

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

В.М. Рябенський, О.М. Юрченко, О.О.Ушкаренко, М.Ф. Сопель

**ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМИ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИМИ УСТАНОВКАМИ З
ГАЗОДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНИМИ АГРЕГАТАМИ**

Монографія

Київ 2013

УДК 621.3:669.019.3

ББК 32.2

Р 98

В монографії розглянуті питання синтезу та оптимізації систем керування технічними засобами автономної електроенергетичної установки з газодизель-генераторними агрегатами для покращення якості електроенергії. На основі експериментальних даних, отриманих на реальних газодизель-генераторних агрегатах, визначені статистичні характеристики збурень, можливий діапазон обмінних коливань активної потужності. Розроблена методологія моделювання систем для проведення детальних досліджень процесів в автономних електростанціях, визначені необхідні кількісні та якісні заходи по зниженню коливань обертів газодизелів та активної потужності при паралельній роботі генераторів, а також стабілізації коефіцієнту потужності в режимі паралельної роботи генератора з мережею. Розроблена методика та спрощена математична модель синхронного генератора для оптимізації керування при комутації навантажень.

Для наукових та інженерно-технічних працівників, які виконують дослідження в галузі підвищення якості електроенергії та оптимізації систем керування автономними електроенергетичними установками.

Затверджено до друку Вченою радою Інституту електродинаміки НАН України (протокол №8 від 20.06.2013 р.)

Рецензенти: О.В. Кириленко, акад. НАН України
В.Я. Жуйков, докт. техн. наук

Автори: докт. техн. наук, проф. Рябенський В.М.
канд. техн. наук, доц. Ушкаренко О.О.

Рябенський В.М., Юрченко О.М., Ушкаренко О.О., Сопель М.Ф.

Оптимізація систем керування автономними електроенергетичними установками з газодизель-генераторними агрегатами: Монографія.

В монографии рассмотрены вопросы синтеза и оптимизации систем управления техническими средствами автономной электроэнергетической установки с газодизель-генераторными агрегатами с целью повышения качества электроэнергии. На основе экспериментальных данных, полученных на реальных газодизель-генераторных агрегатах, определены статистические характеристики возмущений, возможный диапазон обменных колебаний активной мощности. Разработана методология моделирования систем для проведения детальным исследований процессов в автономных электростанциях, определены необходимые количественные и качественные меры по снижению колебаний оборотов газодизель и активной мощности при параллельной работе генераторов, а также стабилизации коэффициента мощности в режиме параллельной работы генератора с сетью. Разработана методика и упрощенная математическая модель синхронного генератора для оптимизации управления при коммутации нагрузки.

Для научных и инженерно-технических работников, выполняющих исследования в области повышения качества электроэнергии и оптимизации систем управления автономными электроэнергетическими установками.

ISBN 978-966-02-6918-7

ЗМІСТ

ВСТУП

Розділ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КОЛИВАНЬ ЧАСТОТИ ОБЕРТІВ ГАЗОДИЗЕЛЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

- 1.1. Стан та перспективи побудови автономних електростанцій з газодизель-генераторами
 - 1.1.1. Методи й пристрої стабілізації частоти обертів дизель-генераторів
 - 1.1.2. Дизель-генератор як об'єкт регулювання
- 1.2. Апаратно-програмний комплекс для дослідження динамічних властивостей ГДГА
 - 1.2.1. Основні стандарти та особливості проведення випробувань
 - 1.2.2. Алгоритм проведення випробувань
- 1.3. Методологія обробки експериментальних даних
- 1.4. Визначення діапазону обмінних коливань активної потужності
- 1.5. Дослідження автоколивальних процесів частоти напруги генератора
 - 1.5.1. Причини появи низькочастотних коливань
 - 1.5.2. Вплив геометрії газорозподільчої системи на виникнення низькочастотних коливань
- 1.6. Ідентифікація параметрів газодизель-генераторного агрегату
- Висновки

Розділ 2. ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ГАЗОДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОГО АГРЕГАТУ ТА АНАЛІЗ ЙОГО ПОВЕДІНКИ В РІЗНИХ УМОВАХ

- 2.1. Математична модель газодизель-генераторного агрегату
 - 2.1.1. Динамічна модель ГДГА для дослідження обмінних коливань потужності в умовах АЕЕС
 - 2.1.2. Оптимізація параметрів ПІД-регулятора ГДГА
- 2.2. Використання нечіткої логіки для налаштування коефіцієнтів регулятора обертами газодизеля
- 2.3. Моделювання роботи газодизеля з регулятором на базі нечіткої логіки
- 2.4. Засоби імітації низькочастотних завад для моделювання газодизельного агрегату
- 2.5. Спрощена модель синхронного генератора для рішення задачі упереджуючого керування
- 2.6. Дослідження характеристик спрощеної моделі генератора в динамічних режимах
- 2.7. Моделювання процесів коливань частоти й напруги, обумовлених комутацією навантаження
- Висновки

Розділ 3. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КОМУТАЦІЇ НАВАНТАЖЕННЯ В АЕЕС

- 3.1. Аналіз процесів комутації навантаження в АЕЕС
 - 3.2. Використання ланцюгів Маркова для аналізу режимів роботи АЕЕС
 - 3.3. Моделювання процесів зміни навантаження
 - 3.4. Аналіз роботи АЕЕС при комутації навантаження
 - 3.5. Методика статистичного дослідження сплесків потужності в АЕЕС
 - 3.6. Дослідження провалів і сплесків напруги в АЕЕС
 - 3.7. Прогнозування навантаження автономної електростанції з використанням штучних нейронних мереж
- Висновки

Розділ 4. СИНТЕЗ ЕФЕКТИВНИХ СТРУКТУР ТА ОПТИМАЛЬНИХ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК З ГДГА

- 4.1. Підвищення точності розподілу активної потужності шляхом контролю положення роторів ГДГА
 - 4.2. Оцінка ефективності стабілізації параметрів ГДГА
 - 4.3. Розробка й аналіз ефективних структур та схем розподілу активної потужності між ГДГА
 - 4.4. Керування коефіцієнтом потужності при паралельній роботі синхронного генератора з мережею
 - 4.4.1. Структура системи керування з трипозиційним регулятором
 - 4.4.2. Синтез системи керування з ПІД-регулятором
 - 4.4.3. Розробка системи керування з Fuzzy-регулятором
 - 4.5. Дослідження систем упереджуючого керування
 - 4.5.1. Синтез структури системи упереджуючого керування
 - 4.5.2. Моделювання системи упереджуючого керування
 - 4.6. Оптимізація параметрів регулятора системи збудження
- Висновки

Розділ 5. ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

- 5.1. Загальна характеристика АЕЕС з напівпровідниковими перетворювачами та основні задачі підвищення якості електроенергії
- 5.2. Модельні дослідження впливу процесу комутації навантаження на якість електроенергії
- 5.3. Дослідження впливу коливань частоти на якість випрямленої напруги
 - 5.3.1. Дослідження статичних характеристик випрямляча

5.3.2. Робота синхронної системи фазового керування в умовах коливань частоти

5.3.3. Вплив коливань частоти на роботу випрямлячів з асинхронними системами фазового керування

5.4. Дослідження динамічних характеристик тиристорного випрямляча

5.4.1. Динамічна модель активного фільтра

5.4.2. Частотні характеристики фільтрів

5.4.3. Перетворювач як замкнена система

5.5. Стохастична модель керованого випрямляча

5.6. Компенсація коливань частоти напруги швидкодіючими зворотними зв'язками в системах фазового керування

5.7. Зменшення впливу коливань частоти в багатоконтурних структурах силових перетворювачів

Висновки

Заключення

Перелік літератури

ВСТУП

Підвищення вартості дизельного палива призводить до необхідності переводу дизельних машин на газ. Газодизель-генераторні агрегати (ГДГА) знаходять все більш широке застосування зважаючи на свою економічність. В порівнянні з дизельною електростанцією, газодизельна забезпечує менші витрати на паливо, тривалішу безперервну роботу із стандартним паливним баком, можливість ефективного використання газу з різним хімічним складом, зокрема попутного. Крім того, у разі аварії системи газопостачання без втрат ефективності і потужності установки, можливий повний перехід на дизельний режим роботи.

Однією з основних вимог до дизель-генераторних агрегатів є забезпечення стабільної частоти обертання, оскільки такі агрегати знаходять широкий попит і експлуатуються як в одиночній роботі, так і паралельно. Існуючі коливання оборотів обумовлені істотною нелінійністю газодизеля і зміною його параметрів при зміні навантаження. Проте, такі дизель-генератори знаходять достатньо широке застосування в промисловості. Тому вирішення задач автоматизації газодизель-генераторних установок та підвищення якості електроенергії є достатньо актуальними. Нелінійність параметрів газодизельного агрегату призводить до того, що при різних навантаженнях амплітуда та характер коливань частоти різні. Високоєфективне керування автономною електростанцією з газодизель-генераторними установками можливе з використанням регуляторів, що враховують нелінійність газодизель-генераторів та змінюють свої параметри в процесі роботи при різних режимах роботи електростанції. Оскільки динаміка зміни навантаження носить випадковий характер, а також газодизель є нелінійною системою, то для побудови регуляторів потрібно використовувати апарат нечіткої логіки.

Стабілізація частоти і напруги електричної мережі автономної електростанції грає важливу роль в забезпеченні ефективної роботи

споживачів електроенергії. Зміна частоти напруги призводить до відхилення режимів роботи споживачів від оптимальних і, відповідно, до зниження їх ефективності. В електроенергетичній системі в сталому режимі можуть спостерігатися обмінні коливання активної потужності між генераторами. Тому необхідно приймати заходи по зниженню коливань активної потужності. Для роботи ГДГА в паралельному режимі на загальне навантаження стають актуальними проблеми пропорційного розподілу активної та реактивної потужності, оскільки газодизелі, як показують експериментальні дослідження, забезпечують значно велику нестабільність обертів і меншу жорсткість характеристик, особливо при зниженні навантаження. Тому необхідно виконати дослідження процесів при паралельній роботі газодизель-генераторів та розробити системи розподілу активної та реактивної потужностей.

Газодизель-генератори все частіше використовуються в когенераційних установках, які використовуються для отримання теплової та електричної енергії. Для таких установок характерним є режим роботи генератора паралельно з мережею. В такому режимі виникає проблема підтримання заданого коефіцієнту потужності для підвищення ККД установки, який може змінюватися внаслідок зміни навантаження та коливань напруги мережі, і викликати обмінні коливання реактивної потужності. В роботі досліджуватиметься режим роботи газодизель-генератора паралельно з мережею та буде розроблено мікропроцесорну систему стабілізації коефіцієнту потужності.

Зміна навантаження в автономній електростанції викликає появу провалів та кидків напруги, особливо при пуску та відключенні потужних асинхронних двигунів. Крім того, змінюється режим роботи електростанції, а саме кількість паралельно працюючих газодизель-генераторів. З метою запобігання виникнення аварійних ситуацій (знеструмлення споживачів внаслідок перевантажень), а також зменшенню провалів напруги, які можуть викликати спрацювання захисної апаратури, необхідно виконувати

оперативне прогнозування навантаження на основі добових графіків навантаження електростанції та своєчасно змінювати режим роботи. Дослідження процесів і моделювання коливань активної потужності між генераторами в сталому і аварійному режимах, пошук шляхів зниження нерівномірності завантаження генераторів при паралельній роботі дозволить зменшити витрату палива, і відповідно понизити собівартість електроенергії. Використання комп'ютерних засобів дозволяє застосувати алгоритми прогнозування загального навантаження з використанням нейронних мереж. Крім того, перед підключенням потужних споживачів електроенергії потрібно використовувати принципи упереджуючого керування для того, щоб зменшити провал напруги. Упереджуючи керування реалізується шляхом зміни збудження синхронного генератора. Для реалізації цих алгоритмів потрібно виконати статистичний аналіз сплесків та провалів напруги, а також зміни навантаження, розробити систему, яка виконуватиме форсування збудження синхронного генератора перед підключенням потужного споживача електроенергії.

Метою роботи є розробка та оптимізація систем керування технічними засобами автономної електроенергетичної установки, де в якості силових агрегатів використовуються газодизель-генераторні установки, а також створення методології моделювання систем керування для проведення детальніших досліджень і визначення необхідних кількісних і якісних заходів для покращення якості електроенергії.

Досягнення цієї мети було забезпечено розв'язанням наступних завдань:

- визначення статистичних характеристик збурень, можливий діапазон обмінних коливань активної потужності на основі експериментальних даних, отриманих на реальних газодизель-генераторних агрегатах;
- розробка математичної моделі газодизель-генераторного агрегату з урахуванням його нелінійності для визначення величин провалів напруги генератора та обертів газодизеля при зміні навантаження;

- розробка спрощених математичних моделей синхронного генератора та газодизеля з метою вирішення задач упереджуючого керування, а також створення апаратно-програмного комплексу моделювання процесів в автономних електроенергетичних системах з метою дослідження ефективності розроблених алгоритмів;
- аналіз раніше розроблених регуляторів та синтез на їх основі нових типів регуляторів обертів газодизеля з використанням апарату нечіткої логіки, а також адаптивних регуляторів;
- розробка ефективної структури системи розподілу активної та реактивної потужності при паралельній роботі генераторів для зменшення коливань активної та реактивної потужності, а також стабілізації коефіцієнту потужності, мінімізації витрат палива та підвищення ККД;
- синтез системи стабілізації коефіцієнту потужності при паралельній роботі генератора з мережею та дослідження якості керування при використанні різних типів регуляторів;
- розробка алгоритму прогнозування загального навантаження з використанням нейронних мереж з метою прогнозування навантаження;
- математичне моделювання процесів в автономній електростанції з газодизель-генераторними установками, в тому числі з напівпровідниковими перетворювачами електроенергії;
- розробка стохастичної моделі керованого випрямляча для визначення у вихідному сигналі завад, обумовлених нестабільністю живлячої напруги та нелінійністю перетворювача;
- дослідження статичних та динамічних характеристик керованого випрямляча з метою визначення впливу коливань частоти на якість випрямленої напруги для різних типів систем фазового керування;
- синтез замкнених систем керування для компенсації коливань частоти напруги швидкодіючими зворотними зв'язками в багатоконтурних структурах силових перетворювачів.

При виконанні роботи були використані методи статистичного та кореляційного аналізу, теорії вірогідності, методи теорії марківських процесів та імітаційного моделювання, методи штучних нейронних мереж та теорії нечітких множин, методи оптимізації систем керування.

У першому розділі монографії розглядаються методика експериментального дослідження динамічних властивостей газодизель-генераторних агрегатів з метою статистичного та кореляційного аналізу процесу коливань обертів та визначення закону розподілення випадкового процесу коливань для побудови адекватної моделі газодизельного агрегату. Досліджені автоколивальні процеси частоти напруги генератора та визначені причини їх появи. Визначений діапазон обмінних коливань активної потужності, що призводить до нерівномірного завантаження генераторів. Представлена методика статистичного дослідження сплесків потужності в АЕЕС на основі добового графіку навантаження.

У другому розділі виконується розробка алгоритмів та програмного забезпечення для імітаційного моделювання процесів комутації навантаження в АЕЕС та автоматизації побудови добового графіку навантаження. Виконаний аналіз роботи електроенергетичної системи при комутації навантаження. Виконується розробка математичної моделі газодизель-генераторного агрегату для дослідження обмінних коливань потужності в умовах АЕЕС. Розглянуті питання оптимізації параметрів регулятора ГДГА, у тому числі з використання нечіткої логіки. Розроблена спрощена модель синхронного генератора для рішення задачі упередженого керування.

У третьому розділі розглянуті питання розробки засобів автоматизації електроенергетичних установок та оптимальних алгоритмів керування ними. Розглянуті особливості підвищення точності розподілу активної потужності шляхом контролю положення роторів. Представлені схеми розподілу активної потужності між генераторами. Виконано дослідження процесу керування коефіцієнтом потужності при паралельній роботі синхронного

генератора з мережею при різних типах регуляторів. Розроблена структура системи упереджувачого керування для зменшення провалів напруги при комутації навантаження та виконано її моделювання.

Четвертий розділ присвячений дослідженню шляхів підвищення якості електроенергії в автономних електроенергетичних системах з напівпровідниковими перетворювачами електроенергії. Виконано дослідження впливу коливань частоти на якість випрямленої напруги для синхронних та асинхронних систем фазового керування, отримані статичні та динамічні характеристики керованого випрямляча, розроблена його стохастична модель. Розглянуті питання компенсації коливань частоти напруги швидкодіючими зворотними зв'язками в системах фазового керування.

