции в таблице: X – активна; - неактивна; (1) – активируется кнопкой управления	Ручной режим управления СЭЭС	Режимы управления СЭЭС			
		SEMI-AUTO	AUTO	SPLIT	SHAFT
Автоматические функции C 6200 FlexGen Advanced					
Load depending start/stop (Пуск/останов в зависимости от нагрузки)	-	-	X	X	-
Selection of start/stop priority (Выбор приоритетности пуска/остановки)	-	-	X	X	-
Frequency control (контроль частоты)	-	X	X	X	-
Symmetrical load share (Симметричное распределение нагрузки)	-	X	X	X	-
Asymmetrical load share (Асимметричное распределение нагрузки)	-	-	X	-	-
Blackout start (Пуск при полном отключении)	-	X	X	X	-
Shore connection supervision (Контроль соединения с береговой линией)	X	X	X	X	X
Conditional connection of heavy consumers	-	X	X	X	X

(Условное подключение мощных потребителей)					
ФУНКЦИИ ГЕНЕРАТОРНЫХ БЛОКОВ					
Automatic start sequence (Последовательность автоматического пуска)	-	(1)	X	X	-
CB ON sequence (Последовательность замыкания выключателя)	-	(1)	X	X	X
Frequency/load control (Контроль частоты/нагрузки)	-	X	X	X	X
Manual control of freq./load (Ручное управление частотой/нагрузкой)	X	-	-	-	
CB off sequence (Последовательность размыкания выключателя)	-	(1)	X	X	
Automatic stop sequence (Последовательность автоматического останова)	-	(1)	X	X	
ФУНКЦИИ ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРОВ					
Internal system supervision (Внутренний контроль системы)	X	X	X	X	X
Engine supervision (Контроль двигателя)	X	X	X	X	-
Busbar supervision (Контроль шины)	X	X	X	X	X
Generator protection (Защита генератора)	X	X	X	X	X

Short circuit protection (Защита от коротких замыканий)	X	X	X	X	X
Trip of nonessential load groups (Отключение несущественных нагрузок)	X	X	X	X	X

Основные характеристики моделей контроллеров C6200 FlexGen. Контроллеры C6200 FlexGen Advanced установлены в каждую из трех основных генераторных секций ГРЩ (секции № 1 и №2 дизель-генераторов и секцию № 4 асинхронного валогенератора), а также в секцию № 6 «Питание с берега», используются в тренажере для синхронизации генераторов друг с другом и с береговой сетью, обеспечивают стабилизацию частоты и напряжения, распределение активных/реактивных нагрузок, комплексную защиту генераторов, базовые и программируемые входы/выходы и обработку данных. Кроме того, каждый модуль C6200 обеспечивает интерфейс с панелью оператора, а именно посредством последовательного порта RS232 и соответствующего кабеля контроллер C6200 FlexGen Advanced подключен к пользовательскому интерфейсу C6500 FlexGen UI, установленному на лицевой панели соответствующей секции ГРЩ. Контроллеры C6200 могут быть настроены как для локального управления частотой и напряжением, так и для работы с внешним заданием частоты и напряжения от внешней сети. Контроллеры C6200 FlexGen установлены для каждого генератора внутри секции, а также в секции питания с берега и обеспечивают полное управление электрической частью. Контроллеры C6200 имеют вход для изменения режима между ручной и автоматической работой. Все три версии C6200 FlexGen включают одинаковые базовые функции такие, как автоматическая синхронизация, регулирование частоты, распределение активных нагрузок, контроль обесточивания шин, защита от обратной мощности, которые имеются и в базовой модели FlexGen Basic. В модель FlexGen Contrast добавлено:

- распределение реактивных нагрузок;
- подгонка напряжения;
- управление косинусом фи;
- управление параллельной работой с береговой сетью;
- защита от обратной реактивной мощности;
- защита от RoCoF (df/dt) (скорость изменения частоты) и векторного сдвига.

Наиболее универсальной моделью является C62000 FlexGen Advanced, которая также имеет расширенные возможности по защите:

- от перегрузки по полному току;

- от короткого замыкания;
- такие функции управления СЭЭС как: отключение второстепенных потребителей; запуск/останов резервного ДГ в зависимости от нагрузки; блокировка пуска мощных потребителей.

Все модели имеют интерфейс MODBUS RTU, что позволяет интегрировать их с оборудованием других производителей, например, контроль и управление с графического интерфейса SCADA специально разработанного для данного тренажера.

Управление частотой вращения дизеля и подгонка напряжения синхронного генератора. Контроллеры С6200 FlexGen в тренажерном комплексе управляют цифровыми регуляторами оборотов дизеля типа SDG514-0101 приводных дизелей дизель-генераторов № 1 и № 2, а также автоматическими регуляторами напряжения системы возбуждения синхронных генераторов типа AS480 AVR при помощи импульсов релейных выходов «Больше/Меньше», подключенных к соответствующим задающим моторизированным потенциометрам типа E7800 указанных регуляторов оборотов дизелей и систем возбуждения генераторов. Кроме такого способа управления в контроллерах С6200 FlexGen предусмотрена возможность для других моделей регуляторов частоты вращения и напряжения (AVR) использовать аналоговые (ток или напряжение) выходные сигналы С6200, а также модулированные широтно-импульсные сигналы (PWM).

Контроллеры FlexGen совместимы также с наиболее часто применяемыми регуляторами частоты вращения и напряжения (AVR), такими как:

- контроллеры частоты вращения Caterpillar типа ADEM и PEES, а также регуляторы напряжения CDVR;
- контроллеры частоты вращения EFC фирмы Cummins;
- контроллеры частоты вращения GAC серии ESD;
- электронные регуляторы частоты вращения серии E фирмы Heinzmann;
- электронные регуляторы частоты вращения 2301 и APECS фирмы Woodward;
- механические регуляторы UG-MAS фирмы Woodward;
- регуляторы напряжения Newage AVK SEG MX 300 series;
- регуляторы Leroy Somer R448.

Полный перечень регуляторов со схемами подключения можно найти на сайте SELCO www.selco.com.

Синхронизация. Контроллеры С6200 FlexGen оборудованы встроенным синхроскопом для ручной или полуавтоматической синхронизации, что весьма удобно при вводе в работу и эксплуатации.

Автоматическая синхронизация генераторов САЭЭС является основной функцией всех контроллеров С6200 FlexGen. Имеется также возможность

синхронизации между собой различных шин ГРЩ тренажера, содержащие секционный разъединитель. Контроллеры FlexGen могут выполнять как прямую, так и обратную (после восстановления питания) синхронизацию. Функция синхронизации может быть активирована/деактивирована через программируемые входы, что позволяет плавно переходить из режима автономной работы в режим параллельной работы с береговой сетью, при этом практически не требуются дополнительные подключения.

Распределение активных нагрузок (kW) и реактивных нагрузок (kVAr). Все контроллеры обеспечивают параллельную работу генераторов. С помощью специальной линии распределения нагрузок, FlexGen может распределять активные и реактивные нагрузки с другими контроллерами FlexGen или устройствами распределения нагрузок других производителей, например, PPM3 фирмы DEIF.

Защита генератора. Защита от обратной мощности является стандартной для всех моделей контроллеров С6200 FlexGen. Кроме того, контроллеры FlexGen Compact и FlexGen Advanced имеют дополнительные защиты от обратной реактивной мощности. При параллельной работе с береговой сетью в контроллерах FlexGen Compact и Advanced может быть активирована защита:

- от векторного сдвига;
- от быстрого изменения частоты RoCoF (df/dt);
- от перегрузки по активному току;
- от перегрузки по полному току;
- от короткого замыкания.

Контроль напряжения и частоты стандартно входит во все контроллеры С6200 FlexGen.

Контроль обесточивания. Контроль обесточивания стандартно входит во все модели С6200 FlexGen, которые также имеют функцию блокировки одновременного несинхронного включения генераторов после обесточивания.

Запуск/останов в зависимости от нагрузки. Контроллеры С6200 FlexGen имеет 8 программируемых входов и выходов. Выходы могут быть запрограммированы для выдачи команды на запуск и останов ДГ в зависимости от нагрузки в системе. В случае, если нагрузка на работающих генераторах превысит заданное значение, запускается дополнительный резервный ДГ. Тот же ДГ, например, будет остановлен, если нагрузка снизится ниже заданного значения. Конкретная последовательность запуска/останова ДГ зависит от приоритета ДГ, задаваемого внешним переключателем на входах 5-8 контроллера.

Управление генераторами, работающими в параллель с береговой сетью. Контроллеры С6200 FlexGen Compact и FlexGen Advanced имеют специальные функции для параллельной работы с береговой сетью.

Управление активной нагрузкой (kW). Во время параллельной работы с береговой сетью нагрузка генератора может управляться блоком без дополнительного оборудования. Поддерживаются режимы сглаживания пиковых нагрузок и базовой нагрузки. В режиме сглаживания пиковых нагрузок обеспечивается запуск/останов резервного ДГ в зависимости от нагрузки.

Управление реактивной нагрузкой (kVAr) и управление косинусом фи. При параллельной работе с береговой сетью, контроллер генератора может поддерживать постоянный косинус фи СЭЭС. Контроллеры С6200 FlexGen Compact и FlexGen Advanced также могут обеспечивать схему импорта/экспорта нагрузки по команде от программируемых входов, обеспечивая плавный переход из режима параллельной работы с береговой сетью в режим автономной работы и обратно практически без дополнительных соединений.

Отключение второстепенных потребителей и блокировка пуска мощных потребителей. В функции контроллера модели С6200 FlexGen Advanced входят расширенные возможности управления СЭЭС, такие, как:

- 2 ступени отключения второстепенных потребителей;
- блокировка пуска мощных потребителей;
- блокировка останова ДГ по низкой нагрузке;
- отключение неисправного ДГ (engine error trip).

Аналоговый ввод/вывод. В дополнение к программируемым дискретным входам и выходам контроллеры С6200 FlexGen имеют два аналоговых входа и два аналоговых выхода. Аналоговые входы используются для динамического внешнего управления частотой. Выходы могут использоваться для подключения аналогового прибора постоянной индикации или другого измерительного устройства.

Интерфейс RS485 MODBUS RTU. Все контроллеры С6200 FlexGen имеют интерфейс RS485 MODBUS RTU, с помощью которого возможно внешнее управление, например, с персонального компьютера (PC), SCADA или PLC.

Конфигурация и установка контроллеров С6200 FlexGen. Контроллеры С6200 FlexGen могут конфигурироваться с PC при помощи специализированного программного обеспечения (ПО) WinConfig фирмы SELCO. ПО WinConfig обеспечивает удобный экраный интерфейс и легкий доступ к параметрам через меню.

Конфигурация осуществляется в реальном времени и, соответственно, параметры обновляются сразу после внесения изменений. Полная конфигурация может быть сохранена и считана с нового контроллера в несколько шагов, делая эту программу гибким инструментом как для настройки, путем изменения различных параметров и последующей проверке режимов работы системы, так и при работе с установкой при эксплуатации. Конфигурация контроллера С 6200 FlexGen защищена пин-кодом. Код по умолчанию - «0000», но он может быть легко изменен с

помощью ПО WinConfig. Программное обеспечение SELCO WinConfig может быть получено с сайта SELCO, www.selco.com.

Контроллеры C6200 FlexGen могут также конфигурироваться при помощи панелей C6500 FlexGen UI и C6250. Панель может быть использована как удобный инструмент для выполнения небольших настроек системы, находящейся в работе без встраивания ее в ГРЩ.

Стандартные функции управления САЭЭС тренажера на базе контроллеров C6200 FlexGen Advanced, реализованные в тренажере.

Для следующих режимов управления САЭЭС – SEMI-AUTO (Полуавтоматический), AUTO (Автоматический), SHAFT (Валогенератор), SPLIT (Раздельная шина):

- автоматический контроль приоритетности пуска ДГ и валогенератора;
- пуск/останов ДГ и валогенератора в зависимости от нагрузки;
- отключение второстепенных потребителей (две ступени);
- блокировка пуска мощных потребителей, обусловленное подключением одного или двух мощных потребителей на каждый генераторный агрегат;
- управление генераторами, работающими в параллель с береговой сетью;
- блокировка останова ДГ по низкой нагрузке (например, для полуавтоматического режима работы);
- отключение неисправного ДГ (engine error trip);
- две секции общих шин ГРЩ с секционным выключателем;
- контроль положения шинного выключателя. Контроль и управление одним шиносоединительным выключателем;
- налоговый ввод/вывод. Имеется два аналоговых входа и два аналоговых выхода. Аналоговые входы используются для динамического внешнего управления частотой. Выходы могут использоваться для подключения аналогового прибора постоянной индикации или другого измерительного устройства;
- симметричное или асимметричное распределение нагрузки;
- контроль и управление одним валогенератором на базе асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением, включая параллельную длительную работу;
- контроль обесточивания и функция блокировки одновременного несинхронного включения генераторов после обесточивания;
- распределение активных (kW) и реактивных нагрузок (kVAr);
- управление частотой вращения приводного двигателя генератора и подгонка напряжения (AVR) при помощи импульсов релейных выходов «Больше/Меньше»;

- автоматическая синхронизация, включая как прямую, так и обратную (после восстановления питания) синхронизацию;
- защита генератора от обратной мощности, в том числе защита от обратной реактивной мощности. При параллельной работе с береговой сетью в контроллерах FlexGen Advanced может быть активирована защита: от векторного сдвига; от быстрого изменения частоты RoCoF (df/dt); от перегрузки по активному току; от перегрузки по полному току; от короткого замыкания;
- контроль напряжения и частоты генератора.