Автори висловлюють подяку аспірантам кафедри ТЕЕС НУК До Ань Туану, Нгуєну Ван Тханю, Мішустову В.П., Крилову А.В., Махмуду Аль-Суод Мохаммаду за проведені наукові дослідження та допомогу в підготовці монографії.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АД – асинхронний двигун
АЕЕС – автономна електроенергетична система
ГА – генераторний агрегат
ГРЩ – головний розподілюючий щит
ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння
ДГ – дизель-генератор
ДГА – дизель-генераторний агрегат
ЕН – електричне навантаження
ЕОМ – електронно-обчислювальна машина
ЕРП – електророзподільні пристрої
Е.Р.С. – електрорушійна сила
ЕС – електроспоживання
ЗЗ – зворотний зв'язок
КВ – керований випрямляч
ККД – коефіцієнт корисної дії
МП – мікропроцесор
НР – регулятор на основі нечіткої логіки
ОК – об'єкт керування
ПЗ – програмне забезпечення
ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор
САР – система автоматичного регулювання
СГ – синхронний генератор
СЕЕС – суднова електроенергетична система
СК – система керування
СМО – система масового обслуговування
ССГ – система синхронізації генераторів
СФУ – система фазового управління
ФБ – функціональний блок

РОЗДІЛ 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КОЛИВАНЬ ЧАСТОТИ ОБЕРТІВ ГАЗОДИЗЕЛЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

1.1. Стан та перспективи побудови автономних електростанцій з газодизель-генераторами

Електроенергія в автономних, в тому числі й суднових електроенергетичних установках, як правило, виробляється синхронними генераторами, об'єднаними в єдину електроенергетичну систему за допомогою головного розподільного щита, а також пульта керування й автоматики. Головний розподільний щит складається з ряду секцій з елементами комутації й керування, та вирішує завдання синхронізації, паралельної роботи генераторів, розподілу потужності, захисту електростанції й споживачів, а також забезпечення включення резервного електроживлення.

Постійно включена система регулювання частоти дозволяє з високою точністю підтримувати частоту на всіх режимах незалежно від зовнішніх умов. Використання цієї системи без системи автоматичного розподілу активного навантаження при паралельній роботі синхронних генераторів неможливе, оскільки переміщення статичної характеристики базового агрегату призводить до перерозподілу активних навантажень.

Таким чином, сучасна автономна електроенергетична система (АЕЕС) з погляду керування процесом виробництва й розподілу електричної енергії визначеної якості й кількості може бути розділена на наступні основні частини [14, 19, 20, 61, 85, 122]:

1. Об'єкт керування, що включає в себе генераторний агрегат (ГА).
2. Керуюча частина комплексу, яка здійснює автоматичне регулювання режимних параметрів генераторних агрегатів.

3. Керуюча частина комплексу, за допомогою якої здійснюється ручне керування режимними параметрами генераторних агрегатів.

Режим паралельної роботи генераторних агрегатів (ГА) в автономних умовах має істотні відмінності від режиму паралельної роботи електростанцій. Разом з тим ці відмінності, що впливають на стійкість роботи систем, не знайшли досить чіткого відображення в літературі.

Можливі схеми паралельної роботи електростанцій в автономних умовах можуть бути зведені до трьох схем [19, 24, 27, 58, 123, 126]:

– схема "станція – шини" незмінної напруги й частоти із простим зв'язком, тобто при відсутності на лінії електропередачі, що зв'язує цю станцію із системою, проміжних відборів потужності й при

$$\frac{P_{c\Sigma}}{P_1} \geq 10,$$

де $P_{c\Sigma}$ та P_1 – установлені потужності відповідно системи й станції;

– схема "станція – шини" незмінної напруги й частоти зі складним зв'язком, тобто при наявності на лінії електропередачі місцевих або проміжних відборів потужності;

– схема "станція – шини", у загальному випадку зі складним зв'язком при $\frac{P_{c\Sigma}}{P_1} < 10$.

Загальним для всіх цих схем є наявність реактивного опору лінії електропередачі x_{π} , що вносить певну особливість у розрахунки, відіграє істотну роль у питаннях стійкості паралельної роботи систем.

Як відомо, в автономних умовах реактивний опір лінії передач малий і може бути прийнятий відносно опору x_d генератора рівним нулю. У цьому випадку активну потужність, що віддається генератором, можна визначити по відомій формулі:

$$P_1 = \frac{E_d u}{x_d} \sin \delta_1,$$

де E_d – Е.Р.С. генератора, прикладена за x_d ; δ_1 – кут між Е.Р.С. E_d і напругою u мережі нескінченної потужності.

Як показано в роботах [21, 33, 49], при передачі номінального навантаження кут $\delta_{1ном}$ у цих умовах (при $x_l = 0$) становить $10 - 25^\circ$.

Межа переданої генератором потужності визначиться з відомої умови:

$$\delta_1 = 90^\circ,$$

тобто

$$P_{1пред} = \frac{E_d u}{x_d} \sin 90^\circ = \frac{E_d u}{x_d};$$

Запас стійкості k_{c1} цієї системи за умови, що $E_d = const$, дорівнює:

$$k_{c1} = \frac{P_{1пред} - P_{1ном}}{P_{1ном}} = \frac{P_{1пред}}{P_{1ном}} - 1 = \frac{E_d u x_d}{x_d E_d u \sin \delta_{1ном}} - 1 = \frac{1}{\sin(25 \div 10)^\circ} - 1 = 1,36 \div 4,7. \quad (1.1)$$

У берегових умовах (при $x_l \neq 0$) активна потужність, може бути визначена по формулі:

$$P_2 = \frac{E_d u}{x_d + x_l} \sin \delta_2.$$

У сучасних енергосистемах кут δ_2 , при передачі генератором номінальної потужності, становить $50 \div 55^\circ$ [19, 30], тому запас стійкості системи k_{c2} в цих умовах при $E_d = const$ буде:

$$k_{c2} = \frac{P_{1пред}}{P_{1ном}} - 1 = \frac{E_d u (x_d + x_l)}{(x_d + x_l) E_d u \sin \delta_{1ном}} - 1 = \frac{1}{\sin \delta_{2ном}} - 1 = 0,3 \div 0,2.$$

Таким чином, відсутність довгих ліній передач у АЕЕС забезпечує для цих станцій, на відміну від берегових станцій, великий запас статичної стійкості 1-го роду.

Забезпечення статичної стійкості 2-го роду – одне з найважливіших умов роботи агрегатів й автономних електростанцій. Для автономних електростанцій постановка цього питання пов'язана із введенням похідних для форсування збудження з метою втримання ГА в синхронізмі при сильних збуреннях.

Неправильний вибір закону регулювання, забезпечуючи стійкість 1-го роду, може призвести до коливальної нестійкості системи [19].

Значну роль у виникненні коливань у системі грають збурюючі сили, дія яких, в залежності від їхнього походження, позначається або на моменті первинного двигуна, або на електромагнітному моменті.

В результаті аналізу літературних джерел, у яких описані експериментальні дослідження коливальних процесів у суднових електроенергетичних системах [19-21, 126] встановлено, що зазвичай частота вільних коливань перебуває в діапазоні 0,05 – 0,2 Гц, а амплітуди обмінних коливань на потужності досягає до 5 % від потужності ГА.

Аналізуючи описані в [19-21, 88, 126] дані можна встановити, що в АЕЕС можуть бути наступні види коливальних явищ:

- вільні коливання, обумовлені дією систем автоматичного регулювання;
- автоколивання, зумовлені нестійкістю тих або інших контурів регулювання та наявністю в них нелінійностей;
- змушені коливання, викликані дією змушених сил і близькістю частоти цих сил до резонансної частоти системи;
- комбінаційні коливання, що відбуваються внаслідок інтерференції коливань у системі.

Коливання можуть проявлятися як в окремих (при відсутності коливань в інших контурах), так і в багатьох контурах системи.

1.1.1. Методи й пристрої стабілізації частоти обертів дизель-генераторів

Автоматичне регулювання частоти обертання ДГ зарекомендувало себе як ефективний засіб підвищення рівня статичної й динамічної стійкості АЕЕС. Основи сучасної теорії стійкості були розроблені в працях учених С.А. Антонович [5], П.А. Мещанінов [85], В.А. Михайлов [87, 90] і пізніше розвинені вченими І.Г. Беляєв [14], В.С. Архангельський [6], Ю.В. Баков [10], А.П. Баранов [10, 11], Д.А. Бут [24], М.В. Васильєв [26], Л.П. Веретенников

[30, 31], Е.С. Ковалевський, М.Л. Левинштейн [81], А.Н. Ткаченко [124], В.П. Топорков, Д.Ю. Копитов [127] та інші.

Системи автоматичного регулювання (САР) частоти обертання відносяться до систем стабілізації. Системи автоматичної стабілізації можуть бути статичними або астатичними відносно зовнішнього впливу. У САР частоти обертання дизелів зовнішнім впливом є потужність, прикладена до вихідного вала, що дорівнює активній потужності, яка віддається генератором, з урахуванням ККД генератора.

Для ГА застосовують два основних принципи регулювання частоти: по миттєвому відхиленню регульованої величини (частоти), та по миттєвому відхиленню частоти й збурюючому впливу (навантаженню).

Дизель-генератори, обладнані звичайними механічними регуляторами із гнучким зворотним зв'язком, не забезпечують пропорційного розподілу навантаження між паралельно працюючими генераторами, внаслідок їх астатичних швидкісних характеристик [8, 11, 12, 32, 39, 41, 42, 51, 53, 93].

Розвиток комп'ютерної техніки й електронних технологій дозволили створити сучасні системи електронного керування двигунів, за допомогою яких стало можливим задовільняти підвищеним вимогам до теплових двигунів.

З появою нової елементної бази засобів автоматики, у тому числі мікропроцесорних пристроїв, з'явилась можливість реалізації на їх основі комплексних систем автоматичного регулювання ГА, що виконують поряд з іншими функції регулювання частоти обертання. У цьому випадку єдиний електронний блок підвищеної експлуатаційної надійності може здійснювати всі операції по керуванню й регулюванню ГА [1, 2, 4, 45-47, 82, 90].

Для ідеальної системи регулювання дизеля, у якій немає інерційних і постійних запізнень, а регулювання відбувається тільки по відхиленню швидкості, механічний момент є чисто демпферний, пропорційний похідній кута. З появою в системі запізнювань за часом і, отже, зсуву по фазі, у механічному моменті з'являється синхронізуюча складова. При гармонійних

коливаннях роторів обидві складові моменти змінюють свій знак, тобто проходять нульове положення через половину періоду коливань. При цьому система виходить на границю стійкості.

Підвищення стійкості ДГ за рахунок збільшення махових мас (інерційної постійної) ротора нераціонально з конструктивних міркувань. Додатковий вплив на електромагнітний момент генератора шляхом зміни його параметрів і параметрів його регулятора збудження здатне погіршити якість електроенергії по напрузі. Дизелебудівні заводи обмежені конструктивними можливостями оптимізації постійних часу ланок регуляторів частоти обертання. Тому представляється доцільним досліджувати можливість й ефективність підвищення запасу й інших показників стійкості паралельної роботи ГА за рахунок спеціального додаткового регулювання первинних двигунів.

Одним з основних напрямків підвищення ефективності САР частоти обертання дизелів є розробка й використання науково обґрунтованих рішень по вдосконаленню технічного обслуговування регулятора частоти обертання (РЧО) непрямої дії в складі САР частоти обертання дизеля. У зв'язку із цим розробка нових способів підвищення надійності РЧО, вдосконалення їх технічного обслуговування є актуальними задачами в сучасних умовах.

Удосконалення показників РЧО стримує недостатня дослідженість великого різноманіття взаємодіючих процесів в САР частоти обертання та наявність збурень із боку навколишнього середовища в різних умовах експлуатації; причини і фактори зміни технічного стану РЧО, статичних і динамічних характеристик РЧО зі зміною його технічного стану [5, 62, 68-74].

Практика дослідження й проектування вказує на недостатнє використання для вдосконалення конструкції РЧО непрямої дії методів математичного програмування й оптимізації.

Наступним напрямком є розвиток адаптивних принципів вибору параметрів регуляторів, застосування активних методів ідентифікації

динамічних об'єктів у реальному часі, що базуються на побудові моделей енергосистеми за експериментальним даними.

Ідентифікація параметрів ДГ для цілей адаптації налаштувань АРВ здійснюється за допомогою режимних частотних характеристик, обумовлених реакцією системи на вплив у вигляді східчастої функції. При побудові регуляторів з автоматичним налаштуванням використовуються методи параметричної ідентифікації, які здатні відслідковувати зміни параметрів і не вимагають подачі збурень на об'єкт – наявність природніх флуктуацій режиму виявляється достатньою [4, 57, 75, 104].

1.1.2. Дизель-генератор як об'єкт регулювання

Динамічні властивості комбінованого двигуна, як регульованого об'єкта інтенсивно вивчалися в [11, 28, 39, 41, 63, 68-75, 77-80, 90, 93]. Статичні й динамічні властивості САР двигуна визначаються властивостями її елементів: двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) і автоматичного регулятора. Цим визначається інтерес до вивчення статичних і динамічних властивостей ДВЗ, як об'єкта керування й регулювання [68-75, 77-80, 93, 95, 102, 126].

Дослідження динамічних властивостей об'єкта зводиться до знаходження вигляду його перехідної функції. Вирішуючи таке завдання слід встановити, до якої з типових динамічних ланок може бути віднесений об'єкт, і які постійні часу в диференціальному рівнянні такої ланки. Динамічним моделям дизелів присвячені дослідження авторів [68-75, 77-80, 93, 126].

Переваги електростанцій з використанням ГД розглянуті в роботах [36, 60, 96, 98]:

- низька вартість установленної потужності за 1 кВт;
- низька собівартість електроенергії;
- безпека, відсутність високих температур, тисків, моментів інерції;
- великий ресурс (200-300 тисяч годин);

- екологічна прийнятність;
- мобільність;
- широкий діапазон робочих режимів – від 15-20 % до 110 % відсотків номінальної потужності при пропорційній витраті палива.

У порівнянні з дизельною електростанцією, газодизельна забезпечує менші витрати на паливо, більш тривалу безперервну роботу зі стандартним паливним баком, можливість ефективного використання газу з різним хімічним складом, у тому числі попутного.

Недоліком ГДГА є обмежена потужність для однієї машини. При необхідності можуть бути встановлені декілька паралельно працюючих агрегатів. Однією з основних вимог до ГДГА є забезпечення стабільної частоти обертання, оскільки такі агрегати знаходять широкий попит й експлуатуються як в одиночній роботі, так і паралельно.

Досвід випробувань й експлуатації електроенергетичних систем показує, що при паралельній роботі ГА в окремих режимах проявляється нестійкість у вигляді незатухаючих коливань роторів. При цьому обмінні коливання потужності між ГА досягають великих амплітуд. Цій проблемі присвячені дослідження В. И. Товщина [125, 126], Л.П. Веретенникова [30, 31] та ін. Дослідження показали велику складність проблеми й необхідність вдосконалення методів, що дозволяють розкрити й проаналізувати закономірності та причини коливальної нестійкості ГА в суднових електроенергетичних системах, розробити способи її усунення.

Причинами коливань потужності паралельно працюючих машин можуть бути [21, 30, 31]:

1. Періодична зміна обертаючого моменту первинного двигуна одного або всіх паралельно працюючих агрегатів. Така зміна моменту відбувається через нерівномірність обертання дизельних двигунів. Воно призводить до періодичного перерозподілу активного навантаження, які іноді досягають 30 % від номінальної, і навіть більше;

2. Автоколивання в системі регулювання частоти обертання. Ці коливання пов'язані з наявністю люфтів у механічних зв'язках регуляторів швидкості й можуть досягати 15-30% від номінальної;

3. Автоколивання в системі регулювання збудження. Дані коливання пов'язані з нестійкістю системи в малому, викликаному надмірною величиною коефіцієнту підсилення й гістерезисом коректора, і обмежені головним чином нелінійностями коректора напруги. Вони можуть досягати 50% від номінальної й більше.

За останні роки в АЕЕС знайшли широке застосування пристрої, що працюють за принципом релейного регулювання й розподілу навантаження між ДГ. Ці пристрої відрізняються простою конструкцією й обслуговуванням, високою швидкодією [12, 53].

Для формування керуючих сигналів на об'єкт за допомогою цих пристроїв визначається генератор з найбільшим активним струмом навантаження. Однак і ці пристрої мають недоліки, пов'язані насамперед з тим, що для визначення генератора з найбільшим активним струмом використовуються датчики активної та реактивної складової струму, що мають досить складну конструкцію та невисоку точність [54].