Ручной режим работы СЭЭС. Режим Manual. Выбор режима ручного управления позволяет использовать дискретные входы увеличения/уменьшения параметров (если они были предварительно сконфигурированы), а также кнопки ручного пуска/останова генераторного агрегата. При запуске в ручном режиме блок не обеспечивает какое-либо регулирование параметров генераторного агрегата в дальнейшем. Режим работы энергоустановки относится к системе в целом. Это означает, что невозможно выбрать разные режимы энергоустановки на разных блоках управления.

При выборе ручного режима генераторным агрегатом можно также управлять с помощью дискретных входов. В этом режиме выполняются следующие команды:

Команда	Примечание
Start (<i>Пуск</i>) - вход или кнопка	Запуск генераторного агрегата (без регулировки)
Stop (<i>Останов</i>) - вход или кнопка	Размыкание генераторного выключателя и немедленный останов генератора без периода остывания двигателя.
Увеличение скорости вручную	Блок подает сигнал увеличения на регулятор скорости.
Уменьшение скорости вручную	Блок подает сигнал уменьшения на регулятор скорости
Повышение напряжения вручную	Блок подает сигнал увеличения на регулятор напряжения (AVR)
Понижение напряжения вручную	Блок подает сигнал уменьшения на регулятор напряжения (AVR).

Чтобы использовать команды ручного режима, необходимо сконфигурировать соответствующие дискретные входы с помощью компьютерной программы WinConfig. Количество конфигурируемых дискретных входов определяется используемой опцией блока.

В ручном режиме невозможно выполнить замыкание или размыкание как генераторного, так и сетевого выключателя от контроллеров С6200.

Переход в ручной режим (MAN) непосредственно из автоматического режима (AUTO) невозможен. Чтобы переключиться из автоматического режима (AUTO) в ручной режим (MAN), следует сначала перейти в полуавтоматический режим (SEMI-AUTO) и лишь затем, после разблокировки доступа - в ручной режим (MAN).

В приложении П1 приведены примеры нескольких типовых алгоритмов автоматизации САЭЭС.

В тренажерном комплексе САЭЭС для обеспечения требований Кодекса ПДНВ 78, указанных в п.1 настоящего документа, и организации полнофункционального учебного процесса предусмотрен режим работы САЭЭС «SCADA». В этом режиме работы тренажерного комплекса с помощью программируемого логического контроллера Modicon M340 фирмы Schneider Electric, модулей расширения и соответствующей среды для программирования Unity Pro S v.7.0 обеспечивается визуализация и дистанционное управление режимами работы всего тренажерного комплекса или его отдельных устройств. Диспетчерское (операторское) управление и сбор режимных данных оборудования тренажера, а также организация и проведение непосредственного учебного процесса практической подготовки и оценки компетентности обучаемых осуществляется посредством специализированного программного обеспечения – SCADA Expert Vijeo Citect V7.40.

4. Направления, задачи, методика проведения практической подготовки и проверки компетентности судовых инженеров

Направления и содержание обучения судовых инженеров. Направления обучения и проверки компетентности судовых механиков и электромехаников на базе оборудования тренажерного комплекса представлены в таблице 3.

Таблица 3
Направления обучения и проверки компетентности судовых механиков и электромехаников

№ п/п	Содержание направления обучения	Целевая группа
1.	SHIP'S POWER MANAGEMENT SYSTEMS & EMERGENCY DISTRIBUTION СУДОВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ И АВАРИЙНОЕ ПИТАНИЕ	Судовые механики, электромеханики, ответственные за работу, обслуживание и ремонт электро- и электронного оборудования энергетических систем торговых и офшорных судов

2.	PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER (BASIC AND ADVANCED) ПРОГРАММИРУЕМЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ КОНТРОЛЛЕРЫ (базовый и расширенный)	Судовые механики, электромеханики, ответственные за работу, обслуживание, конфигурирование и ремонт современных систем управления на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК) механизмов и комплексов торговых и офшорных судов
3.	MARINE HIGH VOLTAGE INSTALLATIONS: ELECTRICAL SAFETY, MAINTENANCE, ADJUSTING МОРСКИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ УСТАНОВКИ: ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ, ОБСЛУЖИВАНИЕ, НАСТРОЙКА	Судовые механики, электромеханики, ответственные за работу, обслуживание и ремонт электро- и электронного оборудования высоковольтных электроэнергетических систем торговых и офшорных судов
4.	CONTROL COMMUNICATION AND INFORMATION NETWORK ON SHIPBOARD СУДОВЫЕ УПРАВЛЯЮЩИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СЕТИ	Судовые электромеханики, ответственные за работу, обслуживание и ремонт управляющих и информационных сетей торговых и офшорных судов
5.	ENERGY EFFICIENT OPERATION OF SHIPS ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ СУДОВ	Судовые механики и электромеханики, ответственные за энергоэффективную эксплуатацию оборудования и механизмов торговых и офшорных судов
6	Automated electric drive technology ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	Судовые механики, электромеханики, ответственные за работу, обслуживание и ремонт судовых электромеханических систем

Краткий перечень задач, решаемых при реализации указанных в таблице 3 направлений обучения:

4.1. Отработка навыков по анализу современных судовых автоматизированных электроэнергетических систем, современной компоновки САЭЭС, схем распределения электроэнергии, включая высоковольтные. Изучение и практическая отработка действий оператора в различных режимах управления электростанцией. Аварийные сообщения и работа оператора с журналами аварий и событий.

Изучение особенностей настройки защит и параметров регуляторов, генераторных автоматов. Отработка вопросов подключения и настройки микроконтроллеров для решения задач автоматизации типовых электростанций. Изучение и настройка защит и параметров регуляторов высоковольтных систем. Экономичная и безопасная эксплуатация дизель-генераторов, валогенераторов, аппаратов и устройств систем распределения. Анализ ситуаций и практической отработки действий оператора при различных способах управления в различных режимах работы электростанции, включая аварийные. Отработка алгоритмов автоматизации типовых электростанций и настройки микроконтроллеров. Настройка защит и параметров регуляторов с использованием соответствующего программного обеспечения, поиск и устранение неисправностей.

4.2. Получение навыков работы с современными программируемыми логическими контроллерами (ПЛК) на базе контроллеров фирм Mitsubishi Electric, DEIF, SELCO, EPCOS, Schneider Electric серий Alpha2, Q, FX3U, TeSYS U, Modicon M340, C6200, M2500, PPM, BR7000 и др. на примерах управления различными судовыми системами и комплексами. Знакомство с программой для конфигурации микроконтроллеров. Настройка и мониторинг микроконтроллера с помощью сервисного программного обеспечения. Состав и загрузка файлов конфигурации в микроконтроллер. Подключение к микроконтроллерам и использование дополнительных устройств (панели оператора, удаленного дисплея, ПК). Разработка типовых программ для ПЛК различных типов, направленных на решение конкретных судовых задач.

4.3. Приобретение навыков технического использования и обслуживания современных информационных и управляющих систем. Изучение и настройка параметров коммуникационных протоколов обмена данными между микроконтроллерами, отдельными локальными объектами управления, с системой дистанционного управления и мониторинга, используя реальное оборудование и средства автоматизации.

4.4. Использование современных энергосберегающих технологий, применяемых на судах, на примерах частотно-управляемых электроприводов различных судовых механизмов и систем, системы динамической компенсации реактивной энергии и повышения коэффициента мощности судовой электроэнергетической установки.

Одним из важных аспектов тренажерной подготовки является использование практически везде английской терминологии и обозначений, маркировки элементов оборудования, английских руководств, инструкций и т.п., что также является одним из требований Кодекса ПДНВ 78 [1] в части владения английским языком.

Полный пакет программных продуктов, соответствующие дистрибутивы ПО, используемые на тренажерном комплексе приведены на DVD диске. В отдельных

папках диска помещены управляющие программы контроллеров, созданные в процессе их конфигурирования.

На этом же диске размещены соответствующие инструкции по оборудованию и программному обеспечению.

5. Пример реализации целей, задач практической подготовки и проверки компетентности судовых инженеров

Пример программ проведения курсовой подготовки и проверки компетентности судовых электромехаников и механиков приведен в Приложении П2.

Список литературных источников

1. Міжнародна Конвенція про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 (консолідований текст з манільськими поправками) – К.: ВПК «Експрес-Поліграф», 2012. – 568 с.

2. Муха Н.И., Дранкова А.О. О практической подготовке судовых электромехаников и механиков / Электротехнические и компьютерные системы. Инновации в учебном процессе. Научно-технический журнал. – К.: «Техніка» - 2014. – Вып. 15(91). - С. 416 – 422.

3. Муха Н.И., Дранкова А.О. О технико-эксплуатационных требованиях к полномасштабному тренажеру судовой автоматизированной электроэнергетической системы/ Материалы научно-технической конференции «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах» 23.09.2013 – 27.09.2013 – Севастополь: СевНТУ. – 2013. – С. 162 – 167.

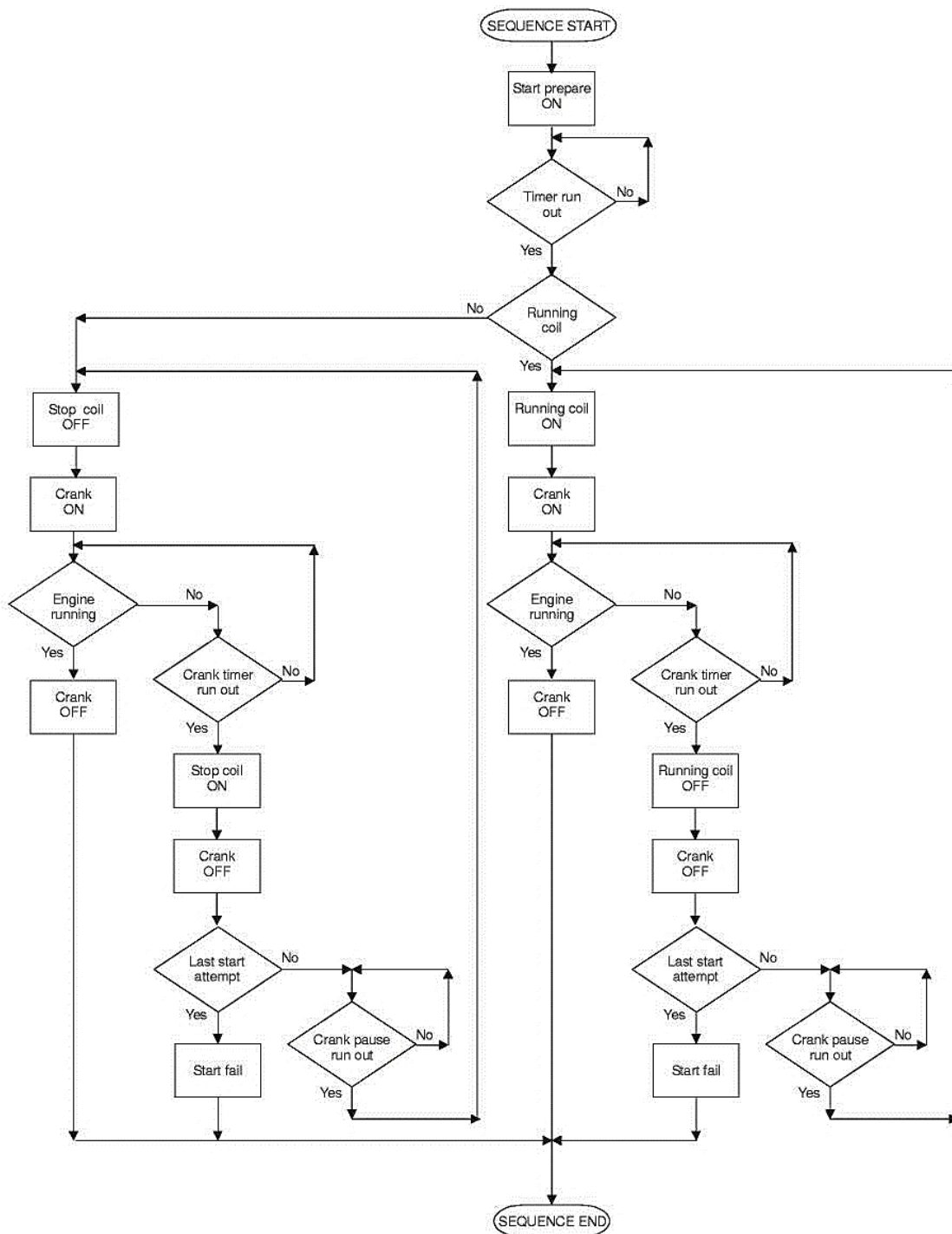
4. Дранкова А.О., Муха Н.И. Использование нейронных сетей прямого распространения для прогнозирования технического состояния судовых дизель-генераторов /Вісник Національного технічного університету «ХП», Збірник наукових праць. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу, Теорія і практика – Х.; НТУ «ХП». – 2013, - № 36 (1009), - С. 505 – 506.