Вперше дослідження роботи синхронної машини за допомогою структурних схем було проведено в [5, 20, 21]. Структурні схеми використовувалися для представлення взаємних зв'язків між величинами, що входять у рівняння систем регулювання. Ці схеми складалися з досить складних ланок, тому проведення по ним структурного аналізу було досить важко.

Доцільні варіанти структурної схеми окремо працюючого генератора запропоновані в [5, 20]. Аналіз цих схем дав можливість розглянути загальні питання побудови раціональних систем регулювання збудження.

Більш зручна структурна схема паралельної роботи синхронного генератора з мережею нескінченної потужності була запропонована в [81, 125, 126]. Використання в якості вихідної координати кута δ_{12} дозволило

виявити незалежність зв'язків, що утворюють окремі складові електромагнітного моменту. Це в свою чергу дало можливість установити частотний критерій стійкості, заснований на використанні механічних характеристик машини.

Структурні схеми паралельно працюючих генераторів найбільш повно розроблені в [21, 125, 126]. У цій роботі на підставі дослідження структур даний всебічний аналіз динамічних властивостей системи автоматичного регулювання збудження паралельно працюючих синхронних машин, і розроблена методика синтезу її раціональної структури.

Найбільш повно відзначені особливості проявляються в структурних схемах, призначених для дослідження динаміки паралельної роботи ГА на ЕОМ [20, 58]. При побудові подібних схем використані відомі рівняння Парка-Горева у вісях $d-q$.

Як показано в [20], для вирішення більшості завдань, пов'язаних з аналізом динаміки паралельної роботи та синтезом оптимального закону регулювання, в якості незалежних змінних доцільно вибрати електричну координату – Е.Р.С. по поздовжній вісі E_d та механічну координату – кут δ_{12} між роторами генераторних агрегатів, а всі інші змінні представити як функції незалежних змінних.

Вибір у якості незалежних змінних E_d і δ_{12} дозволяє одержати відносно просту й наочну структурну схему. Схема моделювання в цьому випадку теж значно спрощується, тому що відпадає необхідність у блоках перетворення вісей і зазначених вище нелінійностей.

Структурна схема паралельної роботи генератора з мережею, у якій за незалежну змінну прийнятий кут δ_{12} , була використана в роботі [126] для визначення причин виникнення й пошуків шляхів усунення обмінних коливань потужності при паралельній роботі ГА.

Електрорушійна сила E_d в цій роботі була прийнята постійною. Таке припущення базувалося на проведених експериментальних дослідженнях, у процесі яких було встановлено наявність ідентичних коливань потужності у

випадку живлення обмотки збудження від незалежного джерела з постійною напругою.

Структурна схема паралельної роботи двох однотипних ГА, складена на підставі рівнянь, де за незалежні змінні прийняті E_{d1}, E_{d2} і φ_1, φ_2 , була запропонована в роботах [21, 22]. Однак за структурною схемою, що запропонована в цих роботах, не можна було проводити аналіз коливальних явищ у АЕЕС із різнотипними ГА.

1.2. Апаратно-програмний комплекс для дослідження динамічних властивостей ГДГА

Регулювання напруги в електричних мережах енергосистем пов'язане з необхідністю впливу на уставки АРЗ (автоматичних регуляторів збудження) генераторів електростанцій. Сучасні системи збудження генераторів мають у своєму складі мікроконтролер, до функцій якого входить формування імпульсів керування тиристорами, які управляють напругою (струмом) збудження, керування розподілом реактивної потужності між генераторами при їхній паралельній роботі. Використання апаратно-програмних засобів дозволяє створювати системи збудження, що володіють гарними показниками якості регулювання, надійності, вартості. Разом з тим виникає необхідність вибору коефіцієнтів регулятора, які істотно впливають на якість перехідного процесу. Це особливо важливо в системах, у яких є сильна динаміка зміни навантаження. Для успішного рішення такої задачі потрібне знання передаточної функції керованого об'єкта. Найбільш точним є ідентифікація параметрів керованого об'єкта (дизель-генератора) на основі даних про поведінку об'єкта в динамічних режимах. Крім того, така інформація буде корисною при виборі стратегії керування.

Для ідентифікації параметрів дизель-генератора необхідно одержати огинаючу напруги статора при перехідному процесі, а також криву зміни частоти напруги статора (отже, і обертів дизеля). Використання аналогових запам'ятовувальних осцилографів вносить значну погрішність. Крім того,

досить важко автоматизувати процес обробки даних. При необхідності виміру декількох сигналів ускладнена їх одночасна обробка. Використання цифрових осцилографів дозволяє вирішити всі проблеми, пов'язані з одержанням, обробкою і зберіганням даних. Досить великою популярністю користуються осцилографічні приставки до комп'ютера (як правило, з USB-інтерфейсом).

Для детального вивчення динамічних властивостей до випробувального стенду ГДГА, що функціонує на заводі «Дизельмаш» (м. Первомайськ), на кафедрі ТЕЕС НУК розроблений і створений апаратно-програмний комплекс. Він включає в себе портативний персональний комп'ютер, багатоканальний осцилограф – USB-приставку до персонального комп'ютера, систему збору інформації контрольованих параметрів ГДГА, систему управління навантаженням, а також програмне забезпечення для вирішення завдань знімання, обробки інформації та управління зовнішніми комутаторами.

Структурна схема випробувального стенда представлена на рис. 1.1. Система збору інформації, яка побудована на базі мікроконтролера ATmega16, виконує збір даних про температуру масла (T_m), температуру охолоджуючої рідини (T_p), температуру навколишнього середовища (T_{nc}), а також вимірювання частоти обертів газодизеля (Ω). Сигнали з датчиків температури аналогові, тому після посилення сигналів виконується аналого-цифрове перетворення (10 біт) за допомогою АЦП, вбудованого до мікроконтроллера.

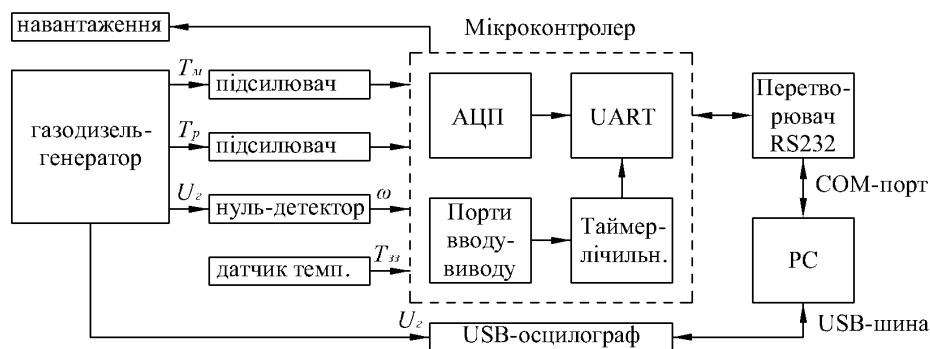


Рис. 1.1. Структурна схема випробувального стенда

Вимірювання обертів ГД виконується опосередковано (на основі частоти напруги на шинах генератора). Тому для формування імпульсного сигналу з сигналу напруги, пропорційного частоті ГД, використовується нуль-детектор. Далі цей сигнал поступає на вхід зовнішнього переривання мікроконтролера. За допомогою таймера-лічильника визначається період між сусідніми фронтами імпульсів, а отже й частота. Виміряні дані формуються в пакет і передаються до комп'ютера, де виконується їх подальша обробка. Для узгодження електричних рівнів мікроконтролера й СОМ-порта використовується спеціальний перетворювач. У свою чергу, програмне забезпечення, що працює на ПК, формує команди на зміну навантаження, що підключається (відключається) до генератора відповідно до алгоритму. За допомогою USB-осцилографа проводиться вимір напруги на шинах генератора, після чого будуються огинаюча напруги і крива зміни частоти.

На рис. 1.2 представлено головне вікно програми USB-осцилографа. Програма працює із пристроєм USB-осцилографа і призначена для моніторингу, збереження та аналізу даних. Програма доповнена найпростішими функціями редагування записаних сигналів (масштабування, цифрова фільтрація), має досить простий і зручний інтерфейс. Кількість аналогових виходів осцилографа дорівнює 8. При зміні числа використовуваних каналів пропорційно змінюється й частота дискретизації (максимальна частота дискретизації при використанні 1 каналу становить 10 кГц). Для синхронізації може використатися кожної з каналів осцилографа. Для автоматизації обробки даних зручно одержати масив чисел, що відповідають значенням вимірюваної величини.

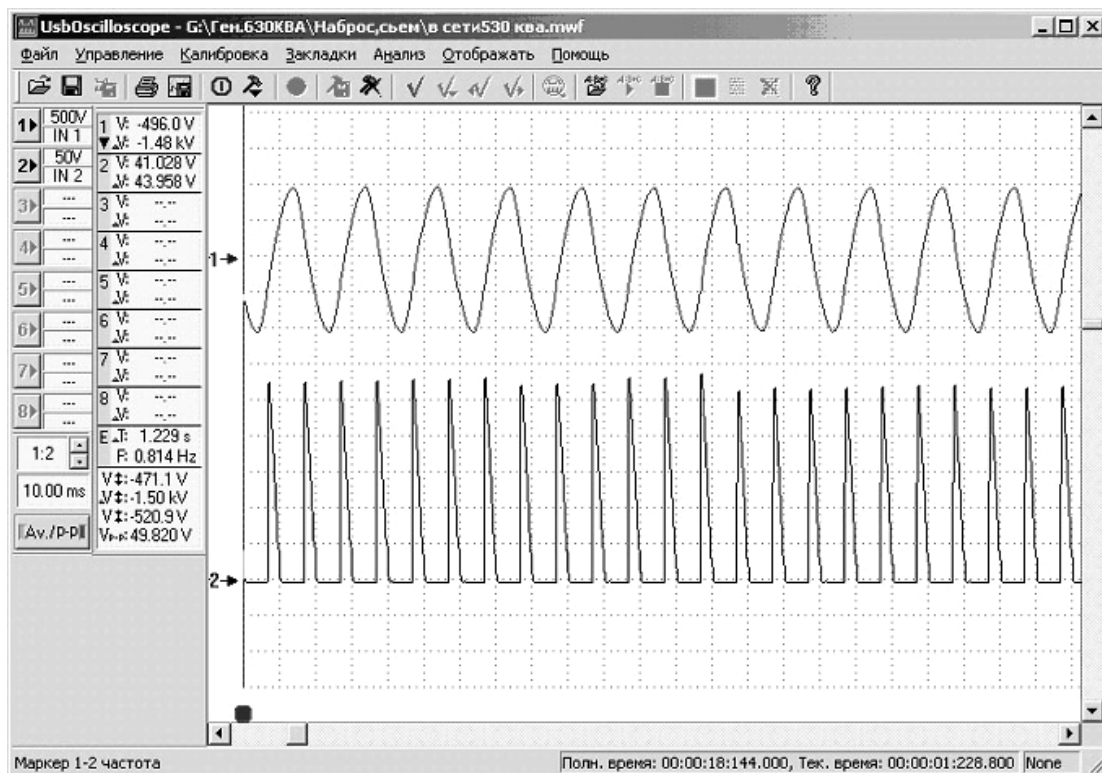


Рис. 1.2. Головне вікно програми USB-осцилографа

У даній програмі реалізована функція автоматичного аналізу записаної осцилограми на базі VBScript або JScript з одержанням файлу звіту. Користувач може написати скрипт на одній із зазначених мов, у якому попередньо отформатувати дані в зручному для подальшого аналізу форматі. Це може бути файл CSV, форматований текст та ін. Також можна використати більше складні алгоритми обробки даних.

1.2.1. Основні стандарти та особливості проведення випробувань

Обсяг і порядок проведення випробувань визначаються рядом стандартів й інструкцій, в першу чергу державними стандартами: «Двигуни автомобільні. Стендові випробування», «Двигуни тракторні і комбайнові. Стендові випробування» та ін. На основі цих стандартів розроблено ряд державних і галузевих стандартів, які визначають правила проведення випробувань різного виду. Серед міжнародних нормативних документів на випробування ДВС найбільш широко застосовуються Правила ЄЕК ООН

(ECE), Директиви ЄС, стандарти Міжнародної організації по стандартизації (ISO) і деякі інші [90, 91, 122].

Згідно із зазначеними стандартами повинен виконуватися ряд загальних умов, які закладені до алгоритму програми випробувань.

Пусковий режим, відповідно до зазначених умов, для визначення параметрів ГД не підходить, тому що в цьому режимі не встановилися теплові процеси і не вступають до дії регулятори дизеля. Але, в той же час, пусковий режим може використовуватися для уточнення інерційних мас (моменту інерції). Для цієї мети використовують як метод одиночної, так і метод подвійної розгонки [86].

Метод одиночної розгонки полягає в тому, що виконується розгін двигуна разом зі споживачем (генератором) при відключенні генератора від навантаження в заданому діапазоні зміни частоти валу Δn , або його кутової швидкості $\Delta \Omega$. За відомим обертовим моментом, в якості якого обирається середній $M_{\text{еср}}$ або номінальний $M_{\text{еном}}$, й експериментально визначеним часом пуску (час розгону) $\dot{O}_{i0}$, визначається момент інерції ДГ виходячи з співвідношень [31, 85]:

$$J_{\text{еср}} = \frac{T_{\text{пр}} M_{\text{еср}}}{\Delta \Omega},$$

$$J_{\text{еном}} = \frac{T_{\text{пр}} M_{\text{еном}}}{\Delta \Omega}.$$

Номінальний обертовий момент дизеля дорівнює:

$$M_{\text{еном}} = \frac{P_{\text{еном}} \cdot 9550}{n_{\text{ном}}}. \quad (1.2)$$

Середній ефективний обертовий момент двигуна за час розгону:

$$M_{\text{еср}} \cong 0,95 M_{\text{еном}}.$$

Щоб вирівняти значення $M_{\text{еном}}$ і $M_{\text{еср}}$ в досліджуваному інтервалі, початкові оберти обираються з величини, яка становить як мінімум (15 – 20)% від номінальних. Величина $\Delta \Omega$ знаходиться з виразу:

$$\Delta\Omega = \frac{\pi(n_{ном} - n_{нач})}{30}.$$

Наведені формули використовуються для уточнення розрахункового значення моменту інерції двигуна J_d і генератора $J_{\bar{a}}$.

Момент інерції двигуна пов'язаний з моментом інерції маховика приблизними співвідношеннями:

$$I_o \approx (1,2 \div 1,3) I_m,$$

$$J_i = \frac{mD_i^2}{2},$$

$$J_{\bar{a}} = \frac{mD_{\bar{a}}^2}{4}.$$

Виходячи з наведених формул, розроблений алгоритм проведення пускових випробувань газодизельного генераторного агрегату.

У більшості випадків, момент інерції генератора дається заводом-виробником. В цьому випадку є додаткова, відома приєднана до дизелю маса, яка і дозволяє використовувати метод подвійної розгонки. Основні формули, які використовуються в цьому випадку, наведені нижче:

$$J_{\bar{a}} \cdot \frac{\Delta\Omega}{T_{i\bar{o}1}} = M_{\bar{a}},$$

$$(J_{\bar{a}} + J_{\bar{a}}) \cdot \frac{\Delta\Omega}{T_{i\bar{o}2}} = M_{\bar{a}}.$$

Прирівнюючи ліві частини формул, отримуємо:

$$J_o \cdot \frac{\Delta\Omega}{T_{np1}} = (J_o + J_z) \cdot \frac{\Delta\Omega}{T_{np2}}.$$

Звідси:

$$J_o = \frac{J_z}{T_{np2}} \cdot \left(\frac{T_{np1} \cdot T_{np2}}{T_{np2} - T_{np1}} \right).$$

На жаль, при випробування перших ГД цей метод не використовувався, оскільки для генераторних навантажень заводом «Дизельмаш» вони виготовлялися як єдине ціле, тому провести пускові випробування ГД не представлялося можливим.

Пусковий режим дає можливість ідентифікувати динамічну модель газодизель-генераторного агрегату по керуючому впливу, використовуючи еталонні криві перехідних процесів. Час T_{np} визначається до моменту, коли $\Delta\Omega \leq 0,02 \Omega_{уст}$.

При проведенні експериментів скидання/набросу навантаження, визначається динамічна модель ГДГА по збурюючому впливу. Для створення моделі ГД необхідно визначити його постійні часу. ГД може бути представлений коливальною ланкою. Параметри цієї ланки визначають характер перехідного процесу (аперіодичний або коливальний), кількість періодів коливань, величину перерегулювання.