6. ПРИЛОЖЕНИЯ

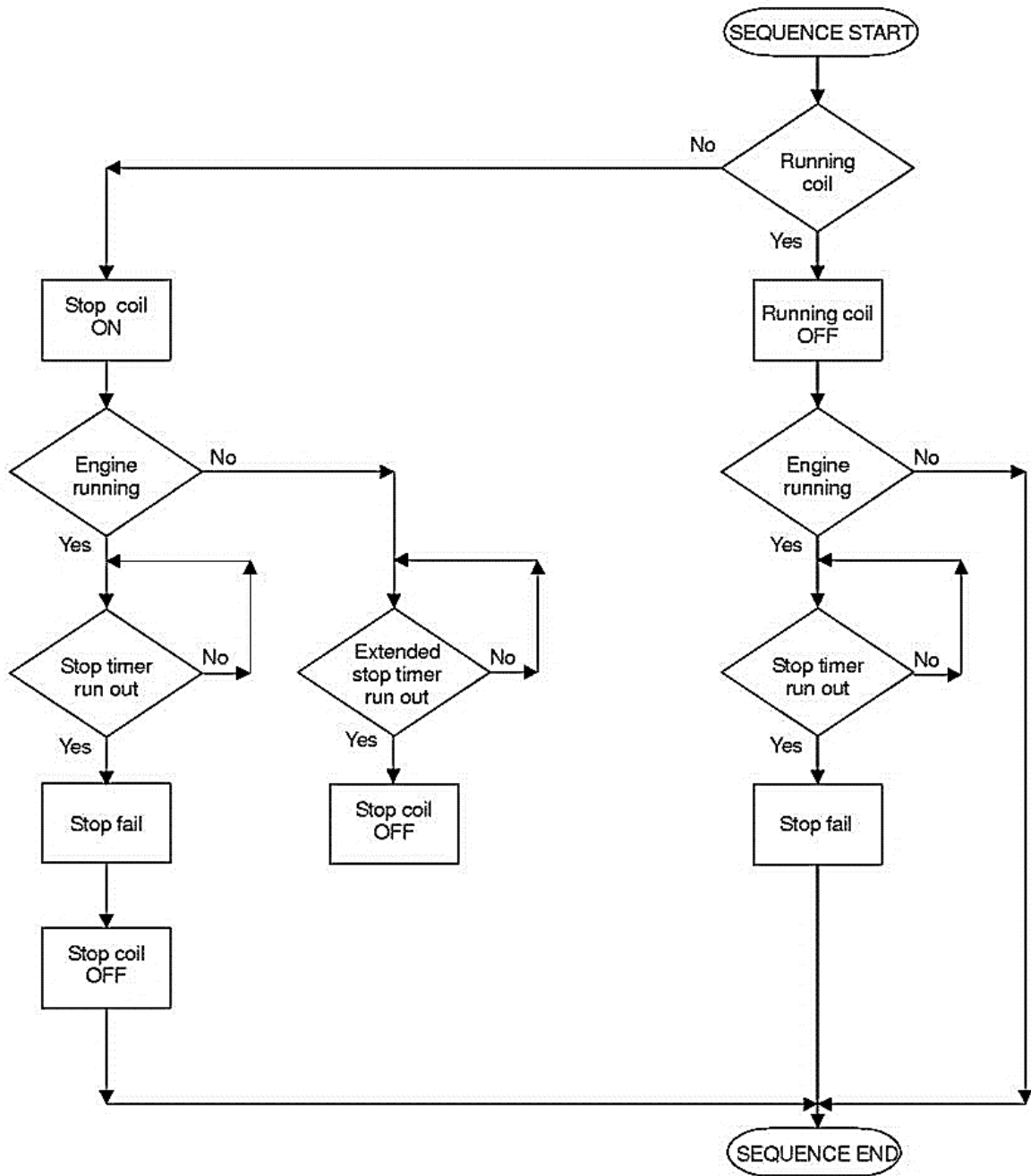
ПРИЛОЖЕНИЕ П1

Алгоритмы автоматизации СЭЭС

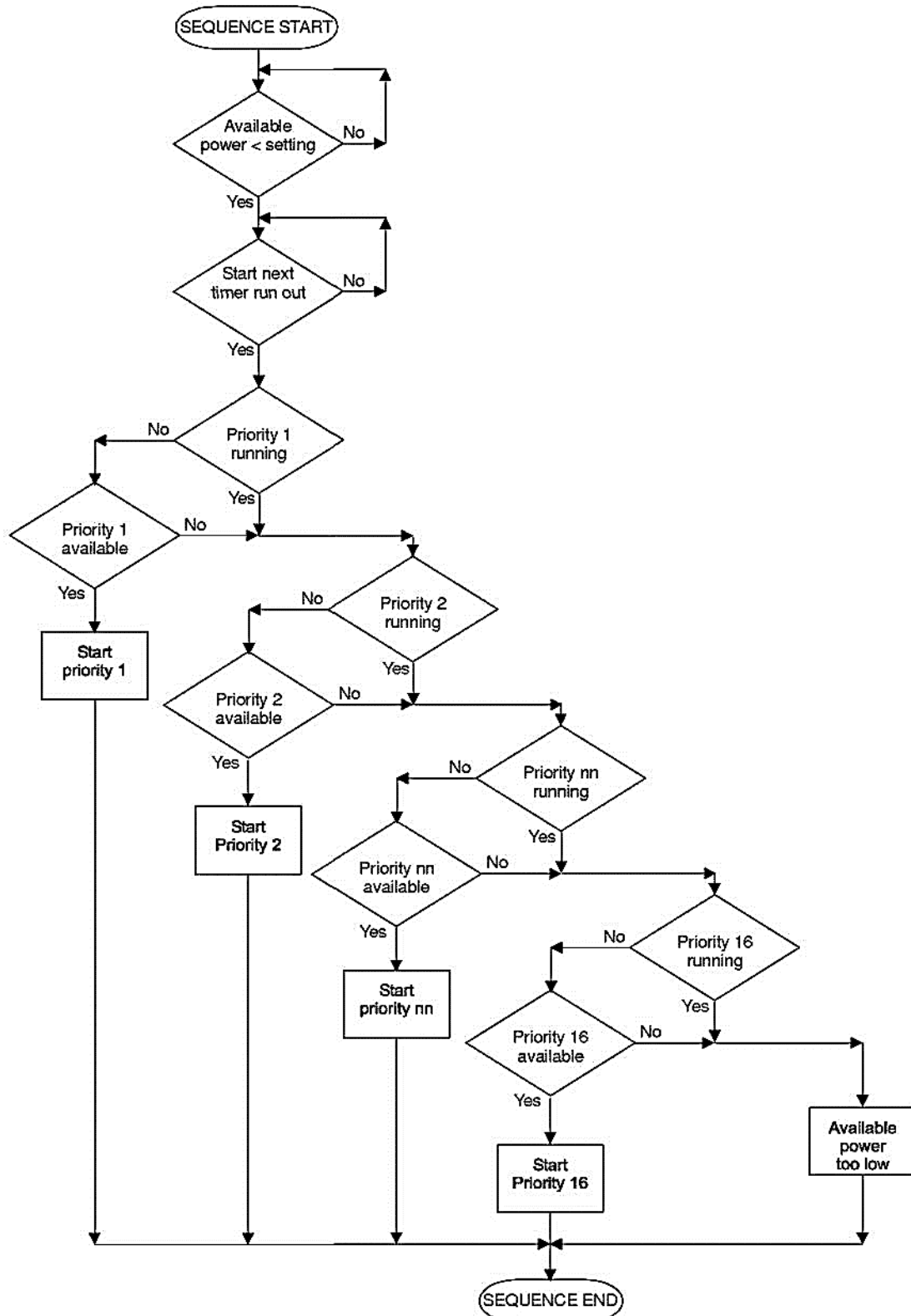
П1.1. Последовательность запуска дизель - генератора