1.2.2. Алгоритм проведення випробувань

Алгоритм проведення випробувань полягає в послідовному збільшенні навантаження на 20% від номінального, починаючи з 20% навантаження генератора. Програмою передбачено, що динамічні режими скидання – набросу навантаження допускаються лише після встановлення режимних параметрів ГД. Після встановлення процесу, коли оберти ГД відрізняються від сталого значення не більше ніж на 2%, готується наступний процес набросу навантаження. Оскільки зазвичай перехідний процес повністю закінчується по закінченню інтервалу часу, що дорівнює $10T_{MAX}$ (T_{MAX} – максимальна постійна часу динамічної системи), то для даної групи дизелів часовий інтервал заданий жорстко і дорівнює 1 хв. Після послідовності набросів навантаження програмою передбачений автоматичний перехід на випробування скидання навантаження в аналогічних межах. Таких послідовностей випробувань проводиться не менше шести. Програма випробувань вирішує задачу автоматичного формування файлу випробувань. Для цього осцилограф включається за 2 секунди до сигналу набросу – скидання навантаження, і запис триває 60 секунд [90, 91, 122].

Оскільки в ГДГА, газодизель розміщений на одному валу з генератором і доступ до імпульсного датчика обертів обмежений, то частота

обертів визначалася опосередковано, за частотою напруги синхронного генератора.

Згідно з основними положеннями методології випробувань, була розроблена тестуюча програма, алгоритм якої представлений на рис. 1.3.

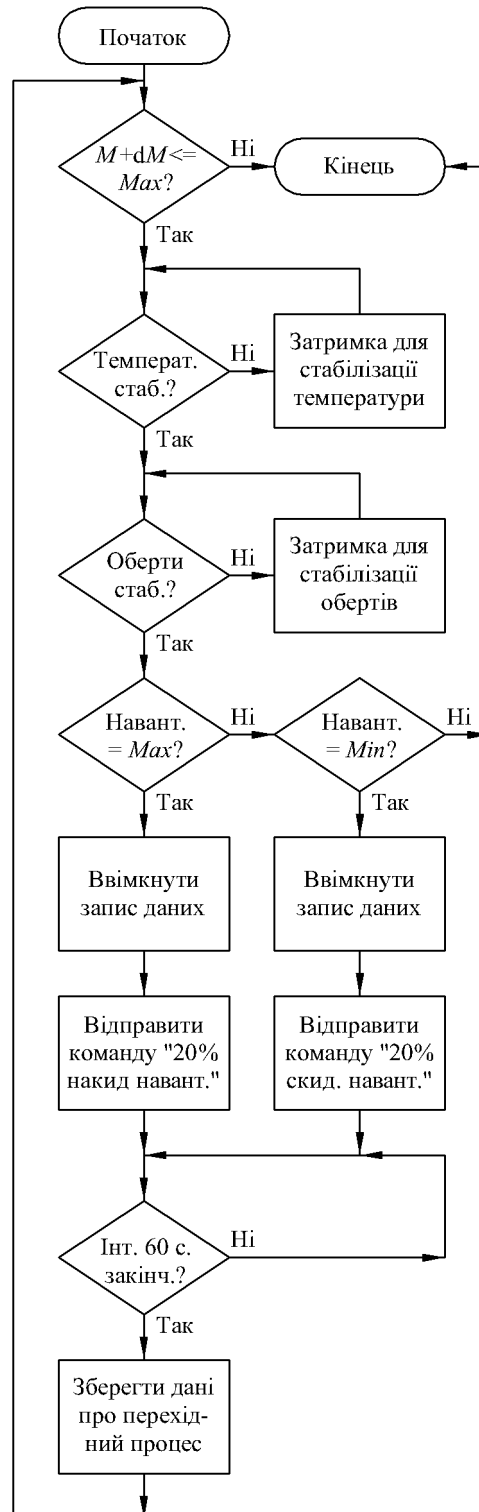


Рис. 1.3. Блок-схема алгоритму програми автоматизації випробувань

Після запуску алгоритму на виконання, виконується перевірка можливості завантаження ГД. Для цього використовується інформація, яка надходить з системи збору даних. Розрахунок моменту виконується за виразом (1.2).

Далі перевіряється стабільність температури. Для цього аналізується похідна температури, і якщо вона менше заданої межі, виконується наступний крок алгоритму. В іншому випадку формується затримка, протягом якої відбувається стабілізація теплового режиму. Аналогічним чином (аналізом похідної) визначається стабільність обертів.

Відсутність коливань обертів свідчатиме про завершення перехідного процесу, отже, дозволяється виконання наступного кроку алгоритму, в якому виконується контроль навантаження газодизель-генераторного агрегату. Якщо потужність ГД ще не досягла номінального значення, включається процедура запису даних про перехідний процес. Після цього формується команда збільшення навантаження ГД на 20%. Запис даних виконується протягом 60 секунд, поки відбувається стабілізація режиму роботи дизеля. Потім дані зберігаються в файл на жорсткий диск комп'ютера. Цей цикл повторюється до тих пір, поки навантаження на ГДГА не досягне номінальної величини. Якщо це відбулося, то починає виконуватися інша гілка алгоритму. Виконується запис даних про перехідний процес при скиданні навантаження, що становить 20% від номінальної потужності ГД. Ці дані також записуються на диск. Коли повний цикл навантаження/розвантаження генератора виконаний, і дані про перехідні процеси збережені на диск, програма завершує свою роботу.

1.3. Методологія обробки експериментальних даних

Для одержання огибаючої необхідно визначити точки максимуму кривої напруги. Після цього за допомогою фільтра, що інтерполіює, одержати масив значень, що відповідає огибаючій. Порядок фільтра дорівнює кількості відліків між двома сусідніми максимумами і може змінюватися залежно від

частоти вимірюваної напруги або частоти дискретизації. Найбільш простим способом виявлення точки максимуму є аналіз знаку першої похідної. Зміна значення похідної з позитивної величини на негативну величину відповідає максимуму. На рис. 1.4 представлена блок-схема алгоритму формування огинаючої вимірюваної напруги.

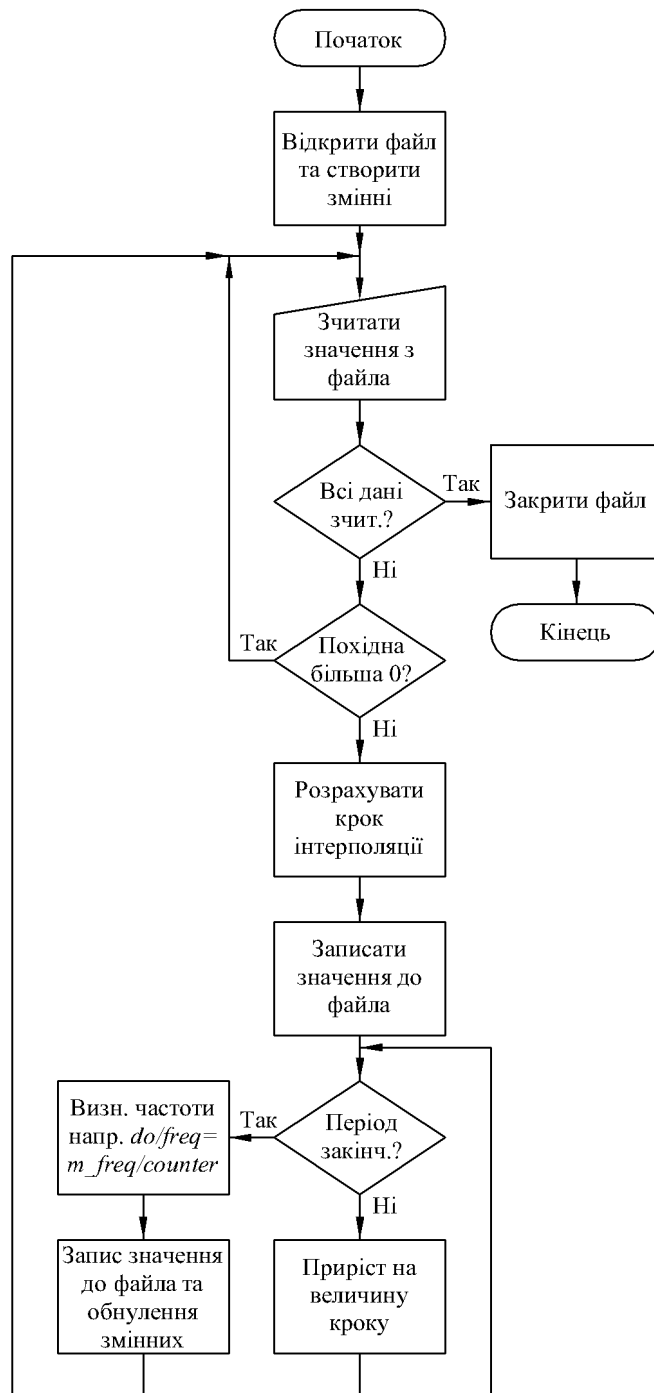


Рис. 1.4. Блок-схема алгоритму

Для одержання графіка зміни частоти напруги необхідно підрахувати кількість вибірок (змінна counter) на одному періоді. Оскільки частота, на якій працює аналого-цифровий перетворювач осцилографа, відома (змінна m_freq), множачи значення періоду дискретизації на кількість вибірок можна одержати значення періоду вимірюваної напруги (отже, і частоту). Для визначення кількості вибірок на одному періоді, необхідно відслідковувати моменти переходу напруги через нуль. Для цього використовується конструкція перевірки умови. Нижче приводиться фрагмент коду, що реалізує описані алгоритми.

```
// відкриття й створення файлів
CStdioFile f(m_fopen, CFile::modeRead | CFile::typeText);
CStdioFile fres(m_fogibsave, CFile::modeWrite | CFile::modeCreate |
CFile::typeText);
CStdioFile ffreq(m_ffreqsave, CFile::modeWrite | CFile::modeCreate |
CFile::typeText);
// поки не зчитані всі дані цикл виконується
while(f.ReadString(s)) {
    counter++; // інкрементування лічильника вибірок
    data=strtod((LPCTSTR)(LPCTSTR)s,&ststr); // перетворення рядка
    if((var<data) && (flag==false)) var=data; // пошук максимуму
    if((data<=0) && (flag==false))// якщо період закінчений
    {
        flag=true;
        temp=(var-prevvar)/counter; // обчислення кроку інтерполяції
        for(int i=0;i<counter;i++) {
            prevvar=prevvar+temp; // збільшення на величину кроку
            sres.Format("%.2f\r",prevvar); // форматування рядка
            fres.WriteString((LPCTSTR)sres); // запис у файл
        }
    }
    freq=(double)m_freq/counter; // визначення частоти напруги
    sres.Format("%.2f\r",freq); // форматування рядка
    ffreq.WriteString((LPCTSTR)sres); // запис у файл
    prevvar=var; // запам'ятовування попереднього значення максимуму
    var=0; // обнуління додаткових змінних
    counter=0;
}
// якщо період закінчився, повернення у вихідний стан
if((data>0) && (flag==true)) flag=false;
f.Close(); // закриття файлів
```

```
fres.Close();  
ffreq.Close();
```

На рис. 1.5 представлені графіки виміряної напруги і сформованої огибаючої.

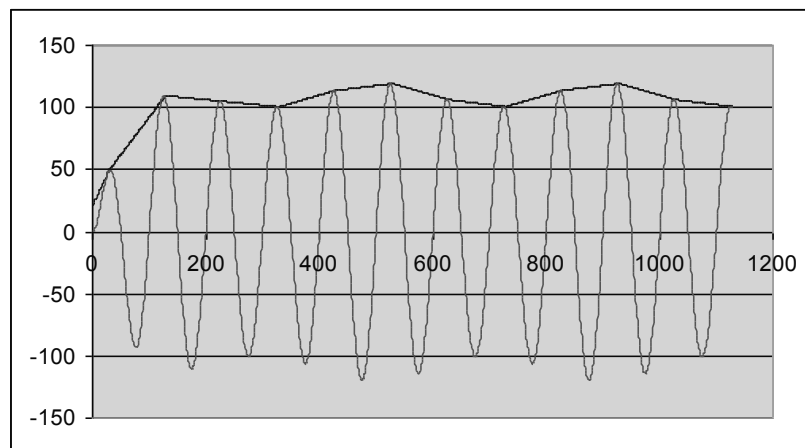


Рис. 1.5. Графіки напруги на статорі генератора та огибаюча

На рис. 1.6 представлено діалогове вікно програми, що виконує обробку результатів вимірювання.

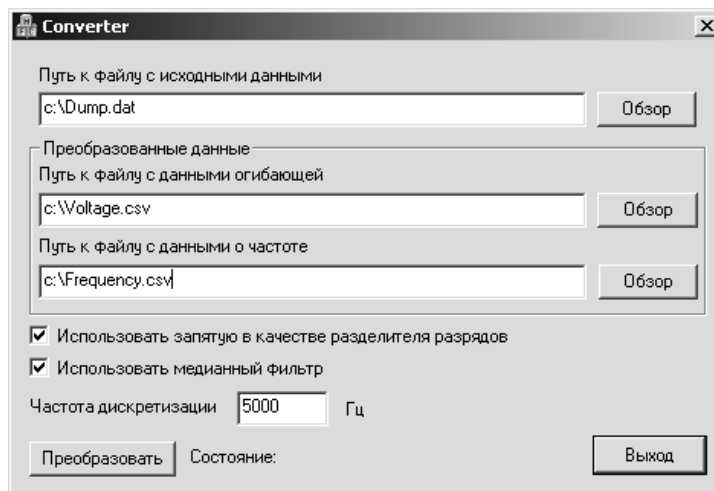


Рис. 1.6. Діалогове вікно програми

При вимірюванні частоти напруги виникають труднощі, пов'язані з нестабільністю частоти аналого-цифрового перетворення. Впродовж деякого числа періодів похибка накопичується, і в результаті виникає помилка у визначенні частоти на одному періоді. Використання цифрового КІХ або НІХ

фільтра значною мірою вплине на обмірювані значення частоти. Застосування медіанного фільтра дозволить усунути помилку, разом з тим не вплине на інші значення

1.4. Визначення діапазону обмінних коливань активної потужності

На рис. 1.7 представлена характерна для розглянутих агрегатів осцилограма (результати отримані за допомогою цифрової апаратури без наступної обробки) коливань частоти вихідної напруги дизель-генератора потужністю 500 кВт у часовому інтервалі 45 сек. при активній потужності, що віддається, 100 кВт.

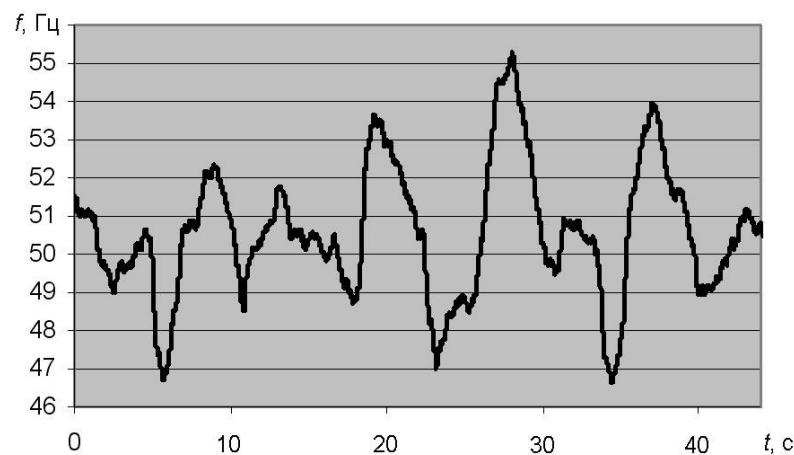


Рис. 1.7. Графік зміни частоти газодизеля

Осцилограма ілюструє значні (45÷55 Гц) коливання частоти напруги, а отже і обертів газового дизеля, які будуть приводити до значних коливань активної потужності. Сталий режим роботи двигуна може порушуватися в результаті зміни кількості енергії на підведенні або відводі, коли порушується рівність ефективного моменту й моменту опору. При цьому фактори, що послужили причинами зміни моментів можуть діяти короткочасно (пропуск спалаху в циліндрі) і тривалий час. Якщо після припинення дії факторів зміни ефективної потужності або потужності опору рівність моментів не виконується, то сталий режим не відновлюється і двигун працює хитливо. При роботі електростанції між генераторами

спостерігається коливання активної потужності. Амплітуда коливань активної потужності може досягати декількох десятків відсотків від номінальної потужності генератора. Рис. 1.8 ілюструє оброблені експериментальні дані для таких же дизель-генераторів, при роботі в діапазоні до 60% від номінальної потужності.