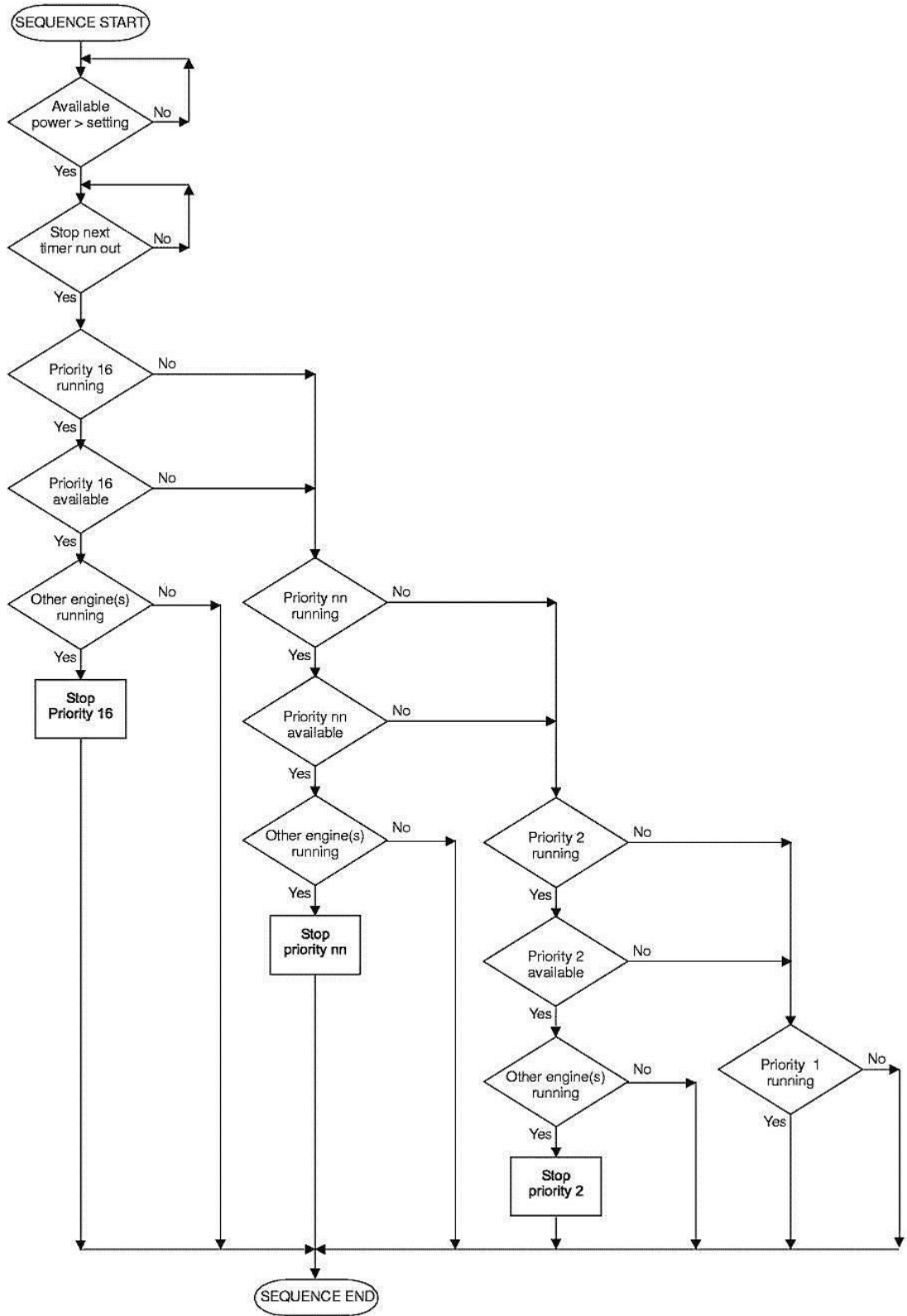
П1.2. Алгоритм останова дизеля

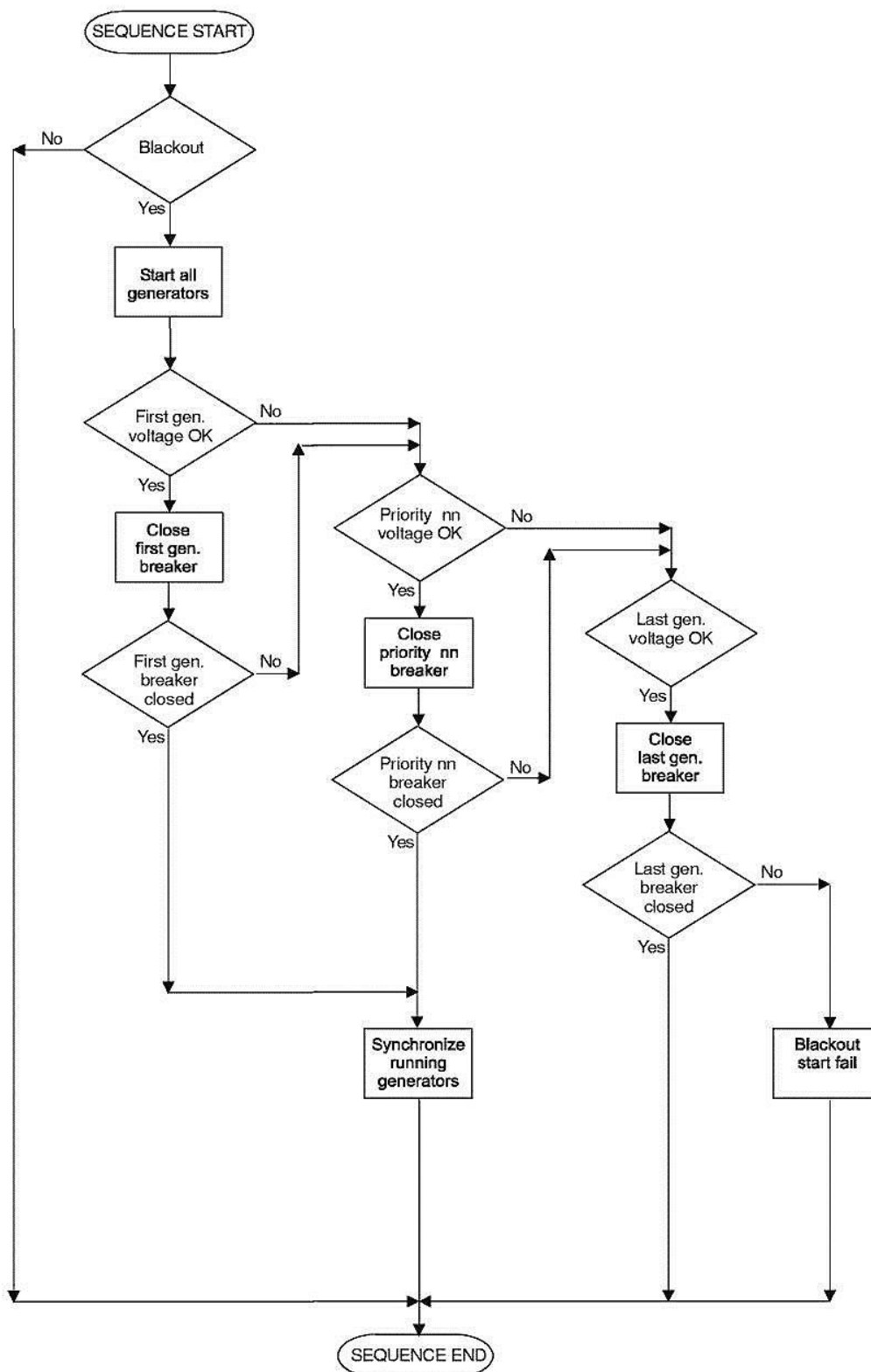


П1.3. Пуск в зависимости от нагрузки сети

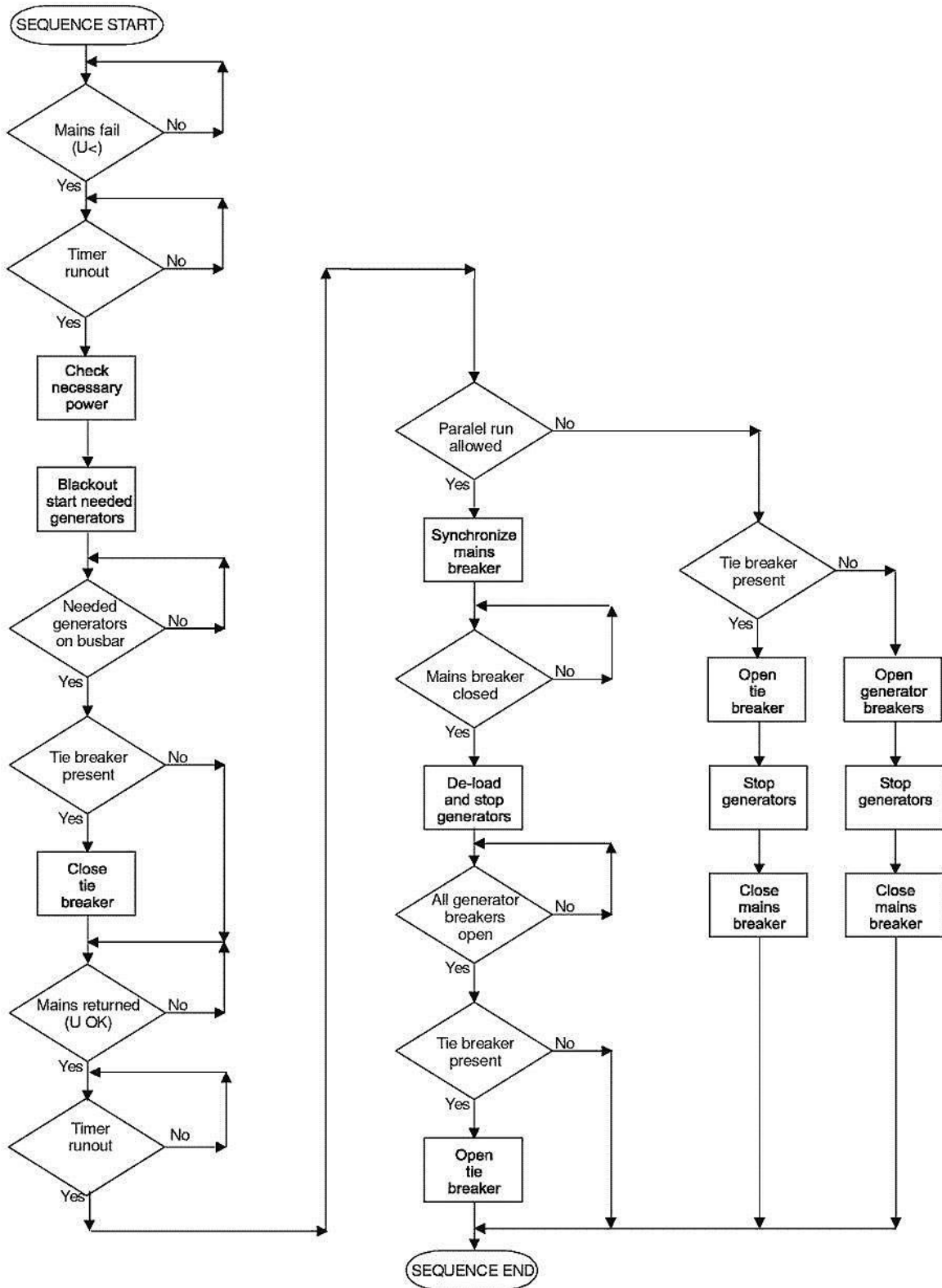


П1.4. Останов, зависящий от нагрузки сети

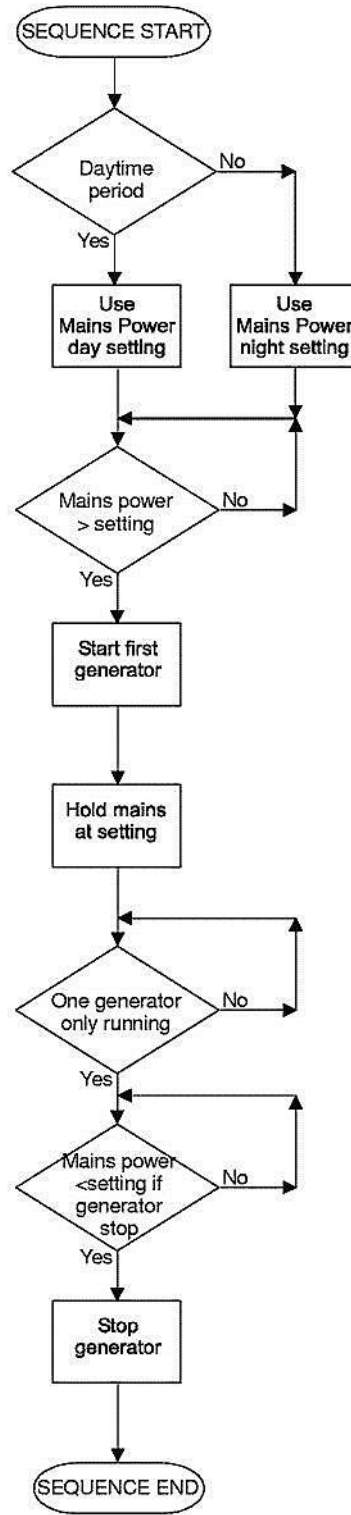




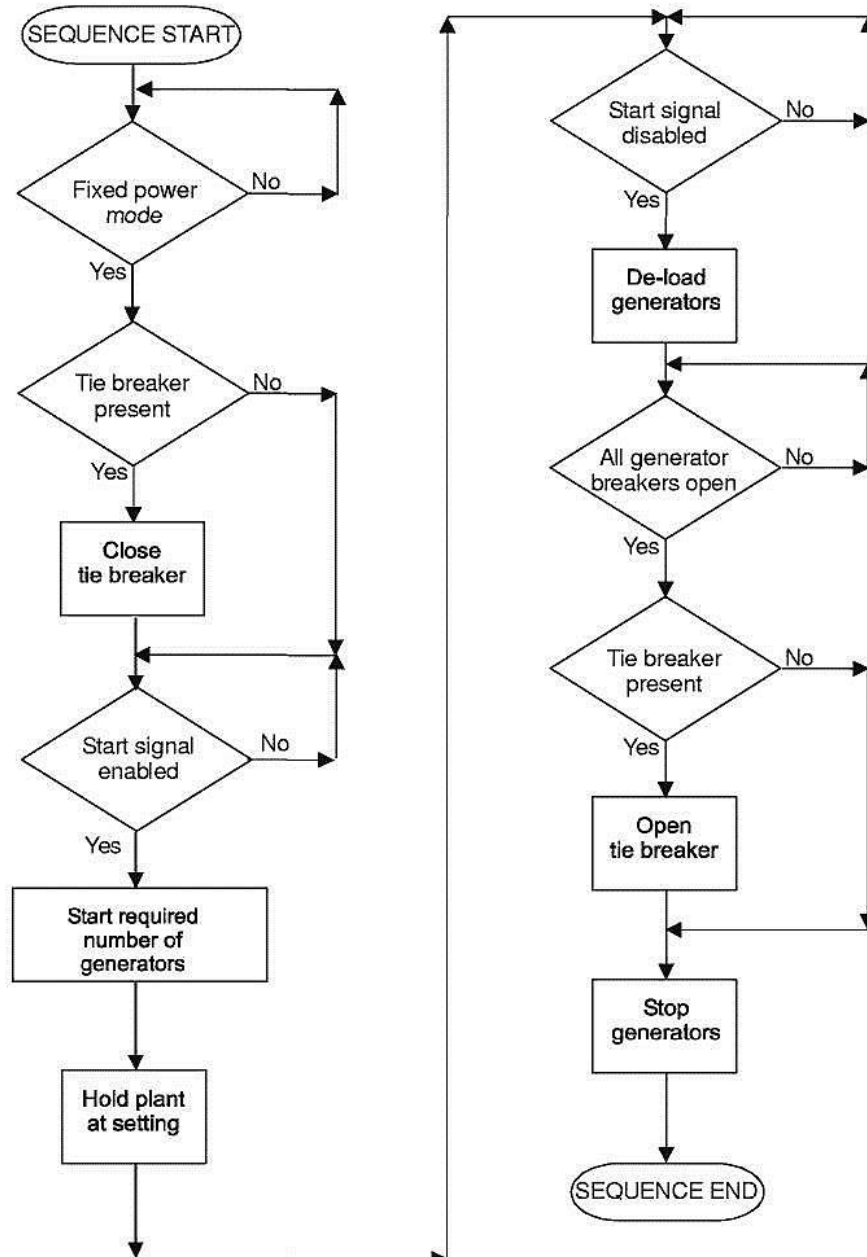
П1.5. Запуск генераторных агрегатов после обесточивания