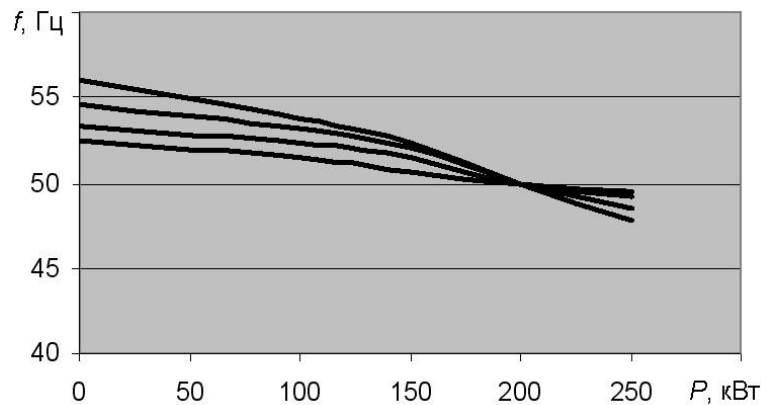


Рис. 1.8. Розкид статичних характеристик газодизеля

Дизелі працюють із мікропроцесорною системою стабілізації частоти обертання фірми Heinzmann DG...2-01, що реалізує функції ПІД-регулятора, що налаштовується на кожен дизель окремо. Як датчик частоти обертання використовується магнітний датчик, що зчитує інформацію про кутове положення вала із зубчастого вінця маховика, що забезпечує високу кутову точність інформації про частоту обертання. Частота вихідних імпульсів датчика визначається по формулі:

$$f = \frac{n \cdot t \cdot z}{60}, \quad (1.3)$$

де n – частота обертання вала дизеля (об/хв.); z – кількість зубців зубчастого вінця маховика, і перебуває зазвичай в межах 12000 Гц (для регуляторів DG162-01, DG302-01, DG402-01, DG6.2-01, DG.6V.2-01, DG-10.2-01).

Розподіл активної потужності між генераторами при відсутності спеціальних пристроїв визначається нахилами характеристик $n=f(P)$ агрегатів і неточністю регулювання швидкості. Зона неточності регулювання залежить від нечутливості регуляторів швидкості і нелінійності характеристик. Під зоною неточності регулювання розуміється зона, що лежить між двома

прямолінійними і паралельними характеристиками 1 та 2, у межах якої розташовуються дійсні криві $n=f(P)$. При наявності зони неточності регулювання 2Δ навіть при однакових статичних характеристиках $n=f(P)$ паралельно працюючих генераторів, активні потужності між генераторами можуть розподілятися відповідно до характеристик 1 та 2 [67].

Нехай підтримується частота обертання генераторів $n=52$ Гц. Максимальна можлива нерівномірність розподілу активної потужності між генераторами буде в тому випадку, якщо одна крайня характеристика $n = f(P)$ (наприклад 1) відноситься до першого генератора, а друга крайня характеристика (2) – до другого генератора. Тоді при заданій зоні неточності регулювання 2Δ , певному $\operatorname{tg}\alpha=\delta$ і номінальній частоті обертання n , потужність P_1 визначиться за допомогою характеристики 1 а потужність P_2 – по характеристиці 2. Абсолютна нерівномірність розподілу активної потужності дорівнює різниці $P_1 - P_2$.

Ступінь нерівномірності розподілу активної потужності може бути обчислена по формулі [67]:

$$\nu_p = \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \cdot 100\% . \quad (1.4)$$

Підставивши у формулу (1.2) числові значення, одержимо:

$$\nu_p = \frac{165 - 45}{165 + 45} \cdot 100\% = 57,1\% .$$

Якщо $P_2 \approx 0$, $\nu_p = 1$, все навантаження прийняте на перший генератор. Якщо $P_1 \approx 0$, $\nu_p = -1$ все навантаження прийняте на другий генератор, якщо $P_1 = P_2$, $\nu_p = 0$, навантаження розподілене рівномірно.

У літературі в ряді випадків ν_p визначають (при однаковій потужності генераторів) по формулі:

$$\nu_p = \frac{P_1 - P_2}{2P_N} \cdot 100\% , \quad (1.5)$$

$$\nu_p = \frac{165 - 45}{2 \cdot 500} \cdot 100\% = 12\% .$$

При такому визначенні ступеня нерівномірності абсолютна нерівномірність ставиться до незмінної величини $2P_N$. Тому при різному сумарному навантаженні ступінь нерівномірності виявляється недооціненою при малих завантаженнях системи і переоціненою – при великих завантаженнях системи.

Ступінь нерівномірності розподілу активної потужності при заданій зоні неточності регулювання 2Δ залежить від статизму характеристики δ , при великому статизмі ν_p зменшується. Статизм характеристики можна визначити по формулі:

$$\delta = \operatorname{tg} \alpha = \frac{n_1 - n_2}{P_N}. \quad (1.6)$$

Максимальне і мінімальне значення статизму при сумарному навантаженні генераторів до 100 кВт можна визначити по формулі (1.6), підставивши числові значення швидкості й потужності у відносних одиницях.

$$\delta_{\max} = \frac{1,122 - 1,078}{0,2} = 0,22,$$

$$\delta_{\min} = \frac{1,052 - 1,03}{0,2} = 0,11.$$

З рис. 1.6 можна визначити значення у відносних одиницях:

$$P_1 - P_2 = \frac{2\Delta}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (1.7)$$

Підставимо цей вираз в (1.2), одержимо:

$$\nu_p = \frac{2\Delta}{\operatorname{tg} \alpha (P_1 + P_2)} \cdot 100\% \quad (1.8)$$

Формула (1.8) дає можливість визначити ν_p для різних значень зони неточності регулювання 2Δ , статизму характеристик і завантаження станції. Для наведених характеристик значення зони неточності регулювання дорівнює:

$$2\Delta = \frac{56,1 - 52,7}{50} \cdot 100\% = 6,8\%.$$

Підставивши числові значення у формулу (1.8), можна визначити ступінь нерівномірності розподілу активної потужності (при завантаженні генераторів на половину своєї номінальної потужності).

$$\nu_p = \frac{0,068}{0,22 \cdot (0,5 + 0,5)} \cdot 100\% = 30,9\%.$$

Ступінь нерівномірності розподілу активної потужності різко зростає при заданій 2Δ і δ у міру зменшення навантаження станції $P_1 + P_2$ і при заданій 2Δ і $P_1 + P_2$ – у міру зменшення δ .

При однаковій потужності генераторів таке обчислення не викликає ускладнення і отримується за допомогою формули (1.4), причому в цьому випадку потужності P_1 і P_2 можуть бути представлені як у відносних одиницях, так і в іменованих величинах. Для генераторів різної потужності формула (1.4) справедлива лише при вимірі P_1 і P_2 у відносних одиницях кожної з машин. Тому обчислення потужностей P_1 і P_2 трохи ускладнюється, тому що в цьому випадку при певному ν_p повинна бути цілком певна потужність $P_p = P_1 + P_2$, яку не можна обчислити безпосередньо за допомогою (1.4). Цю формулу, де P_k вимірюється в кіловатах краще представити у вигляді

$$\nu_p = \frac{P_1 \frac{P_{2N}}{P_{1N}} - P_2}{P_1 \frac{P_{2N}}{P_{1N}} + P_2} \cdot 100\%. \quad (1.9)$$

Розрахунок ведеться в масштабі одиниць одного з генераторів (у розглянутому випадку другого).

При даних P_{np} , 2Δ і $\operatorname{tg}\alpha$ значення активних потужностей першого й другого генераторів визначаються формулами:

$$P_1 = \frac{P_{HP} + \frac{2\Delta}{\operatorname{tg}\alpha} \cdot P_{2N}}{P_{1N} + P_{2N}}, \quad (1.10)$$

$$P_1 = \frac{P_{HP} - \frac{2\Delta}{\operatorname{tg}\alpha} \cdot P_{1N}}{P_{1N} + P_{2N}}. \quad (1.11)$$

Передбачається, що у виразах (1.6) – (1.11) абсолютна нерівномірність розподілу активної потужності відноситься до змінної величини P_1 – P_2 . При створенні генераторних агрегатів таке трактування може внести невизначеність. Тому абсолютну різницю потужностей відносять до постійної величини, як це зроблено в (1.5) для агрегатів однакової потужності. Для агрегатів неоднакової потужності ν_p визначається виразом:

$$\nu_p = \left(\frac{P_j}{P_{jN}} - \frac{\Sigma P_k}{\Sigma P_{kN}} \right) \cdot 100\%, \quad (1.12)$$

де P_j – фактичне навантаження j -го генератора, кВт; P_{jN} – номінальна потужність j -го генератора, кВт, $j=1, 2, \dots, n$.

В окремому випадку, для установки із двома генераторами неоднакової номінальної потужності маємо:

$$\nu_p = \frac{P_1 \frac{P_{2N}}{P_{1N}} - P_2}{P_{1N} + P_{2N}} \cdot 100\%. \quad (1.13)$$

Радикальним засобом для зменшення ν_p є установка спеціального автоматичного пристрою розподілу активної потужності між генераторами. За допомогою датчиків активного струму вимірюються і вирівнюються між собою активні струми генераторів. Потім сигнал підсилюється і подається на систему керування дизелем, що впливає на механізм зміни уставки по частоті обертання. При будь-якій неузгодженості навантаження, що перевищує межу чутливості пристрою, серводвигуни (або крокові двигуни) починають обертатися, змінюючи положення характеристик паралельно працюючих генераторів так, щоб при даному навантаженні вони сполучилися в одній точці, що відповідає частоті напруги на шинах і заданій потужності навантаження. Швидкісну характеристику одного з агрегатів (базового) зберігають незмінною. Якщо на вхід розглянутого пристрою базового агрегату включити вихід датчика частоти, що вимірює відхилення частоти на

шинах від значення заданого уставкою датчика, то в процесі зміни навантаження електростанції частота буде залишатися в межах точності пристрою автоматичного регулювання частоти. При збільшенні навантаження, частоти всіх генераторів зміщуються відповідно до астатизму регуляторів швидкості. Під дією пристрою регулювання частоти характеристика базового агрегату почне переміщатися нагору. У результаті базовий агрегат почне перевантажуватися активною потужністю. Через виникнення нерівномірності навантаження швидкісні характеристики інших агрегатів також почнуть переміщатися нагору паралельно самим собі. Процес переміщення характеристик буде тривати доти, поки не встановиться нульове відхилення частоти і рівномірний розподіл навантаження.

Принципово можна задати розподіл навантаження не пропорційний номінальним потужностям агрегатів. Точність розподілу активного навантаження може бути отримана в межах 1–5% від P_N агрегату найменшої потужності при утриманні частоти з точністю 0,1–0,5 % від f .

Більшість пристроїв розподілу активної потужності формують імпульсний сигнал на збільшення/зменшення обертів дизеля [12]. При цьому частота проходження імпульсів керування постійна. Оскільки характеристики навіть однакових дизелів відрізняються, повністю усунути коливальні процеси не вдається. Крім того, при різних величинах навантаження генераторів, постійна часу і коефіцієнт підсилення дизелів різні. Тому в пристроях розподілу потужності необхідно враховувати ці параметри і відповідним чином змінювати характер керуючого впливу.

При використанні газових мотор-генераторів необхідно застосовувати електронні регулятори з мікропроцесорними блоками керування. Вони мають такі переваги, як стабільне дозування газу незалежно від зовнішніх умов, стабільність параметрів у часі, можливість корекції складу газо-повітряної суміші. Програмування регулятора повинне проводитися з урахуванням фактичних режимів навантаження, при цьому вибирається оптимальний

нахил регуляторної характеристики, інакше можливі надмірні відхилення по частоті напруги або неконтрольовані коливальні процеси.

1.5. Дослідження автоколивальних процесів частоти напруги генератора

Для того, щоб вирішити проблему паралельної роботи газодизель-генераторних агрегатів, необхідно провести детальні дослідження коливань частоти генерованої напруги і визначити їхні чисельні параметри.

Аналіз літературних джерел показує, що існує кілька причин, що призводять до появи низькочастотних коливань обертів дизелів. В [35, 49] вказується на можливість появи коливань обертів і погіршення динамічних властивостей дизеля через дискретність знімання інформації про оберти вала дизеля. Установлено, що при дискретності знімання інформації близької або меншої інтервалу між двома спалахами в циліндрах можуть з'являтися биття, що призводять до нерівномірності обертання. Для розглянутого агрегату це явище виключене, оскільки при частоті обертання вала 600 об/хв дизель має 6 (ГДВГ-1А-630 і ГДВГ-1А-500) або 8 (ГДВГ-1А-800) циліндрів, що становить інтервал між спалахами відповідно 0,018 сек та 0,012 сек. У той же час датчик обертів, розміщений по обіду маховика діаметром 1,5 метра з інтервалом дискретності 2 см має дискретність, рівну 2355 імп/с, що становить інтервал менше 0,5 мс.

В [49] одній із причин виникнення автоколивань у замкнутих системах автоматичного регулювання із двигунами внутрішнього згоряння, вказується наявність зони нечутливості в контурі подачі палива. У розглянутій структурі двигуна така зона має місце в широтно-імпульсному регуляторі керування заслінкою подачі повітря (газу), що приводить до зниження контурного коефіцієнта підсилення по формулі:

$$k_{\varepsilon} = 1 - \frac{2}{\pi} \left[\arcsin \frac{\varepsilon}{2a} + \frac{\varepsilon}{2a} \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon}{2a} \right)^2} \right],$$

де a – амплітуда коливань.

Зниження коефіцієнта підсилення пов'язане з амплітудою автоколивань. Чим більша амплітуда, тим більшою мірою знижується коефіцієнт підсилення і, природно, якщо система не має достатнього запасу стійкості, то при наявності регулярних впливів, що обурюють, перехідні процеси будуть супроводжуватися слабо загасаючими коливаннями із приблизно стабільною частотою. Це, якоюсь мірою, частково пояснює природу автоколивань, але реальні автоколивання розташовані в порівняно широкому частотному діапазоні.

Однією із причин низькочастотних коливань є наявність у системі чистого запізнювання, що для системи другого порядку сприяє їхньому виникненню й підтримці в певному частотному діапазоні.

Дійсно, якщо двигун описується ланкою другого порядку, характеристичне рівняння буде мати вигляд:

$$T_2^2 p^2 + T_1 p + \exp(-\tau p) = 0.$$

Розкладаючи експоненту в ряд Тейлора і з огляду на три члени розкладання

$$\exp(-\tau p) = 1 - \tau p + (\tau p)^2,$$

одержимо вираз:

$$(T_2^2 + \tau^2) p^2 + (T_1 - \tau) p + 1 = 0,$$

з якого витікає, що запізнювання в системі призводить до зниження частоти власних автоколивань і збільшенню ступеня коливальності системи.

Однак зазначені причини навіть при наявності постійних збурюючих впливів, не в змозі привести до настільки значних коливань, які є в реальному агрегаті. Очевидно, що основною причиною помітних коливань обертів є нерівномірність подачі палива, оскільки газ подається без якої-небудь попередньої підготовки і, можливо, непостійна теплотворна здатність газу. Аналогічні виводи зроблені і в [35].

Проведений аналіз показує, що існуюча гама дестабілізуючих факторів роботи двигуна не дозволяє прогнозувати коливання обертів його вала, а тим

більше визначати їхні чисельні значення. Тому єдиним реальним способом виконання таких досліджень є експериментальні.

На рис. 1.9 наведені фрагменти реалізацій процесів, що описують коливання частоти вихідної напруги газодизель-генераторного агрегату ГДВГ-1А-630 при різних навантаженнях (40% і 80% від номінальної), які отримані шляхом обробки експериментальних результатів реальної вихідної напруги з наступною частковою цифровою фільтрацією шумів квантування, які мають місце в процесі цифрової обробки.

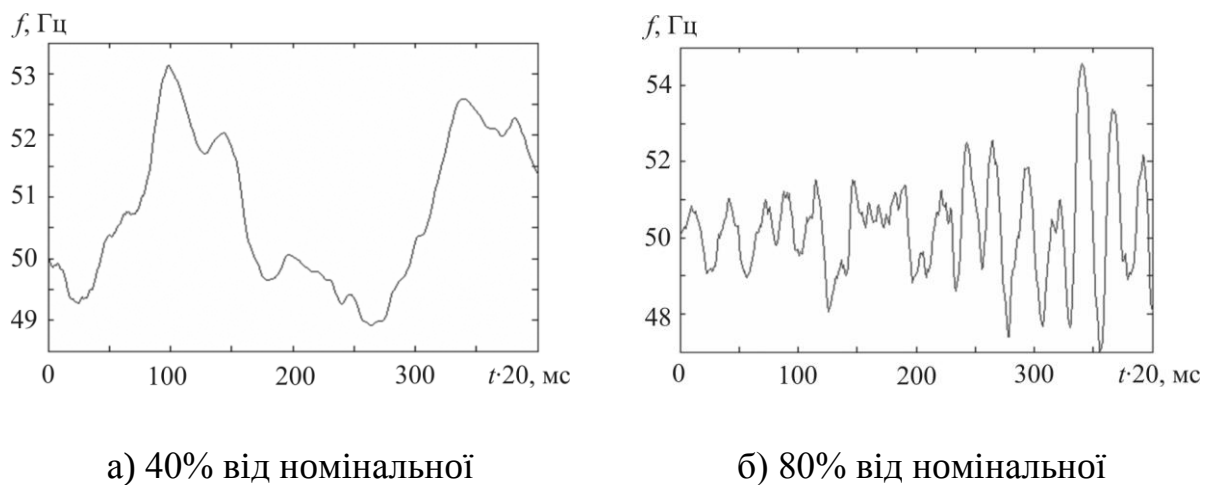


Рис. 1.9. Осцилограми коливань частоти вихідної напруги ГДГА при різних навантаженнях

Ці реалізації носять випадковий характер, однак одержання файлів їхніх реалізацій відкриває широкі можливості їхньої обробки як класичними методами, так і за допомогою спеціалізованих програмних засобів, таких як Matlab, Matcad та ін.