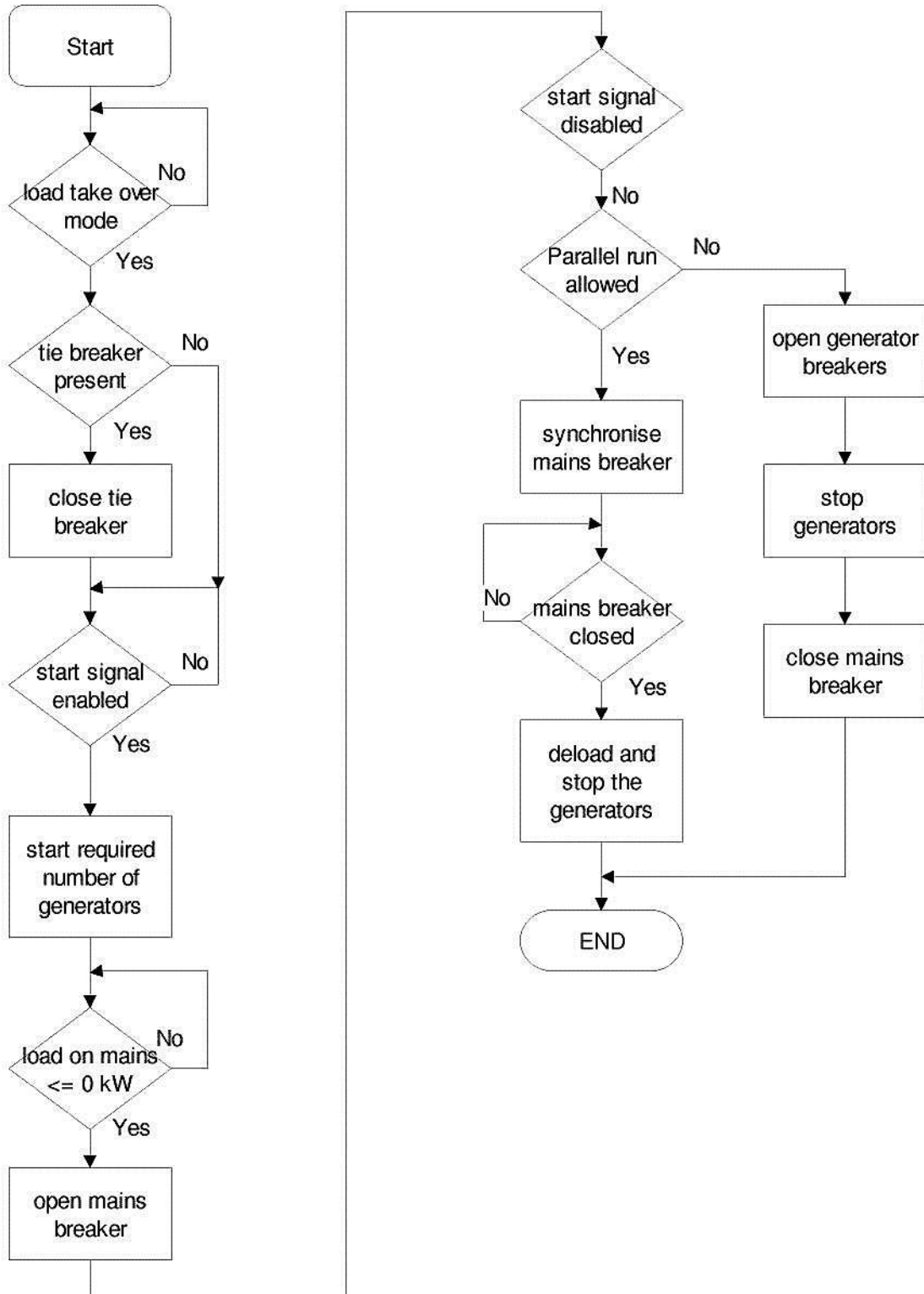
П1.6. Неисправность сети при автоматическом режиме работы



П1.7. Ограничение максимума нагрузки



П1.8. Работа с фиксированием мощности



П1.9. Прием нагрузки



ПРИЛОЖЕНИЕ П2

Odessa Maritime Training Center provides new training courses in connection with commissioning a new Full Mission Simulator Complex of the Ship's Automated Electric Power Plant.

Одесский Морской Тренажерный Центр предоставляет новые курсы в связи с вводом в эксплуатацию нового полномасштабного тренажерного комплекса судовой автоматизированной электроэнергетической установки

Наш сайт: <http://omtc.com.ua/>

SHIP'S POWER MANAGEMENT SYSTEMS & EMERGENCY DISTRIBUTION СУДОВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ И АВАРИЙНОЕ ПИТАНИЕ

Target group/ Целевая группа

Marine engineers, electro-technical officers who are responsible for operation, maintenance and repair of electrical and electronic equipment of marine and offshore vessels electric power plants

Судовые механики, электромеханики, ответственные за работу, обслуживание и ремонт электро- и электронного оборудования электрических станций торговых и офшорных судов

Expected learning outcomes/Ожидаемые результаты обучения

Upon successful completion of the course the participant will be able to/ При успешном окончании курса слушатель будет способен:

- Understand and Explain the basic principles of construction and functioning of the Power Management System (PMS)/ Понимать и объяснять основные принципы построения и функционирования систем управления судовыми электроэнергетическими установками
- Operate the ship's Power Management Systems/ Управлять судовыми автоматизированными электроэнергетическими системами (САЭЭС)
- Configure and programming of the PLC based PMS / Настраивать (конфигурировать) ПЛК и программировать режимы работы САЭЭС
- To diagnose the algorithms and make the adjustment of PMS/ Диагностировать алгоритмы работы и производить наладку системы управления САЭЭС
- Identify and exchange faulty units with spares from stock onboard to bring the system back into operation/ Определять и заменять отказавшие компоненты, используя запасные для приведения системы в работоспособное состояние

- Utilize the system documentation and software for maintenance purposes of PLC based PMS/ Использовать документацию и программное обеспечение при обслуживании систем управления САЭЭС

- Perform periodic maintenance of PMS/ Осуществлять периодическое обслуживание САЭЭС

Course content/ Содержание курса

- Theoretical basics of shipboard automated power systems/ Теоретические основы работы судовых автоматизированных электроэнергетических систем

- Electrical safety and Regulations/ Правила и процедуры по обеспечению электробезопасности

- SOLAS Regulations and classification societies requirements for electric power plants/ Требования СОЛАС и классификационных обществ к электрическим станциям

- Study of layout options and operating modes of the electric power plant/ Изучение вариантов компоновки и режимов управления электростанции

- A brief overview of controllers and automation systems, which are used for control of diesel engines and excitation systems / Краткий обзор контроллеров и систем автоматизации, которые применяются для управления дизель-генераторами и в системах возбуждения генераторов

- Study instructions for installation and connection of the controllers. The study programs for the configuration of the controllers/ Изучение инструкций по установке и подключению контроллеров. Изучение программ для конфигурации контроллеров

- Protection setting and parameters of the controllers. Functions of the PMS. Alarm messages and Troubleshooting. Working with logs, alarms and messages/ Настройка защит и параметров регуляторов. Функции системы управления мощностью электростанции. Аварийные сообщения и поиск неисправностей. Работа с журналами аварий и сообщений

- Paralleling and load sharing/ Параллельная работа генераторов и распределение нагрузки

- Power distribution systems for conventional and electrical propulsion. Main Switchboard and Emergency Switchboard/ Системы распределения энергии для традиционных судов и судов с электродвижением. Главный и аварийный распределительные щиты

- Modern generator air circuit breakers (ACB) equipped with a Micrologic control units/ Современные генераторные автоматические выключатели и их микроконтроллерные устройства управления

- Practicing on the simulator standard and emergency management operations in various modes of electric power plant operation. Work with display and additional operator

panel. Managing power with a PC (SCADA). The study of electrical circuits and documentation / Отработка на тренажере стандартных и аварийных операций управления в различных режимах работы электростанции. Работа с дисплеем и дополнительной панелью оператора. Управление электростанцией с ПК. Изучение электрических схем и документации.

- The practical skills for maintenance and adjustment of ACB control devices, speed controllers of diesel engines, automatic voltage regulators and other automation devices on the simulator complex equipment / Отработка практических навыков по обслуживанию и наладке управляющих устройств генераторных автоматов, регуляторов оборотов дизелей, регуляторов напряжения генераторов и других устройств автоматики на оборудовании тренажерного комплекса

Course duration and price/ Продолжительность и цена курса

Course duration is 4 days/32 hours and price is 520 USD.

Продолжительность курса 4 дня /32 часа и цена 520 долларов США.

Training equipment/ Тренажерное оборудование

Full mission ship's automated electric power plant simulator, including/ Полнофункциональный тренажер судовой автоматизированной электроэнергетической установки включающий:

- 2 diesel generating sets, model GMS10PX (Power Link Machine Co, Ltd) with brushless synchronous generators, model P.I044E1 (Stamford)/ 2 дизель-генератора с безщеточными синхронными генераторами

- asynchronous shaft generator with frequency-controlled drive (Altivar 71 – Schneider Electric) / асинхронный валогенератор с частотно-управляемым электроприводом

- 13 sections of Main Switchboard (4 HV sections and 9 LV sections) and 1 section of Emergency Switchboard / 13 секций ГРЩ (из которых 4 секции высоковольтные) и одна секция АРЩ

- 2 engine controllers M2500 SELCO and 2 controllers DSE7320 of diesel generating sets(Deep Sea Electronics) / Контроллеры приводных дизелей и дизель-генераторных установок

- FlexGen controllers SELCO C6200 of PMS/ Контроллеры автоматизированной электростанции



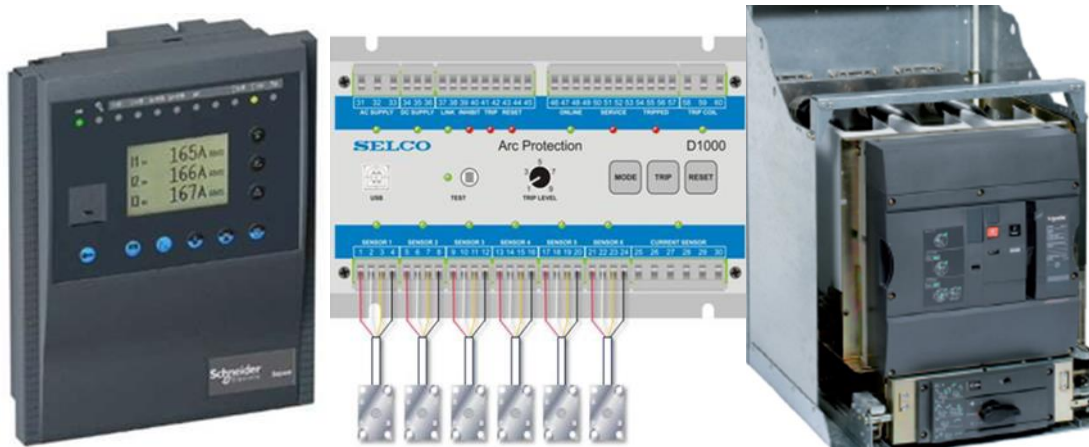
- Dynamic power factor correction (PFC) system consist with power factor controller BR7000 series – T15/S485, V7.0, thyristor modules TSM – LC-I type, multipurpose measuring interface MMI7000-S, (EPCOS) / Контроллер и многофункциональный измеритель системы динамической компенсации реактивной мощности

- High voltage distribution MCset and Vacuum air circuit breaker EVOLIS 7,2 kV (Schneider Electric)/ Высоковольтная секция, вакуумный автоматический выключатель

- Motorpact series distribution. Reduced voltage soft starter RVSS with vacuum main and by-pass contactors (Schneider Electric)/ Высоковольтная секция мягкого пуска (тиристорный преобразователь напряжения) с вакуумными основным и шунтирующим контакторами

- Control & protection devices SEPAM 20 and SEPAM 40 of high voltage systems (Schneider Electric)/ Устройства управления и защиты высоковольтных систем

- D1000 arc protection controller (SELCO) is an advanced and fast arc protection for ship HV electrical power distributions / Защита от электрической дуги в судовых высоковольтных системах



• Ship's consumers. Group Starter Panels: 12 automated electric drives with typical ship machinery load/ Судовые силовые потребители. Панели 12 автоматизированных электроприводов с типовой характерной нагрузкой судовых механизмов



• M3000 (SELCO) and AL8-2 (DEIF) Alarm and Monitoring System / Система аварийной сигнализации и мониторинга

• Management training equipment as a whole or parts thereof, monitoring sensitive data equipment of simulator, as well as managing the training process of practical training and assessment of competence is carried out by means of specialized software - SCADA Expert Vijeo Citect V7.40, using microcontroller Modicon M340 (Schneider Electric) and fully complies with the requirements of the STCW 2010 (Section A-I/12, Part 1 - performance requirements)./ Управление оборудованием тренажерного комплекса в целом или его отдельными частями, мониторинг режимных параметров оборудования тренажера, а также управление проведением учебного процесса практической подготовки и оценки компетентности обучаемых осуществляется посредством специализированного программного обеспечения SCADA с использованием микроконтроллера Modicon M340 и в полном объеме соответствует требованиям раздела А-1/12 Конвенции ПДНВ 2010.



Certification/Сертификация

On successful completion of the course and assessments a document will be issued certifying that the holder has successfully completed a course of training which meets or exceeds the level of knowledge and competence for operation, maintenance and repair of electrical and electronic equipment of marine and offshore vessels automated electric power plants, according the requirements of International Convention STCW 2010. / При успешном завершении курса и оценок компетентности будет выдан документ удостоверяющий, что обладатель успешно завершил курс обучения, который соответствует или превышает уровень знаний и компетенции для работы на судовых и офшорных автоматизированных электроэнергетических установках, согласно требованиям Конвенции ПДНВ 2010.

Participant number limitation / Количество слушателей

5-8 participants

Facilities and Equipment: Electrical classroom equipped multimedia and computerized work places, LV and HV main switchboard (0,4 and 7,2 KV) with modern electric drives consumers/ **Аппаратура и оборудование:** мультимедийный класс с компьютеризированными рабочими местами; низко и высоковольтный ГРЩ с современными электроприводами в качестве потребителей

Language/ Язык преподавания

English, Russian/ Английский, русский

Programmable Logic Controller (basic and advanced) программируемые логические контроллеры (базовый и расширенный)

Target group/ Целевая группа

Marine engineers, electro-technical officers who are responsible for operation, maintenance, configuration and repair of PLC based control systems of mechanisms and complexes for marine and offshore vessels / Судовые механики, электромеханики, ответственные за работу, обслуживание, конфигурирование и ремонт современных

систем управления на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК) механизмов и комплексов торговых и офшорных судов

Expected learning outcomes/Ожидаемые результаты обучения

Upon successful completion of the course the participant will able to/ При успешном окончании курса слушатель будет способен:

- Understand and Explain the basic principles of construction and functioning of the PLC based Control System / Понимать и объяснять основные принципы построения и функционирования систем управления на базе ПЛК

- Operate the ship's PLC based Control Systems/ Управлять судовыми автоматизированными системами на базе ПЛК

- Understand and execute the PLC configuration, programming the PLC based Control Systems /Понимать и выполнять конфигурацию ПЛК, программировать режимы работы систем управления на базе ПЛК

- Diagnose the algorithms and make the adjustment of PLC based Control Systems/ Диагностировать алгоритмы работы и производить наладку систем управления на базе ПЛК

- Identify and exchange faulty modules of PLC with spares from stock onboard to bring the system back into operation/ Определять и заменять отказавшие компоненты ПЛК модулей, используя запасные для приведения системы в работоспособное состояние

- Utilize the PLC software and documentation for maintenance and configure purposes/ Использовать программное обеспечение и техническую документацию ПЛК при обслуживании и конфигурировании

The basic course is designed to give an overall understanding of the functions and capabilities of the PLC and important safety aspects of its operation. This course will teach participant the basics about PLCs (Programmable Logic Controllers), how they are constructed and used in industry and marine, how to create FBD (Function Block Diagram) programs, use Timers, Counters, Internal Relays, Delay Blocks, IN/OUT digital and analog modules. The participant will gain experience in using licensed PLC software, which allows his to write PLC programs on PC and handle Data etc. Participant will gain experience in using a PLC Support Tool, which allows him to write PLC programs on PC. Learn to identify the different types of PLC and understand how the PLC works as opposed to a PC /Базовый курс разработан, чтобы дать слушателю общее понимание функций и возможностей ПЛК, важных аспектов безопасности его эксплуатации. Этот курс научит слушателя основам работы с ПЛК, как они устроены и используются в промышленности и судостроении, как создать FBD (Function Block Diagram) программы, использовать таймеры, счетчики, внутренние реле, блоки задержки, цифровые и аналоговые модули ввода/вывода. Слушатель будет набираться опыта в использовании лицензированного программного обеспечения ПЛК, которое позволит ему писать ПЛК-программы на ПК и обрабатывать данные и т.д. Научиться определять различные типы ПЛК и понять, как ПЛК работает в отличие от ПК

Basic Course content/ Содержание базового курса:

- Background and functions of PLC/ Предыстория создания и функции ПЛК

- PLC fundamental, structure and type of PLC/ Основы ПЛК, структура и типы ПЛК
- How to select the most appropriate PLC model/ Как выбрать наиболее подходящую модель ПЛК
- Principles and steps of using PLC/ Принципы и шаги использования ПЛК
- Design PLC based control system and PLC's programming/ Дизайн и программирование ПЛК систем управления
- General data of CPU and I/O modules/ Общие данные CPU и I/O модулей
- Input and Output modules of PLC and principle of its connection and operation / Модули ввода и вывода ПЛК, принципы их подключения и эксплуатации
- Configuration of PLCs/ Конфигурация ПЛК
- PLC Hardware (Alpha2 and FX3U, Mitsubishi Electric): main unit (CPU), extension units, special function modules / Аппаратная часть ПЛК на примере Mitsubishi Alpha2 and FX3U: главный модуль, модули расширения, специальные функциональные модули
- Modular PLC Hardware (System Q/L, Mitsubishi Electric): base units, power supplies, processors, discrete and analog I/O modules, intelligent modules, memory types / Аппаратная часть ПЛК модульного типа на примере System Q/L, Mitsubishi Electric: шасси, модули питания, процессор, цифровые и аналоговые модули ввода/вывода, интеллектуальные модули, типы памяти
- Numeric systems and numeric formats / Системы счисления, числовые форматы и коды
- Fundamentals of logic design / Основы логики
- Programming methods / Методы программирования
- Applicable programming software / Прикладное программное обеспечение
- Function Block Diagram programming, block types and the FBD base (Alpha2, Mitsubishi Electric) / Программирование с использованием функциональных блоков. Типы и набор функциональных блоков
- Direct programming / Прямое программирование
- Creating a Sample Programs / Создание примеров прикладных программ
- Basic ladder program instructions and simulator exercises / Базовые инструкции языка программирования «ladder step diagram» и примеры программирования
- Application of PLC on shipboard (advanced) / Применение ПЛК на судне
- Programming PLC, uploading and down-loading data (advanced) / Программирование ПЛК, загрузка и считывание данных (advanced);
- Care and maintenance of PLC based systems/ Уход и обслуживание систем на базе ПЛК

Advanced Course content (Mitsubishi Electric FX Family)/ Содержание расширенного курса

This course was intended to introduce some of the advanced concepts of the FX Family PLC. This class will be taught using the FX3U controller, GX Works 2, GX (GX IEC) Developer and GX Designer licensed software / Этот курс предназначен для знакомства с концепциями ПЛК Mitsubishi Electric продвинутого уровня семейства FX

В изложении курса используется контролер FX3U, а также лицензированное программное обеспечение GX Works 2, GX (GX IEC) Developer и GX Designer.

Learn how to write ladder logic to industrial standards, how to correctly apply timers, counters, function blocks and programming instructions to create working programs; how to use the logic functions simplification methods to execute programs much faster / Вы узнаете как писать программу в соответствии с промышленными стандартами, как правильно использовать таймеры, счетчики, функциональные блоки и программные инструкции для создания работоспособной программы, как использовать методы упрощения логических функций для сокращения времени выполнения программы.

If you intend to work with PLCs then learning to understand ladder logic, recognize errors when faultfinding and writing PLC routines is important. Not only will you learn how to do these on these courses, but you will also learn how to write ladder programs for industrial process control and how to write them to Industrial standards /Если вы намерены работать с PLC, то важным является понимание леддер-логики, обнаружение ошибок при поиске неисправностей и написание стандартных программ для PLC. Из этого курса Вы не только научитесь выполнять эти действия, но также научитесь создавать программы для PLC на языке леддер-логики для управления типовыми технологическими процессами в соответствии с промышленными стандартами

You will gain experience in using a PLC programming software GX Works 2, GX (GX IEC) Developer and GX Designer, which allows you to write actual PLC programs on your PC / Вы получите практический опыт использования программного обеспечения GX Works 2, GX (GX IEC) Developer и GX Designer, который позволит Вам создавать программы для PLC на Вашем персональном компьютере

Prerequisites / Предварительные требования: Basic PLC knowledge / Базовые знания о ПЛК

Course Main Topics / Основные темы курса:

- FX3U major features and generic specifications /Основные особенности и технические характеристики FX3U
- Power supply and Input/Output specifications / Характеристики входов, выходов и питания
- System configuration / Конфигурация системы
- Main units and extension devices / Базовые модули и модули расширения
- Example of system configuration / Примеры конфигурации системы
- Examples of wiring for various uses / Примеры соединений для различных приложений
- Data transmission / Передача данных
- Network settings and network connections /
- System addressing / Системная адресация
- Memory areas / Пространство памяти
- Micro PLC addressing / Адресация в микро-ПЛК
- Modular PLC addressing / Адресация в ПЛК модульного типа
- Right and left side bus FX3U/ Правая и левая шины FX3U

- Special function modules / Специальные функциональные модули
- Q and L series configuration / Конфигурация систем для ПЛК серии Q и L
- Programming software GX Works2: software installation and connection to / Программное обеспечение GX Works2: инсталляция и подключение к FX и к Q/L серии
- Ladder logic basics: PLC instructions types; basic instructions; develop and edit programs / Основы программирования на языке леддер-логики: типы инструкций, базовые команды, отладка и редактирование программы
- Timers and counters / Таймеры и счетчики
- Applied instructions and function blocks / Прикладные инструкции и функциональные блоки
- Creating a sample program / Создание примеров прикладных программ
- Graphic operation terminal GOT1000 / Графическая панель оператора GOT1000
- GT Designer software / Программное обеспечение GT Designer
- GX Developer and GX IEC Developer Software / Программное обеспечение GX Developer и GX IEC Developer

Basic Course duration and price/ Продолжительность и цена базового курса

Course duration is 3 days/24 hours and price is **390 USD**.

Продолжительность курса 3 дня /24 часа и цена **390** долларов США.

Advanced Course duration and price/ Продолжительность и цена расширенного курса

Course duration is 3 days/24 hours and price is **390 USD**.

Продолжительность курса 3 дня /24 часа и цена **390** долларов США.

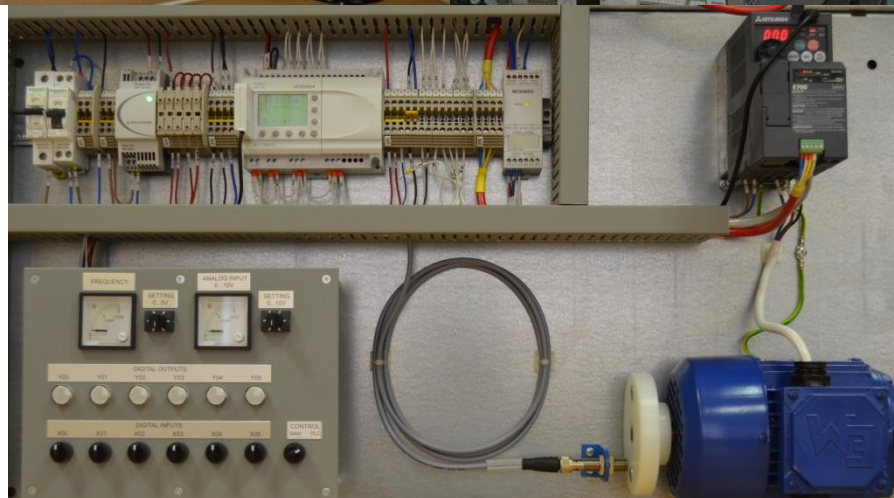
Training equipment/ Тренажерное оборудование

Full mission simulator complex of ship's automated electric power plant, including/ Полнофункциональный тренажерный комплекс судовой автоматизированной электроэнергетической установки включающий:

- Electromechanical System Laboratory with 6 controllers FX3U, 6 controllers Alpha2, 6 Human Machine Interfaces GT14, 6 Frequency Converters FR-E720 (Mitsubishi Electric)/Лаборатория электромеханических систем с 6 ПЛК серии FX3U, 6 микроконтроллерами серии Alpha2, 6 графическими панелями оператора GT14, 6 преобразователями частоты серии FR-E720

- 2 engine controllers M2500 SELCO and 2 controllers DSE7320 of diesel generating sets(Deep Sea Electronics) / Контроллеры приводных дизелей и дизель-генераторных установок

- FlexGen controllers SELCO C6200 of PMS/ Контроллеры автоматизированной электростанции



- Software: iQ Works, FR Configurator (Mitsubishi Electric)/ Лицензированное программное обеспечение

- Dynamic power factor correction (PFC) system consist with power factor controller BR7000 series – T15/S485, V7.0, multipurpose measuring interface MMI7000-S, (EPCOS) / Контроллер и многофункциональный измеритель системы динамической компенсации реактивной мощности

- Control & protection devices SEPAM 20 and SEPAM 40 of high voltage systems (Schneider Electric)/ Устройства управления и защиты высоковольтных систем

- D1000 arc protection controller (SELCO) is an advanced and fast arc protection for ship HV electrical power distributions / Защита от электрической дуги в судовых высоковольтных системах

- Ship's consumers with PLC based control. Group Starter Panels: 12 automated electric drives with typical ship machinery load/ Судовые силовые потребители с ПЛК управлением. Панели 12 автоматизированных электроприводов с типовой характерной нагрузкой судовых механизмов

- M3000 (SELCO) and AL8-2 (DEIF) Alarm and Monitoring System / Система аварийной сигнализации и мониторинга

- Hardware management training system as a whole or parts thereof, monitoring sensitive data equipment of simulator, as well as managing the training process of practical training and assessment of competence is carried out by means of specialized software - SCADA Expert Vijeo Citect V7.40, using microcontroller Mod-icon M340 (Schneider Electric) and fully complies with the requirements of the STCW 2010 (Section A-I/12, Part 1 - performance requirements)./ Управление оборудованием тренажерного комплекса в целом или его отдельными частями, мониторинг режимных данных оборудования тренажера, а также управление проведением учебного процесса практической подготовки и оценки компетентности обучаемых осуществляется посредством специализированного программного обеспечения SCADA с использованием микроконтроллера Modicon M340 и в полном объеме соответствует требованиям раздела А-1/12 Конвенции ПДНВ 2010.

Certification/Сертификация

On successful completion of the course and assessments a document will be issued certifying that the holder has successfully completed a course of training which meets or exceeds the level of knowledge and competence for operation, maintenance and repair of electrical and electronic equipment of marine and offshore vessels automated electric power plants, according to the requirements of International Convention STCW 2010. / При успешном завершении курса и оценок компетентности будет выдан документ удостоверяющий, что обладатель успешно завершил курс обучения, который соответствует или превышает уровень знаний и компетенции для работы на судовых и офшорных автоматизированных электроэнергетических установках, согласно требованиям Конвенции ПДНВ 2010.