Детальний аналіз отриманих результатів показує, що в загальному випадку процес коливань частоти є нестационарним з математичним очікуванням і дисперсією, що змінюються. Тому обробка експериментальних даних виконувалася для фіксованих навантажень, для кожної з яких можна прийняти випадковий процес стаціонарним та ергодичним. Обчислення математичного очікування M_ω і середньоквадратичного відхилення σ_ω коливань частоти, виконані відповідно до формул:

$$M_{\omega} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n),$$

$$\sigma_{\omega}^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x(n) - M_{\omega}]^2.$$

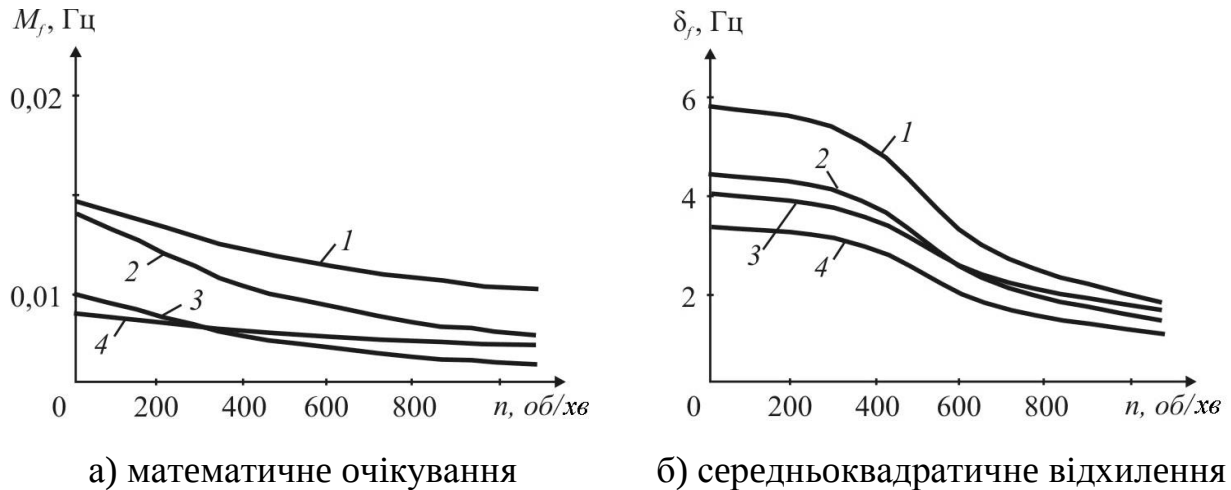


Рис. 1.10. Графіки залежності статистичних характеристик від відносного навантаження

На рис. 1.10 наведені результати обчислення математичного очікування та середньоквадратичного відхилення залежно від значень відносного навантаження P/P_H для 4-х агрегатів, з яких видно, що обидва параметри мають тенденцію зростання зі зниженням навантаження на валу ГД. Фізично це можна пояснити тим, що ГД є нелінійним елементом, коефіцієнт підсилення якого зростає зі зниженням навантаження. Оскільки параметри регулятора налаштовуються на номінальний режим роботи із заданими вимогами до динамічних параметрів, зростання коефіцієнта підсилення сприяє зростанню коефіцієнта коливальності.

З метою побудови математичної моделі газодизель-генератора необхідно визначити статистичні характеристики коливань обертів. Це можна зробити використовуючи сигнал напруги статора генератора. Характеристики визначаються для трьох точок, в яких потужність навантаження дорівнює 100 кВт, 150 кВт та 250 кВт.

Для побудови імовірнісної моделі експерименту необхідно знати, за яким законом розподілені експериментальні дані. При побудові гістограми (рис. 1.11) важливо вибрати необхідне число інтервалів, у які попадає випадкова величина. У даному випадку 50 крапок. Потім по вертикальній вісі гістограми відкладається кількість відліків f_i або нормована частота

$$F_i = \frac{f_i}{n},$$

попадають в i -й інтервал (n – загальний обсяг випадкової вибірки).

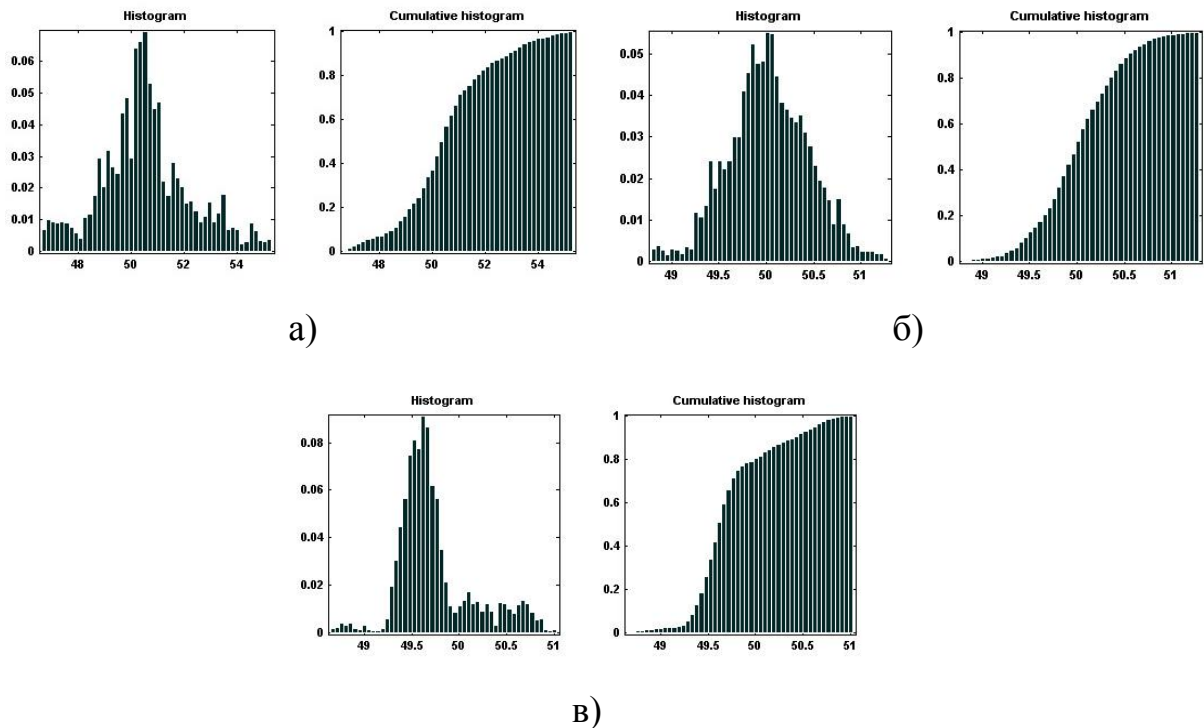


Рис. 1.11. Гістограми сигналів коливань обертів при різних навантаженнях:

(а) – 100 кВт; (б) – 150 кВт; (в) – 250 кВт

У табл. 1.1 наведені числові значення статистичних характеристик вимірюваних сигналів.

Таблиця 1.1. Числові значення статистичних характеристик

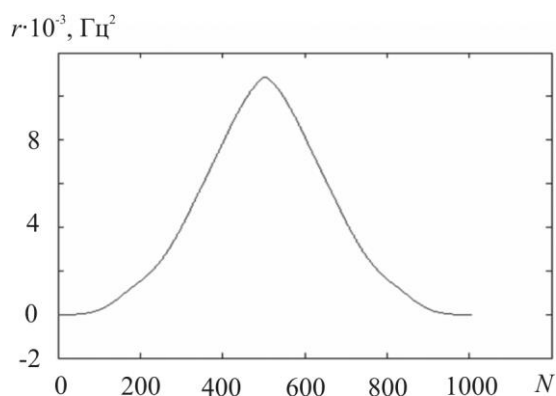
Параметр	Середнє,	Максимум,	Мінімум,	Розкид,	Стандартне
Навантаження	$f_{\text{ср}}, \text{Гц}$	$f_{\text{max}}, \text{Гц}$	$f_{\text{min}}, \text{Гц}$	$f_{\text{max}} - f_{\text{min}}, \text{Гц}$	відхилення
100 кВт	50,55	55,3	46,62	8,672	1,648
150 кВт	50,02	51,29	48,78	2,507	0,4247
200 кВт	49,73	51,03	48,64	2,39	0,4117

Автокореляційна функція процесу може бути обчислена відповідно до формули:

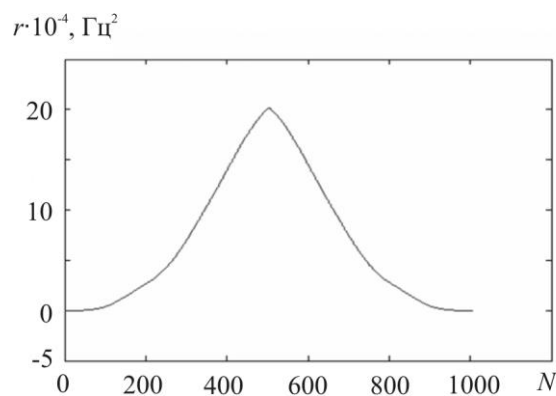
$$r_{11}(j) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_1(n)x_1(n+j) \quad (1.14)$$

де N – кількість відліків.

На рис. 1.12 наведені графіки автокореляційних функцій, отриманих після обробки експериментальних даних для кожного з фіксованих навантажень.



а) при навантаженні дизеля 40%



б) при навантаженні дизеля 80%

Рис. 1.12. Автокореляційні функції

Апроксимація отриманих експериментальних кореляційних функцій типовими показує, що для більшої частини діапазону навантажень випадковий процес можна описати експоненціальною кореляційною функцією

$$r(\tau) = \sigma^2 \cdot \exp(-\alpha|\tau|),$$

якій відповідає спектральна щільність:

$$S(\omega) = \sigma^2 \cdot \frac{\alpha}{\alpha^2 + \Omega^2}.$$

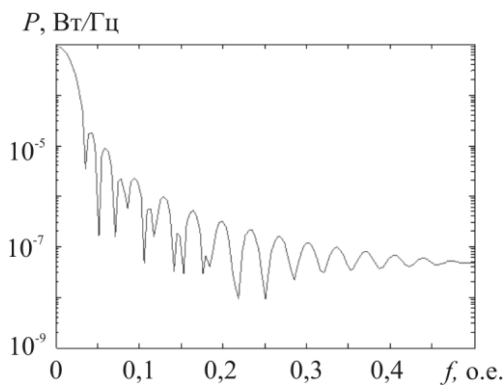
За досить великої постійної часу α для діапазону навантажень $P=(0,4 - 1)P_H$; $\alpha \approx 0,3 - 0,4$ сек. У діапазоні навантажень $P=(0 - 0,4)P_H$ кореляційна функція з більшою вірогідністю може бути апроксимована виразом вигляду:

$$r(\tau) = \sigma^2 \cdot \exp(-\alpha|\tau|) \cos \Omega\tau,$$

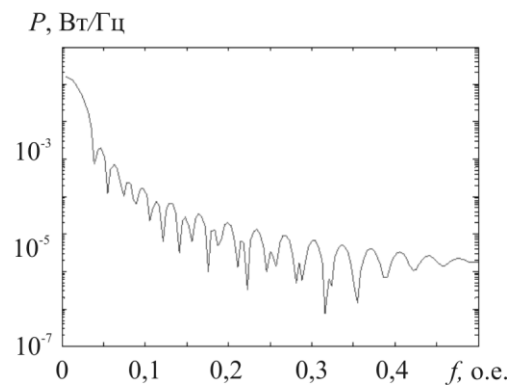
а спектральна щільність апроксимована виразом:

$$S(\omega) = \sigma^2 \cdot \frac{\alpha}{\alpha^2 + (\omega - \Omega)^2}.$$

На рис. 1.13 представлені відповідні кореляційним функціям спектральні щільності коливань частоти.



а) при навантаженні дизеля 40%



б) при навантаженні дизеля 80%

Рис. 1.13. Спектральні щільності коливань частоти

Для підтвердження вірогідності отриманих результатів для однієї з реалізацій була отримана автокореляційна функція процесу з використанням методу обчислень по формулі (1.14) (суцільна лінія), з використанням Matlab (зображення крапками), а також з використанням Matcad (зображення пунктирною лінією), представлена на рис. 1.14.

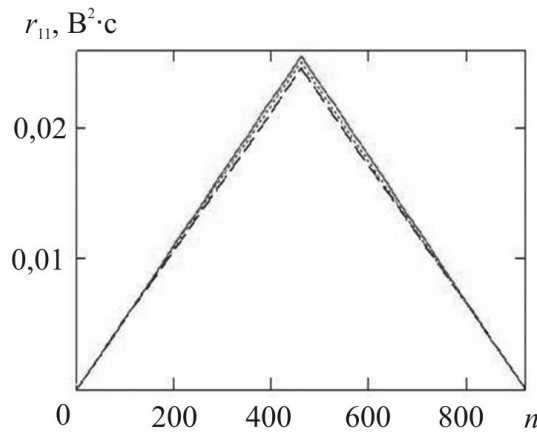


Рис. 1.14. Автокореляційна функція

1.5.1. Причини появи низькочастотних коливань

Коливання частоти обертання валу приводного двигуна генератора, що призводять до коливань частоти напруги, є визначальними при паралельній роботі машин, оскільки призводять до появи обмінних коливань потужності, величини яких можуть досягати неприпустимих значень. Тому для автономних електроенергетичних систем введені стандарти на коливання частоти напруги.

ГДГА не задовільняють вимогам по стабільності частоти. Тому для того, щоб вирішити проблеми їхньої паралельної роботи, необхідно провести детальні дослідження коливань частоти напруги й визначити їх чисельні параметри.

Аналіз літературних джерел показує, що існує кілька причин, що призводять до появи низькочастотних коливань обертів дизелів. В [47] вказується на можливість появи коливань обертів і погіршення динамічних властивостей дизеля через дискретність знімання інформації про оберти валу дизеля. Встановлено, що при дискретності знімання інформації близької або меншої інтервалу між двома спалахами в циліндрах можуть з'являтися биття, що призводять до нерівномірності обертання. Для розглянутого агрегату це явище виключене, оскільки при частоті обертання валу 600 об/хв дизель має 6 (ГДВГ-1А-630 та ГДВГ-1А-500) або 8 (ГДВГ-1А-800) циліндрів, в яких інтервал між спалахами становить відповідно 0,018 та 0,012 сек. У той же час

датчик обертів, що розташований по обіду маховика діаметром 1,5 метри з інтервалом дискретності 2 см має дискретність 2355 імп/сек, що становить інтервал менше 0,5 мс.

В [82] однією із причин виникнення автоколивань у замкнених САР із ДВЗ вказується наявність зони нечутливості в апаратурі подачі палива. У розглянутій структурі двигуна така зона $\varepsilon/2$ має місце в широтно-імпульсному регуляторі керування заслінкою подачі повітря (газу), що призводить до зниження контурного коефіцієнту підсилення у формулі:

$$k_{\varepsilon} = 1 - \frac{2}{\pi} \left(\arcsin \frac{\varepsilon}{2a} + \frac{\varepsilon}{2a} \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon}{2a} \right)^2} \right),$$

де a – амплітуда коливань.

Зниження коефіцієнту підсилення пов'язане з амплітудою автоколивань. Чим більша амплітуда, тим більшою мірою знижується коефіцієнт підсилення, і якщо система не має достатнього запасу стійкості, то при наявності регулярних збурюючих впливах перехідні процеси будуть супроводжуватися слабо затухаючими коливаннями із приблизно стабільною частотою. Це якоюсь мірою частково пояснює природу автоколивань, але реальні автоколивання розташовані в порівняно широкому частотному діапазоні.