Participant number limitation / Количество слушателей

6-10 participants

Facilities and Equipment: Electrical classroom equipped multimedia and computerized work places, Electromechanical System Laboratory with 6 controllers FX3U, 6 controllers Alpha2, 6 Human Machine Interfaces GT14, 6 Frequency Converters FR-E720 (Mitsubishi Electric), LV and HV main switchboard (0,4 and 7,2 KV) with modern electric drives consumers/ Аппаратура и оборудование: мультимедийный класс с компьютеризированными рабочими местами; лаборатория электромеханических систем; низко и высоковольтный ГРЩ с современными электроприводами в качестве потребителей

Language/ Язык преподавания

English, Russian/ Английский, русский



Marine high voltage INSTALLATIONS: electrical safety, maintenance, adjusting МОРСКИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ УСТАНОВКИ: ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ, ОБСЛУЖИВАНИЕ, НАСТРОЙКА

The Course is designed to give knowledge and understanding of marine/offshore High Voltage (HV) installations and safety working procedures, which are includes: operation, maintenance, testing, adjusting and troubleshooting/ Курс разработан для того, чтобы дать слушателю знания по морским/офшорным высоковольтным установкам и безопасным рабочим процедурам по их обслуживанию, тестированию, настройке, поиску и устранение неисправностей.

The course will emphasize the safety aspect of electrical engineering work, recommendation on good safe practices, procedures and precautions be taken to maximize the safety of personnel. The course will provide both theoretical and practical instructions in safe training environment. The course includes theoretical part and practical hands-on exercises with an actual High Voltage Panels / В курсе будет сделан акцент на аспекты безопасности инженерной деятельности в высоковольтных установках, рекомендации хорошего практического опыта, процедуры и меры, принимаемые для усиления безопасности персонала и оборудования. В курсе будут обеспечены теоретические и практические инструкции для безопасной среды обучения. Курс состоит из теоретической части и практического натурального обучения на реальных высоковольтных панелях

Target group/ Целевая группа

Marine engineers, electro-technical officers who are responsible for operation, maintenance and repair of electrical and electronic equipment of marine and offshore vessels High Voltage (HV) Electric Power Plants /Судовые механики, электромеханики, ответственные за работу, обслуживание и ремонт электро- и электронного

оборудования высоковольтных электроэнергетических систем торговых и офшорных судов

Expected learning outcomes/Ожидаемые результаты обучения

Upon successful completion of the course the participant will be able to/ При успешном окончании курса слушатель будет способен:

- Understand the functional, operational and safety requirements for marine/offshore HV systems/ - Понимать требования по безопасности, функционированию, управлению, предъявляемых к высоковольтным системам и программному обеспечению

- Safely & efficiently operate, maintain & troubleshoot HV equipment./ Уметь осуществлять безопасное и эффективное управление, обслуживание и устранение неисправностей в высоковольтном оборудовании

- Understand and explain the basic principles of construction and functioning of the High Voltage Power Management and Distribution System (HVPMDS)/ Понимать и объяснять основные принципы построения и функционирования высоковольтных систем распределения и управления электроэнергией

- Operate the marine and offshore vessels HVPMDS and HV Electric Drives/ Управлять высоковольтными автоматизированными электроэнергетическими установками и электроприводами торговых и офшорных судов

- Configure the PLC based of HVPMDS and HV Electric Drives/ Программировать режимы работы систем распределения и управления судовыми высоковольтными электроэнергетическими установками и электроприводами на базе ПЛК

- To diagnose the algorithms and make the adjustment of HVPMDS/ Диагностировать алгоритмы работы и производить наладку системы распределения и управления судовыми высоковольтными электроэнергетическими установками и электроприводами

- Taking remedial action necessary during faults in HV system. Identify and exchange faulty units of HVPMDS with spares from stock onboard to bring the system back into operation/ Выполнения восстановительных действий, необходимых при неисправностях в системе. Определять и заменять отказавшие компоненты систем распределения и управления судовыми высоковольтными электроэнергетическими установками и электроприводами, используя запасные для приведения системы в работоспособное состояние.

- Utilize the PLC software and documentation of HVPMDS for maintenance and configure purposes/ Использовать программное обеспечение и техническую документацию систем распределения и управления судовыми высоковольтными электроэнергетическими установками и электроприводами при обслуживании и конфигурировании

- Perform periodic maintenance of HVPMDs/ Осуществлять периодическое обслуживание систем распределения и управления судовыми высоковольтными электроэнергетическими установками и электроприводами

- Produce a switching strategy for isolating components of HV system and issuing safety documentation. Carry out an isolation and earthing procedure on a marine/offshore HV installations / Реализации стратегий по отключению компонентов высоковольтной системы и подготовки необходимых разрешительных документов, выполнение процедур отключения и заземления в морских/офшорных высоковольтных установках

- Perform insulation resistance and polarization index test on HV equipment/ Проведение тестов сопротивления изоляции и определение индекса поляризации в высоковольтном оборудовании

- Collect, handle and use the process information and alarm messages/ Сбор и анализ информации о процессах и аварийных сообщениях

- Assign of suitably qualified personnel to carry out repair, testing and adjusting of HV switch gear and controls / Оказание поддержки высококвалифицированному персоналу по выполнению ремонтов, тестированию, настройке высоковольтной аппаратуры и устройств управления

Course content/ Содержание курса

- Philosophy of high voltage distribution. Theoretical basics of shipboard high voltage automated power systems/ Философия распределения энергии высокого напряжения. Теоретические основы работы судовых высоковольтных автоматизированных электроэнергетических систем

- Principles of the Safe Operation of Marine/Offshore High Voltage Power Systems. Risks & hazards associated with High Voltage. Electrical safety and Regulations/Принципы безопасной эксплуатации высоковольтных энергетических систем судов торгового и офшорного флота. Риски и опасности, связанные с высоковольтными системами. Правила и процедуры по обеспечению электробезопасности

- SOLAS Regulations and classification societies requirements for HV electrical power plants/Требования СОЛАС и классификационных обществ к высоковольтным электрическим установкам

- Basic fault calculations/ Основы расчета токов короткого замыкания

- Marine/offshore application of electrical protection/ Применение электрических защит

- Principles of power management systems /Принципы работы систем управления электрическими станциями

- Electrical testing principles/ Принципы тестирования высоковольтного электрооборудования

- Treatment of the system neutral point/ Использование нейтрали в высоковольтных станциях
- Legislative background and Code of Safe Working Practices and PPE/ Законодательная база, принципы безопасной работы и использования персональных защитных средств
- HV Generator, Motor, Transformer: protection and features /Высоковольтные генераторы, трансформаторы, двигатели: конструкция, защита, особенности
 - HV Switch gear, Circuit Breakers, Contactors and Earthing Devices: construction, operation, maintenance and tests. Low voltage control circuit/ Высоковольтные устройства, автоматические выключатели, контакторы, заземлители: конструкция, управление, обслуживание, тестирование. Низковольтные цепи управления
- Fault levels at different locations and protection system topology/ Уровни отказов на различных участках и топология защитной системы
 - Voltage and Current Transformers, overview of protection relays. IDMTL characteristics. ANSI C37.2 code/ - Трансформаторы тока и напряжения. Обзор реле защиты. Обратные время-токовые характеристики. Стандарт ANSI 37.2.
 - Electronic protection and control relays (SEPM etc). Configuration, adjustment with SFT software, testing, diagnosing/ -Электронные защитные реле (SEPM и другие): конфигурирование, настройка с помощью программного обеспечения, тестирование, диагностика.
 - An introduction to High Voltage Variable Frequency Drive (PWM) and soft starters. SCR Soft Starter functions programming. Diagnosis, alarms handling/ Высоковольтные электроприводы с частотным управлением и Софтстартеры: конфигурирование и программирование функций, управление, настройка, диагностика, обработка аварийных сообщений
- Study of layout options and operating modes of the power plant/ Изучение вариантов компоновки и режимов управления электростанции
- A brief overview of controllers and automation systems, which are used for control of diesel engines and excitation systems / Краткий обзор контроллеров и систем автоматизации, которые применяются для управления дизель-генераторами и в системах возбуждения генераторов
- Study instructions for installation and connection of the controllers. The study programs for the configuration of the controllers/ Изучение инструкций по установке и подключению контроллеров. Изучение программ для конфигурации контроллеров
- Protection setting and parameters of the controllers. Functions of the PMS. Alarm messages and Troubleshooting. Working with logs, alarms and messages/ Настройка защит и параметров регуляторов. Функции системы управления мощностью электростанции. Аварийные сообщения и поиск неисправностей. Работа с журналами аварий и сообщений

- Paralleling and load sharing/Параллельная работа генераторов и распределение нагрузки

- Power distribution systems for conventional and electrical propulsion. Main Switchboard and Emergency Switchboard/Системы распределения энергии для традиционных судов и судов с электродвижением. Главный и аварийный распределительные щиты

- Modern vacuum generator air circuit breakers (ACB) equipped with a SEPAM control units/ Современные генераторные автоматические выключатели и их контроллерные устройства управления

- Practical exercises on the High Voltage Panels: Disconnecting, isolating and earthing of HV equipment and “Prove Dead” check of work place, insulation test / Практические упражнения на высоковольтных панелях: Обесточивание, Отключение и Заземление Высоковольтного оборудования и проверка на безопасность (“Prove Dead”) рабочего места, тестирование сопротивления изоляции

- HV Vacuum Circuit Breakers and Contactors: operation, maintenance, testing/ Высоковольтные вакуумные автоматический выключатели и контакторы: управление, обслуживание, тестирование

- Electronic protection and control relay SEPAM 20, 40: connections, configuration and adjustment with SFT software, testing, alarm handling/ Электронное реле защиты, управления и контроля SEPAM 20, 40: подсоединение, настройка с помощью программных средств SFT 2481, тестирование, обработка аварийных сообщений

- Full Voltage None Reversing (FVNR) controller: construction, connections, operation, maintenance/ Высоковольтный силовой нереверсивный (FVNR) контроллер: конструкция, подсоединение, управление, обслуживание

- MOTORPAC Reduced Voltage Solid State (RVSS) and Softstarter module: connections, operation, protection and control functions programming, alarm handling, maintenance, troubleshooting/ MOTORPAC (RVSS) модуль мягкого пуска: подсоединение, управление, настройка, обработка аварийных сообщений, обслуживание, поиск и устранение неисправностей.

- POWERLOGIC measuring device: connection, operation/ - POWERLOGIC электронное многофункциональное измерительное устройство: подсоединение, применение.

- Practicing on the simulator standard and emergency management operations in various modes of power plant operation. Work with display and additional operator panel. Managing power with a PC (SCADA). The study of electrical circuits and documentation / Отработка на тренажере стандартных и аварийных операций управления в различных режимах работы электростанции. Работа с дисплеем и дополнительной панелью оператора. Управление электростанцией с ПК. Изучение электрических схем и документации.

- The practical skills for maintenance and adjustment of ACB control devices, speed controllers of diesel engines, automatic voltage regulators and other automation devices on the simulator complex equipment / Отработка практических навыков по обслуживанию и наладке управляющих устройств генераторных автоматов, регуляторов оборотов дизелей, регуляторов напряжения генераторов и других устройств автоматики на оборудовании тренажерного комплекса

Course duration and price/ Продолжительность и цена курса

Course duration is 5 days/40 hours and price is **650** USD.

Продолжительность курса 5 дней /40 часов и цена **650** долларов США.

Training equipment/ Тренажерное оборудование

Full mission simulator complex of ship's automated electrical power plant, including/ Полнофункциональный тренажер судовой автоматизированной электроэнергетической установки включающий:

- 2 diesel generating sets, model GMS10PX (Power Link Machine Co, Ltd) with brushless synchronous generators, model P.I044E1 (Stamford)/ 2 дизель-генератора с безщеточными синхронными генераторами

- asynchronous shaft generator with frequency-controlled drive (Altivar 71 – Schneider Electric) / асинхронный валогенератор с частотно-управляемым электроприводом

- 13 sections of Main Switchboard (4 HV sections and 9 LV sections) and 1 section of Emergency Switchboard / 13 секций ГРЩ (из которых 4 секции высоковольтные) и одна секция АРЩ

- 2 engine controllers M2500 SELCO and 2 controllers DSE7320 of diesel generating sets (Deep Sea Electronics) M2500&DEIF)/ Контроллеры приводных дизелей и дизель-генераторных установок

- FlexGen controllers SELCO C6200 of PMS/ Контроллеры автоматизированной электростанции

- Power factor controller BR-7000 and Multi Measuring Interface MMI 7000 (EPCOS) / Контроллер и многофункциональный измеритель системы динамической компенсации реактивной мощности

- High voltage distribution MCset and Vacuum air circuit breaker EVOLIS 7,2 kV (Schneider Electric)/ Высоковольтная секция, вакуумный автоматический выключатель

- Motorpact series distribution. Reduced voltage soft starter RVSS with vacuum bypass contactor (Schneider Electric)/ Высоковольтная секция мягкого пуска (тиристорный преобразователь напряжения) с вакуумным шунтирующим контактором

- Control & protection devices SEPAM 20 and SEPAM 40 of high voltage systems (Schneider Electric)/ Устройства управления и защиты высоковольтных систем
- D1000 arc protection controller is an advanced and fast arc protection for ship HV electrical power distributions / Защита от электрической дуги в судовых высоковольтных системах
- M3000 (SELCO) and AL8-2 (DEIF) Alarm and Monitoring System / Система аварийной сигнализации и мониторинга



- Hardware management training system as a whole or parts thereof, monitoring sensitive data equipment of simulator, as well as managing the training process of practical training and assessment of competence is carried out by means of specialized software - SCADA Expert Vijeo Citect V7.40, using microcontroller Modicon M340 (Schneider Electric) and fully complies with the requirements of the STCW 2010 (Section A-I/12, Part 1 - performance requirements)./ Управление оборудованием тренажерного комплекса в целом или его отдельными частями, мониторинг режимных параметров оборудования тренажера, а также управление проведением учебного процесса практической подготовки и оценки компетентности слушателей осуществляется

посредством специализированного программного обеспечения SCADA с использованием микроконтроллера Modicon M340, который в полном объеме соответствует требованиям раздела А-1/12 Конвенции ПДНВ 2010.