В [90] вказується, що однією із причин низькочастотних коливань є наявність у системі чистого запізнювання, що для системи другого порядку сприяє їх виникненню й підтримці в певному частотному діапазоні.

Дійсно, якщо двигун описується ланкою другого порядку, характеристичне рівняння буде мати вигляд:

$$T_2^2 p^2 + T_1 p + \exp(-\tau p) = 0.$$

Розкладаючи експоненту в ряд Тейлора й з огляду на три члени розкладання:

$$\exp(-\tau p) = 1 - \tau p + (\tau p)^2,$$

одержимо:

$$(T_2^2 + \tau^2) p^2 + (T_1 - \tau) p + 1 = 0,$$

з якого витікає, що запізнювання в системі призводить до зниження частоти власних автоколивань і збільшенню ступеня коливальності системи.

Однак зазначені причини навіть при наявності постійних збурюючих впливів не в змозі привести до настільки значних коливань, які є в реальному агрегаті. Очевидно, що основною причиною настільки помітних коливань обертів є нерівномірність подачі палива, оскільки газ подається без якої-небудь попередньої підготовки і, можливо, має непостійну теплотворну здатність газу. Аналогічні висновки зроблені й в [136]. В [116] автори вказують ще на одну причину коливань крутного моменту й обертів дизеля – це нерівномірність кута випередження впорскування палива, що фактично підтверджує результати роботи [136].

Проведений аналіз показує, що існуюча гама дестабілізуючих факторів роботи двигуна не дозволяє прогнозувати коливання обертів його валу, а тим більше теоретично визначати їхні чисельні значення. Тому єдиним реальним способом виконання таких досліджень є експериментальні.

1.5.2. Вплив геометрії газорозподільчої системи на виникнення низькочастотних коливань

У відповідності з описом роботи ГДГА була розроблена структурна схема даного агрегату. Відомо, що потужність на валу двигуна визначається виразом:

$$P = M \cdot \omega ,$$

де M – момент на валу, ω – частота обертання валу.

Також можливо обчислити енергію, що виділяється двигуном за 1 оберт колінчатого валу (1 умовний цикл):

$$E_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}\dot{\alpha}} = P \cdot t_{\dot{\alpha}} ,$$

де $t_{\dot{\alpha}} = \frac{1}{\omega}$ – час умовного циклу.

Знаючи ККД. двигуна, можна обчислити енергію, що споживається двигуном за 1 умовний цикл:

$$E_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}} = \frac{E_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}\dot{\alpha}}}{\eta}.$$

Відомо, що вхідна енергія, що виділяється при згорянні палива, визначається виразом:

$$E_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}} = q \cdot m_{\dot{\alpha}},$$

де q – теплотворна здатність палива, $m_{\dot{\alpha}}$ – маса палива, що споживається за 1 умовний цикл. Отже

$$m_{\dot{\alpha}} = \frac{E_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}}}{q}.$$

Маса палива $m_{\dot{\alpha}}$ може бути представлена у вигляді:

$$m_{\dot{\alpha}} = N_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}\dot{\alpha}} \cdot V_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}\dot{\alpha}} \cdot \rho,$$

де $N_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}\dot{\alpha}}$ – кількість циліндрів двигуна, $V_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}\dot{\alpha}}$ – об'єм одного циліндру, ρ – густина палива. Тоді

$$\rho = \frac{E_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}}}{q \cdot N_{\text{цил}} \cdot V_{\text{цил}}}.$$

Густина газу (палива) може бути розрахована з використанням рівняння Менделєєва – Клапейрона:

$$\rho = \frac{p_{\dot{\alpha}} \cdot M}{R \cdot T},$$

де p_T – тиск газу, R – універсальна газова постійна, T – температура газу. Тоді

$$p_T = \rho \cdot R \cdot T \cdot \frac{1}{M}.$$

З цього можна зробити висновок, що

$$p_T = \frac{E_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}}}{q \cdot N_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}\dot{\alpha}} \cdot V_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}\dot{\alpha}}} \cdot R \cdot T \cdot \frac{1}{M}.$$

Фактично система подачі палива в газовий двигун представляє собою трубу діаметра d . Паливо подається з однієї сторони труби, а циліндри розташовані впродовж неї. Схема продольного перетину двигуна представлена на рис. 1.15.

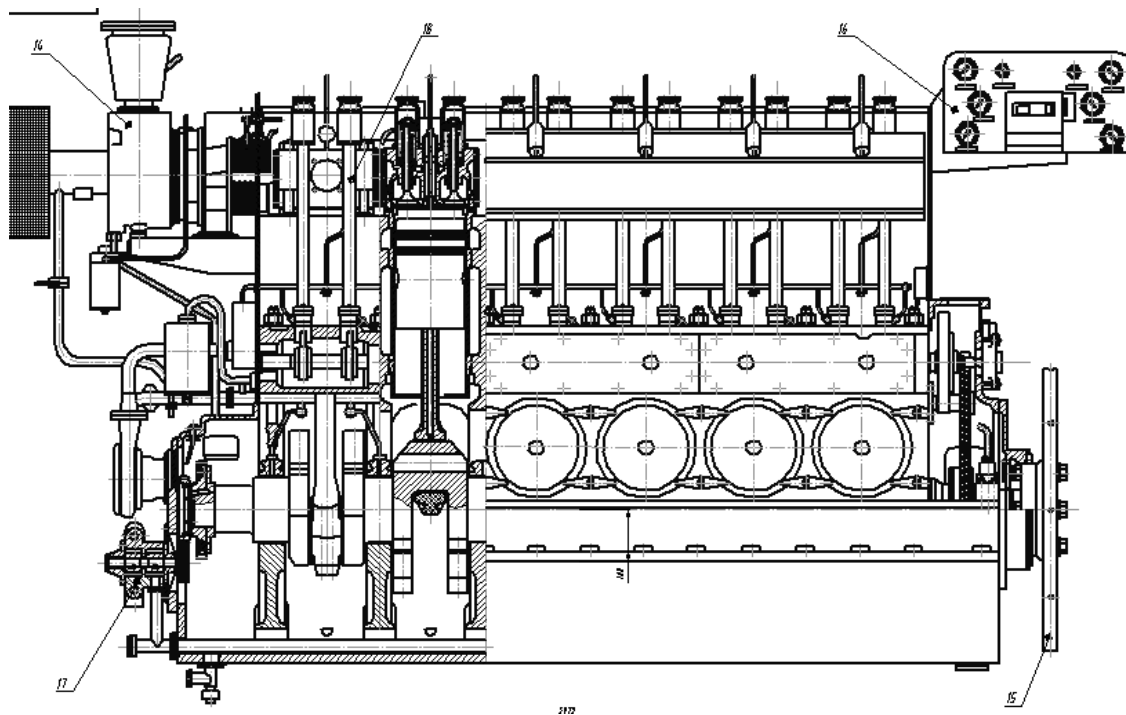


Рис. 1.15. Схема продольного перетину двигуна

Недоліки даної геометрії проявляються при малих швидкостях руху газоповітряної суміші: кількість палива, що поступає в різні циліндри суттєво відрізняється. Швидкість руху газу в трубі можна визначити з виразу:

$$v_{\text{до}} = N_{\text{ц}} \cdot V_{\text{ц}} \cdot \frac{1}{S_{\text{до}}} \cdot \omega,$$

де $V_{\text{ц}}$ – об'єм одного циліндру, $N_{\text{ц}}$ – кількість циліндрів, $S_{\text{до}}$ – площа перетину труби, ω – частота обертів валу.

Однак даний вираз описує середню швидкість за 1 умовний цикл. Миттєві значення швидкості руху газоповітряної суміші різні для кожного циліндру. Різниця між часом надходження газу в перший та останній циліндр по трубі визначається виразом:

$$\Delta t_{\text{ц}} = \frac{l_T}{v_T},$$

де l_T – відстань між крайніми циліндрами.

Для прикладу розглянемо двигун 6ГЧН25/34. Потужність двигуна $P = 670 \text{ кВт}$, частота обертання ротора $\omega = 750 \text{ хв}^{-1}$, об'єм циліндра

$V_{\text{цил}} = 16,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, час умовного циклу $t_{\text{о}} = \frac{1}{\omega} = 80 \cdot 10^{-3} \text{ с}$. Енергія, що виділяється за 1 умовний цикл дорівнює $E_{\text{адо}} = P \cdot t_{\text{о}} = 53600 \text{ Дж}$. З урахуванням ККД, енергія на вході системи

$$E_{\text{вх}} = \frac{E_{\text{адо}}}{\eta} = \frac{53600}{0,35} = 153143 \text{ Дж}.$$

Тиск газу:

$$p_T = \frac{E_{\text{вх}}}{q \cdot N_{\text{цил}} \cdot V_{\text{цил}}} \cdot R \cdot T \cdot \frac{1}{M} = \frac{153143}{50 \cdot 10^6 \cdot 6 \cdot 16,7 \cdot 10^{-3}} \cdot 8,31 \cdot 323 \cdot \frac{1}{16 \cdot 10^{-3}} = 5122 \text{ Па}.$$

Швидкість руху газу в трубі:

$$v_T = N_{\text{цил}} \cdot V_{\text{цил}} \cdot \frac{1}{S_{\text{тр}}} \cdot \omega = 6 \cdot 16,7 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{7,85 \cdot 10^{-3}} \cdot 12,5 = 159,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Різниця часу між надходженням газу в перший та останній циліндр визначається виразом:

$$\Delta t_{\text{цил}} = \frac{l_T}{v_T} = 12,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

1.6. Ідентифікація параметрів газодизель-генераторного агрегату

Оскільки вивченню дизелів, що використовуються для самих різноманітних цілей, приділяється дуже велика увага як у нашій країні, так і за рубежом, їхні експериментальні дослідження досить серйозно регламентовані широкою гамою нормативних документів [101, 102]. В той же час, практично всі вони орієнтовані на дослідження власне дизеля, де факторами, що використовуються для проведення експерименту, вибираються витрата палива, коефіцієнт надлишку повітря, тиск у компресорі і т.п. Тому план експерименту в таких роботах кардинально відрізняється від тих, які необхідні для дослідження газодизель-генераторних агрегатів (ГДГА).

Для визначення необхідних параметрів і характеристик ГДГА варто проводити пасивні і активні експерименти [101, 102].

Статистичний аналіз характеристик експериментальних моделей показує, що їх точність істотно залежить від вибору умов проведення експерименту, тобто є функцією плану експерименту. Це значить, що за допомогою планування експерименту необхідна точність може бути досягнута при мінімальному числі дослідів, менших витратах часу і засобів на їх проведення.

З огляду на те, що газодизель, з погляду теорії автоматичного регулювання є нелінійним об'єктом, то при проведенні експерименту необхідно задавати величини збурень, які б забезпечували подання моделі в даній точці, як лінійної.

Поводження ГДГА визначається за значенням даних, тобто вихідних параметрів, якими є напруга і частота генератора. У теорії планування експерименту ці параметри назвемо цільовими функціями, або функціями відгуку. Їх виміри здійснюються при цілеспрямованій зміні вхідних параметрів – навантаження або моменту на валу і струму збудження, які називаються факторами.

Математичні моделі, одержувані методами планованого експерименту, дозволяють апроксимувати залежність між вхідними і вихідними параметрами об'єкта деякою математичною функцією (рівняння регресії), що містить певну кількість коефіцієнтів. Коефіцієнти цієї функції вибираються за експериментальними даними таким чином, щоб відхилення апроксимуючої функції від експериментальних значень не перевищувало припустимих величин. Вид апроксимуючої функції визначається виходячи з раніше накопиченого досвіду. Для рішення більшості прикладних технічних завдань рекомендуються поліноміальні моделі. Їх зручність полягає в тому, що опис поведінки об'єкта легко уточнити шляхом підвищення порядку полінома. Дослідження, проведені деякими авторами [101, 102, 119, 120] показують, що характер кривих, що відображають зв'язки двигунів внутрішнього згоряння з режимними і регулювальними параметрами наближаються до параболічних

законів, тому для їхнього опису рекомендуються поліноми другого порядку виду:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + \dots + b_{kk} x_k^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + \dots + b_{ij} x_i x_j \quad (1.15)$$

де x_i, x_j – фактори проведеного експерименту (навантаження генератора і струм збудження); Y – досліджувані функціональні залежності (оберти ГДГА, величина напруги генератора).

Для розглянутого випадку дослідження навантажувальних характеристик ГДГА, тобто залежностей обертів на валу Ω (частоти напруги ω) від величини навантаження (активної потужності P , що віддається, моменту M на валу), досить проведення однофакторного експерименту. Для цього випадку рівняння регресії (1.15) спрощується:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_{11} x_1^2.$$

При описі складних об'єктів, коли аналітичний вираз функції відгуку не відомий, або дуже складний, рівняння регресії представляють поліномом виду:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^K b_i x_i + \sum_{i \neq j}^K b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^K b_{ii} x_i^2, \quad (1.16)$$

де K – число незалежних факторів.

Для випадку двох незалежних змінних рівняння (1.16) спрощується і приймає вид:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 \quad (1.17)$$

Коефіцієнти полінома можна розглядати як коефіцієнти розкладання в ряд Тейлора, тобто вони визначають значення часток похідних в околиці точки, у якій виробляється розкладання невідомої функції.

Поліноміальна модель досить універсальна і зручна для рішення практичних завдань. Для однофакторної і двофакторної моделей вона легко піддається геометричній інтерпретації. Якщо, наприклад поліном не містить коефіцієнтів взаємного зв'язку факторів ($b_{ij}=0$), то поверхня відгуку представляє площину. Двофакторна модель другого порядку залежно від

коефіцієнтів b_{ij} представляє собою одну з поверхонь другого порядку (параболічного циліндра, еліптичного параболоїда і т.п.). Абсолютні значення коефіцієнтів оцінюють ступінь і характер впливу кожного з факторів на функцію Y . Коефіцієнти рівнянь (1.16) і (1.17) розраховуються методом найменших квадратів.

Враховуючи що при паралельній роботі ГДГА працюють із мінімальним навантаженням, що становить 20% від номінальної, для одержання достатньої точності експерименту попередньо можна прийняти п'ять рівновіддалених контрольних точок у діапазоні (20 – 100) % номінальної потужності. Для цього випадку формули для визначення коефіцієнтів рівняння регресії будуть мати вигляд:

$$b_0 = y_3; \quad b_1 = [(y_4 + y_5) - (y_1 + y_2)]/3; \quad b_{11} = [(y_1 + y_5) - y_3]/2,$$

де $y_1 \dots y_5$ – середні значення y у порядку зростання значень x , показані на рис. 1.16 (оберти $y = \Omega$ у функції моменту $M = x$).

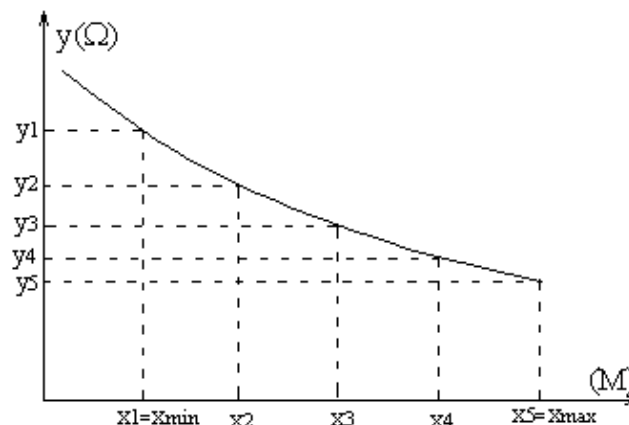


Рис. 1.16. Вигляд функціональної залежності

Найбільш якісно і ефективно коефіцієнти полінома визначаються з використанням сучасних програмних засобів (рис. 1.17).