Certification/Сертификация

On successful completion of the course and assessments a document will be issued certifying that the holder has successfully completed a course of training which meets or exceeds the level of knowledge and competence for operation, maintenance and repair of electrical and electronic equipment of marine and offshore vessels HV automated electric power plants, according the requirements of International Convention STCW 2010. / При успешном завершении курса и оценок компетентности будет выдан документ



удостоверяющий, что обладатель успешно завершил курс обучения, который соответствует или превышает уровень знаний и компетенции для работы на судовых и офшорных высоковольтных автоматизированных электроэнергетических установках, согласно требованиям Конвенции ПДНВ 2010.

equipped multimedia and computerized work places, LV and HV main switchboard (0,4 and 7,2 KV) with modern electric drives consumers/ Аппаратура и оборудование: мультимедийный класс с компьютеризированными рабочими местами; низко и высоковольтный ГРЩ с современными электроприводами в качестве потребителей

Language/ Язык преподавания: English, Russian/ Английский, русский

Facilities and Equipment: Electrical classroom

ДОДАТОК Д

Список публікацій за темою дисертації

1. Муха Н.И. Управление реактивной мощностью автономных генераторных установок / Муха Н.И., Вишневский Л.В., Дудко С.А. – Монография – Одесса: НУ «ОМА». – 2016. – 144 с. – Библиогр.: с. 134-141. ISBN: 978-966-7591-68-7.
2. Вишневский Л.В. Пуск асинхронных электродвигателей с компенсацией реактивной мощности / Вишневский Л.В., Муха Н.И., Павленко С.С. – Монография – Одесса: НУ «ОМА», – 2016. – 161 с. – Библиогр.: с.150-160. ISBN: 978-966-7591-67-0.
3. Вишневский Л.В. Управление напряжением автономных асинхронных генераторных установок / Вишневский Л.В., Муха Н.И., Дао Минь Куан – Монография – Одесса: НУ «ОМА», – 2016. – 196 с. – Библиогр.: с.185-192. ISBN: 978-966-7591-71-7.
4. Вишневский Л.В. Моделирование включения синхронных генераторов в судовую сеть / Вишневский Л.В., Веретенник А.М., Муха Н.И., Козырев И.П. Електромашинобудування та електрообладнання. Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика: науч.-техн. сб. – Одесса: Видавництво «Тех-ніка». – 2006. – № 66. – С. 201-204.
5. Муха Н.И. Идентификация параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя на основе экспертных оценок / Муха Н.И., Кувшинов А.И., Онищенко О.А. – Автоматизация судовых технических средств: Науч.-техн. сб. – Вып. 12. – Одесса: ОНМА. – 2007. – С.78-85.
6. Муха Н.И. Диагностика дизель-генераторов автономных рефрижераторных установок / Муха Н.И., Глазева О.В., Дранкова А.О. – Холодильна техніка і технологія: Науково-технічний журнал. – Одеса: ОДАХ. – 2008. – Вип. 4. – С.86-88.
7. Муха Н.И. Судовые системы отбора и передачи мощности / Муха Н.И., Дудко С.А. // «АВТОМАТИКА-2008» Доклады XV международной конференции по автоматическому управлению, 23-26 сентября 2008г. Том 4. – Одесса: ОНМА. – С.6-9.
8. Муха Н.И. Информационный подход к мониторингу технического состояния судовых дизель-генераторных установок / Муха Н.И., Миська А.Р., Дранкова А.О. Авиационно-космическая техника и технология: науч.-техн. жур. – Харьков: ХАИ. – 2010. – № 8(75). – С.136-139.
9. Муха Н.И. Аналитическое определение коэффициентов передачи асинхронного дизель-генератора / Муха Н.И., Дудко С.А., Дао Минь Куан – Електромашинобудування та електрообладнання: міжвідомчий науково-технічний журнал – Одесса: Видавництво «Техніка». – 2010. – Вип 76. – С.94-97.
10. Муха Н.И. Анализ алгоритмов управления судовыми установками компенсации реактивной энергии / Муха Н.И., Дудко С.А.//Науково-виробничий журнал «Електромеханічні і енергозберігаючі системи». – Кременчук: КНУ, 2011. – Вип. 3 (15). – С. 83-86.

11. Муха Н.И. Тренажер судовой автоматизированной электроэнергетической системы /Муха Н.И., Дранкова А.О., Волошин В.Н., Миська А.Р., Дудко С.А. – Авиационно-космическая техника и технология: науч.-тех. журнал. – Харьков: ХАИ. – 2011. – № 9(86). – С.207-211.

12. Вишневский Л.В. Управление судовыми конденсаторными установками компенсации реактивной энергии /Вишневский Л.В., Муха Н.И., Дудко С.А. – Електротехнічні та комп'ютерні системи: наук.-техн. сб. – Київ: Видавництво «Техніка». – 2011. – №3(79). – С.330-333.

13. Муха Н.И. Практическая подготовка судовых электромехаников на полномасштабном тренажерном комплексе / Електромеханічні та енергозберігаючі системи: тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. №3(19). – С.589-593.

14. Муха Н.И. Компенсация реактивной энергии в судовой электроэнергетической системе при пусках асинхронных двигателей /Муха Н.И., Павленко С.С., Дудко С.А. - Електромеханічні та енергозберігаючі системи: тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. №3/ 2012(19). – С.283-287.

15. Муха Н.И. Реализация дискретно-импульсных законов управления компенсацией реактивной энергии в судовых электроустановках/Муха Н.И., Дудко С.А. - Вісник СевНТУ. Збірник наукових праць. Серія: Механіка, енергетика, екологія. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – Вип. 132/2012. – С.86-92.

16. Муха Н.И. Динамические свойства системы стабилизации напряжения в режиме пуска асинхронного двигателя от судовой электростанции / Муха Н.И., Павленко С.С. - Электротехнические и компьютерные системы. Электротехнические комплексы и системы. Научно-технический журнал. Киев «Техника» – 2013. – Вып. 09(85). – С. 50-56.

17. Муха Н.И., Павленко С.С. Дискретное управление конденсаторным компенсатором реактивной мощности в пусковых режимах мощных асинхронных двигателей /Муха Н.И., Павленко С.С. – Вісник Національного технічного університету «ХПІ», Збірник наукових праць. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу, Теорія і практика, - Харків; НТУ «ХПІ». – 2013, – № 36 (1009), – С. 412-416.

18. Дранкова А.О. Использование нейронных сетей прямого распространения для прогнозирования технического состояния судовых дизель-генераторов /Дранкова А.О., Муха Н.И. – Вісник Національного технічного університету «ХПІ», Збірник наукових праць. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу, Теорія і практика, – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013, – № 36 (1009). – С. 505-506.

19. Муха Н.И. О технико-эксплуатационных требованиях к полномасштабному тренажеру судовой автоматизированной электроэнергетической системы Одесской национальной морской академии / Муха Н.И., Дранкова А.О. – Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах: Матеріали наук.-техн. конф., м. Севастополь, 23-27 вересня 2013 / М-во освіти і науки України, Севастоп. нац. тех. ун-т; наук. ред. А.М. Дегтярьов. – Севастополь: СевНТУ, 2013. – С. 161-166.

20. Муха Н.И. О практической подготовке судовых электромехаников и механиков / Муха Н.И., Дранкова А.О. – Электротехнические и компьютерные системы. Научно-технический журнал № 15 (91), ISSN 2221-3805 (Print). – К. Техніка. – 2014. С. 416-422.

21. Дранкова А.О. Лаборатория микроконтроллерного управления и моделирования электромеханических систем / Дранкова А.О., Муха Н.И., Шестака А.И. Электротехнические и компьютерные системы. Научно-технический журнал № 15 (91), ISSN 2221-3805 (Print). – К. Техніка. – 2014. С. 435-440.

22. Муха М.Й., Дранкова А.О. Тренажер суднової електроенергетичної системи // Патент на корисну модель UA99959 Україна, МПК (2015.01), G09B 09/00, заявка № u201501660 від 25.02.2015, опубл. 25.06.2015, Бюл. № 12. – 6 с.

23. Муха М.Й., Дранкова А.О. Твір навчального характеру «Полномасштабный тренажер судовой автоматизированной электроэнергетической системы для подготовки и проверки компетентности морских инженеров» Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 60895 від 28.07.2015 р., заявка від 14.04.2015 № 60510. – 57 с.

24. Бушер В. В. Метод демпфирования колебаний груза с динамической коррекцией длины подвеса для контейнерных перегружателей [Электронный ресурс]/В. В. Бушер, Н. И. Муха, А. И. Шестака // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Энергосберегающие технологии. – науч. журнал. – 2015. – С. 58 – 63. Режим доступа к ресурсу: journals.urau.ua/eejet/article/download/5689/5118.

25. Патент на винахід UA112396 Україна, МПК (2006.01), G05F 1/70, H02J 3/18, H02J 3/38, H02P9/46. Спосіб управління автономною електроенергетичною системою / Вишневський Л.В., Муха М.Й., Тумольський О.П., Дудко С.А.; заявник і патентовласник автори патенту. – № а2015 09542; заявл. 05.10.2015; опубл. 25.08.2016, Бюл. №16. – 4с.

26. Патент на винахід UA 116656 Україна, МПК (2006.01), G05F 1/70, H02J 3/18, H02J 3/38, H02P 9/46. Спосіб управління автономною електроенергетичною системою та пристрій для його здійснення /Вишневський Л.В., Муха М.Й., Тумольський О.П., заявка № а 2015 11808 від 30.11.2015, опубл.25.04.2018, Бюл. № 8. – 5 с.

27. Муха Н.И., Дранкова А.О. Тренажерная подготовка – важная часть практической подготовки судовых электромехаников и механиков // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINNTT-2016) [Збірка матеріалів VIII Міжнародної науково-практичної конференції (24-26 травня 2016 р., м. Херсон)]. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2016. – С. 64-69.

28. Моніторинг, діагностика та управління процесами та обладнанням судових енергетичних установок. Рукопис. Заключний звіт по НДР Інв. № 0716U002367, ОНМА, керівник роботи Муха М.Й., № ДР 0113U000637. – Одеса, 2015. – 178 с.

29. Вишневский Л.В. Повышение технико-экономических показателей автономных электроустановок путем применения асинхронных генераторов [Текст] / Вишневский Л.В., Веретенник А.М., Муха Н.И. // Sciences of Europe (Global science

center LP). – Praha (Czech republic), vol.2, No 5 (5), 2016. Technical science. – pp. 67-72.

30. M. Mukha “About practical preparation on the full mission simulator complex of the ship’s automated electric power plant”. Proceedings of the 13–th International Conference on the Engine Room Simulators, September, 20–21. – Odessa, Ukraine: National University “Odessa Maritime Academy”, 2017. – pp. 57-64, ISBN 978-966-7591-72-4.

31. PLC-based ship’s electromechanical systems laboratory / M. Mukha, A. Drankova, V. Bousher, A. Shestaka// Proceedings of the 13–th International Conference on the Engine Room Simulators, September 20-21. – Odessa, Ukraine: National University “Odessa Maritime Academy”, 2017. – pp. 183-190, ISBN 978-966-7591-72-4.

32. Муха Н. И. Перспективная компоновка судовых автономных электро-энергетических систем / Н. И. Муха. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – №27(1249). – С. 285–288. ISSN 2079-8024.

33. M. Mukha “A Full Mission Simulator of the Ship’s Automated Electric Power System for Training and Competence Testing of Marine Engineers”. David Publishing Company. Journal of Shipping and Ocean Engineering, vol. 7, No 4, July – Aug., 2017 (Ser. No 32). – pp. 153-160.

doi 10.17265/2159-5879/2017.04.002. ISSN: 2159-5887.

34. M. Mukha “Comparative analysis of technical and economic characteristics of generator sets on the basis of synchronous and asynchronous generator”, Computational problems of electrical engineering, vol. 7, No 1, 2017. – pp. 57-61. ISSN 2224-0977.