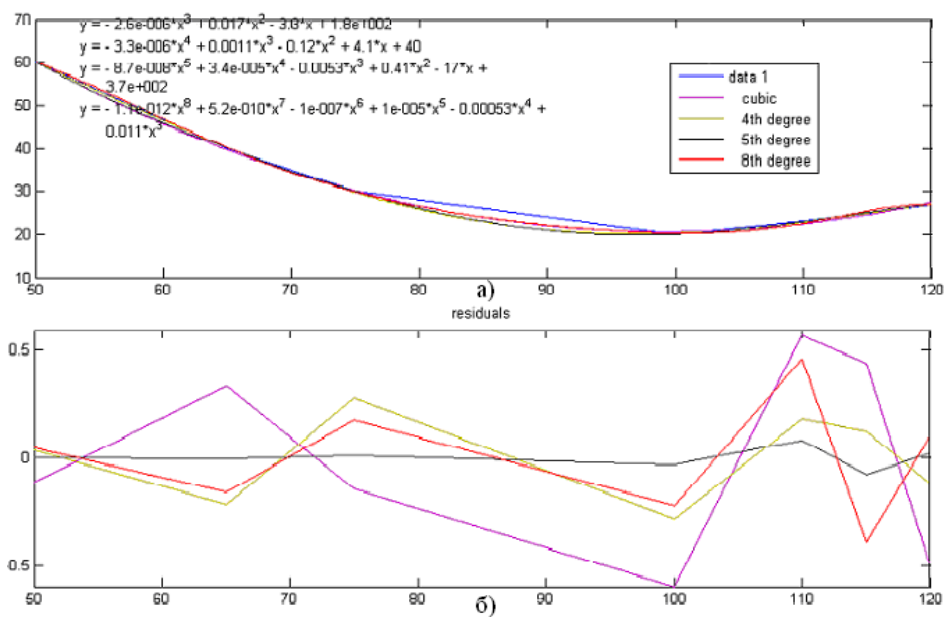


Рис. 1.17. Результати апроксимації і графік помилки

Як видно із графіка, найменша помилка апроксимації виходить при використанні полінома 5-го ступеня. Однак зі збільшенням порядку полінома помилка починає зростати. Із графіка видно, що при використанні полінома 8-го ступеня помилка апроксимації більше, ніж при використанні полінома 4-го ступеня.

В існуючий час запропоновані різні схеми класифікації нейронних мереж і відповідні алгоритми їхнього навчання. Одним з найпоширеніших алгоритмів навчання є так званий алгоритм зворотного поширення помилки. Апроксимація кривої виконується в пакеті Fuzzy Logic Toolbox системи MATLAB, у якому реалізовані гібридні нейронні мережі ANFIS. При цьому терми вхідних лінгвістичних змінних описуються стандартними функціями приналежності, а терми вихідної змінної представляються лінійною або постійною функцією приналежності. З іншого боку, гібридна мережа ANFIS являє собою систему нечіткого виводу типу Сугено нульового або першого порядку, у якій кожне із правил нечітких продукцій має постійну вагу, що дорівнює 1. Для створення гібридної мережі необхідно завантажити у програму дані. Файл із даними – звичайний текстовий файл, у якому кожен рядок представляє собою матрицю, у якій кількість рядків відповідає обсягу

вибірки, останній стовпець – значенню вихідної змінної, а інші стовпці – значенням вхідних змінних.

Для порівняння, апроксимація кривої буде виконуватися з використанням термів трикутної і гауссівської форм. Навчання мережі виконується гібридним методом, що представляє собою комбінацію методу найменших квадратів і методу зменшення зворотного градієнта.

На рис. 1.18 представлена структура нейронної мережі. Для дослідження побудованої моделі гібридної мережі можна скористатися програмою перегляду правил. Для одержання значення, що цікавить, вихідній змінній необхідно задати конкретне значення вхідної змінної.

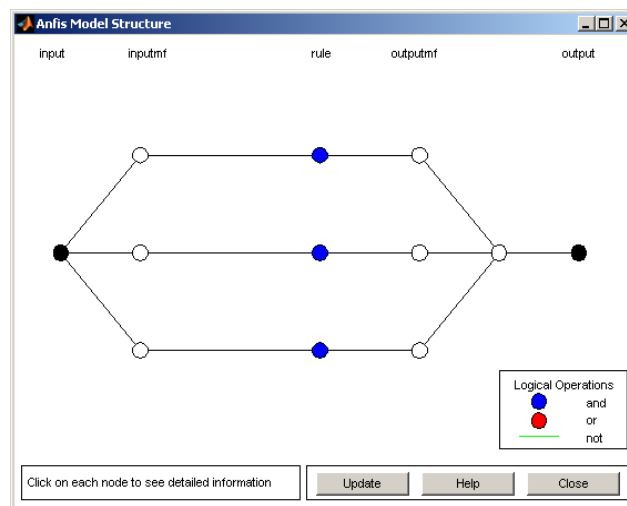


Рис. 1.18. Структура нейронної мережі

На рис. 1.19 представлені апроксимовані криві при використанні трикутних (1) і гауссівських (2) функцій приналежності. Вихідна крива позначена на малюнку номером 3.

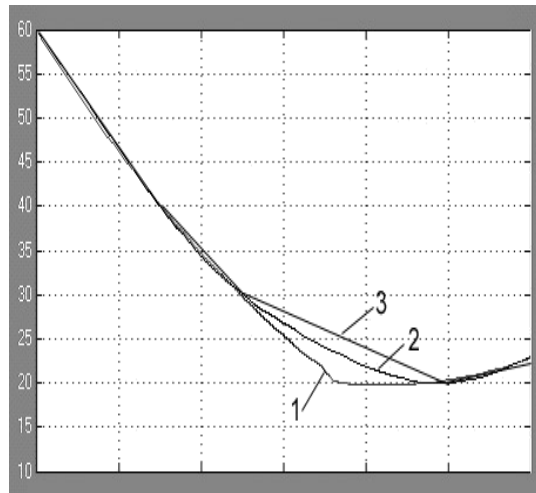


Рис. 1.19. Апроксимовані криві

Як видно з малюнка, використання гауссівських функцій приналежності дозволяє більш точно апроксимувати вихідну криву, що підтверджується і значенням помилки навчання мережі – для термів трикутної форми помилка становить 0,22344, а для гаусівських термів помилка дорівнює 0,034395. Слід зазначити, що у випадку недостатньої інформації навчальних даних використання гібридних мереж може виявитися взагалі недоцільним, оскільки одержати адекватну нечітку модель, а значить – і точний прогноз значень вихідний змінної не представляється можливим.

Розроблена модель гібридної нейронної мережі може бути використана при моделюванні енергетичних систем з газодизелями.

В пакеті System Identification Toolbox використовується наступна модель об'єкту у просторі станів:

$$\begin{aligned} x(t+1) &= Ax(t) + Bu(t) + Ke(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + e(t) \end{aligned} \quad (1.18)$$

Використання цього представлення дозволяє враховувати шуми і знаходити лінеаризовані рівняння нелінійних об'єктів.

У випадку параметричної моделі вигляду:

$$A(q)y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t - nk) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t)$$

$G(q)$ визначається по формулі:

$$C(q) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{nc} q^{-nc},$$

а $H(q)$ з:

$$H(q) = C(qI_{nx} - A)^{-1} K + I_{ny},$$

де n_y – розмірність $y(t)$ і $e(t)$.

Після завантаження вхідних і вихідних даних (експериментальні дані) у пакет Identification Toolbox, вікно програми матиме вигляд, представлений на рис. 1.20.

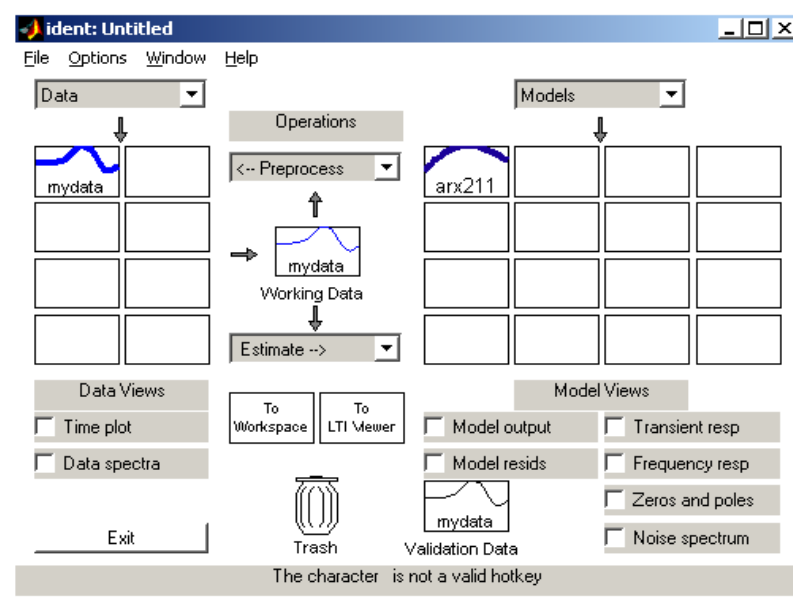


Рис. 1.20. Вікно задання параметрів

Виконуємо ідентифікацію об'єкта (рис. 1.21).

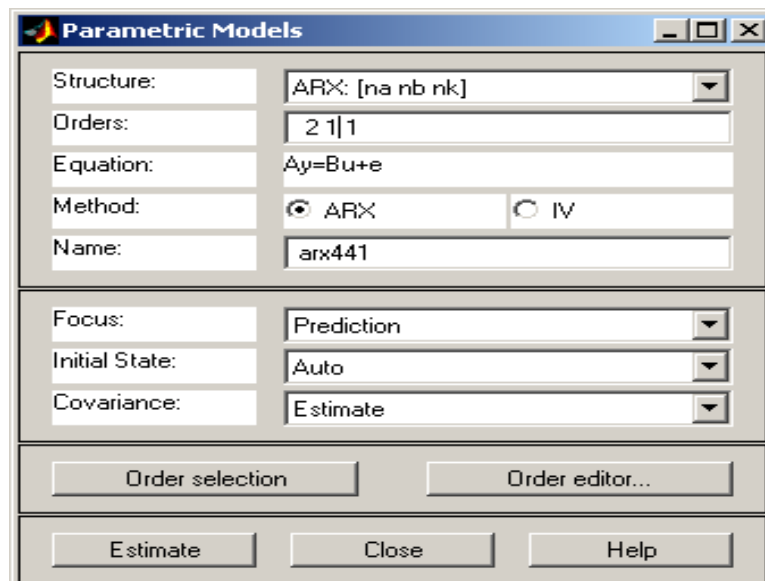
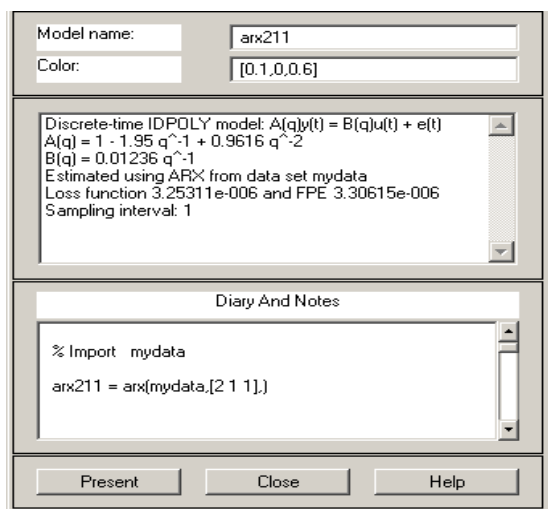
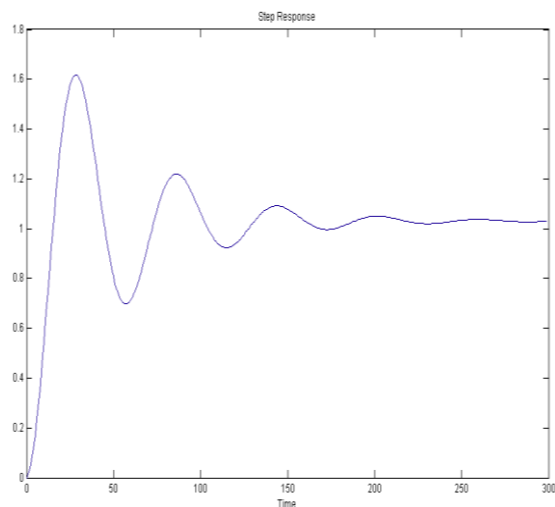


Рис. 1.21. Задання структури об'єкта

У параметрах моделі (рис. 1.22, а) можна бачити коефіцієнти передаточної функції ідентифікованого об'єкта. На рис. 1.22, б, наведена осцилограма ідентифікованого об'єкта.



а) параметри моделі



б) перехідна характеристика

Рис. 1.22. Результати ідентифікації

Величина перерегулювання, час перехідного процесу і коливальність ідентичні.

Висновки

1. Газодизелі, що випускаються промисловістю, орієнтовані на використання змішаного палива. При роботі на одному газі технічні характеристики цих машин не задовільняють багатьом вимогам по якості електроенергії, що знижує область їх застосування.

2. Динамічні моделі дизелів з турбонагнітачем, незважаючи на велику кількість робіт у цьому напрямку, недостатньо обґрунтовані й не доведені до структурних схем, які можуть бути використані на практиці. Практично відсутнє глибоке фізичне обґрунтування ролі й місця турбонагнітача в загальній структурі дизеля, що ускладнює ефективне використання сучасних мікропроцесорних систем керування.

3. На основі результатів експериментальних досліджень встановлено, що коливання обертів газодизелів носять нестационарний характер, що не

дозволяє їм працювати паралельно з аналогічними агрегатами через неприпустимо великі обмінні коливання активної потужності.

4. Експериментальна перевірка нерівномірності розподілу активної потужності між генераторами показує, що реальні значення v_p трохи менше, ніж граничні розрахункові. Пояснюється це тією обставиною, що регулятори перебувають увесь час у дії, і їх робота на граничних характеристиках малоймовірна. Однак у реальних умовах, у ряді випадків, нерівномірність розподілу активного навантаження може досягати 30–50% від P_N (розрахункова v_p при $P_p=1,0$ та $2\Delta=6,8\%$ дорівнює 30,9%).

5. Системи, що забезпечують паралельну роботу дизель-генераторних агрегатів, розраховані лише на усунення нерівності статичних характеристик дизель-генераторних агрегатів і малопригодні при наявності власних коливальних процесів у кожній машині. Це призводить до необхідності більш детальних досліджень у цьому напрямку й розробки більш ефективних систем, що забезпечують пропорційний розподіл активної потужності між дизель-генераторними агрегатами.

6. Комутаційні процеси, обумовлені підключенням і відключенням навантажень, призводять до коливань частоти і напруги мережі, спектр яких перебуває в тому ж частотному діапазоні, що і спектр коливань обертів газодизель-генераторів, що сприяє виникненню обмінних коливань потужності між паралельно працюючими генераторами.

7. Для зменшення величини коливань частоти газодизелів і зниження нерівномірності розподілу активної потужності між паралельно працюючими агрегатами, необхідно ввести в контур керування обертами газодизелів компенсаційний пристрій, який би керував подачею палива в циліндри шляхом впливу на паливну рейку.

8. У статичних режимах газодизель-генераторний агрегат може бути з високою точністю представлений простою нейромережевою моделлю. Для такого подання зручно використання методу адаптивних систем нейро-нечіткого виводу.

РОЗДІЛ 2

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ГАЗОДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОГО АГРЕГАТУ ТА АНАЛІЗ ЙОГО ПОВЕДІНКИ В РІЗНИХ УМОВАХ

2.1. Математична модель газодизель-генераторного агрегату

Для побудови високоефективних систем розподілу активної потужності при наявності постійних збурюючих впливів (випадкові підключення – відключення навантаження), а також через власні коливання частоти обертання валів приводних двигунів, необхідно з достатньою для практики точністю визначити вид та параметри динамічної моделі ГДГА. Загальна динамічна модель ГДГА містить в собі як механічні, так і електричні параметри. Але, оскільки електричні процеси в генераторі при відсутності управління за збудженням протікають у багато разів швидше, ніж механічні, то їх загальний вплив на динаміку системи можна не враховувати. Обумовлено це також тим, що активна потужність, яка віддається генератором в мережу живлення:

$$P = \sqrt{3}UI \cos\varphi = M\Omega, \quad (2.1)$$

де U , I – діючі значення струму і напруги генератора, φ – кут зсуву фаз; M – момент на валу ГД; Ω – оберти ГД.

Навіть у тих випадках, коли має місце регулювання по збудженню через системи АРВ (автоматичного регулювання збудження), швидкодія останніх як мінімум на порядок перевищує швидкодію механічних систем [11, 24, 30, 31]. Тому врахування впливу генератора на динаміку ГДГА здійснюється лише урахуванням інерційних мас ротора генератора.

Динамічні властивості дизеля в літературі описуються на різних рівнях складності – від систем 9-го порядку до першого [5, 68-75]. У більшості випадків авторами побудовані адекватні моделі. Підсистема диференціальних рівнянь, що описують перехідний процес в механічних елементах, має вигляд:

$$J_{\Omega} = \frac{N_i(g_u, \Omega, \eta_i)}{\Omega} - M_{\text{МП}}(\Omega) - M_{\text{ДОП}}(\Omega) - M_e,$$

$$J_{T_k} \Omega_{T_k} = \frac{(N_T(p_T, p_0, T_T, \Omega_{T_k}) - N_k(p_T, p_0, T_T, \Omega_{T_k}))}{\Omega_{T_k}} \quad (2.2)$$

де J_{Ω} , J_{T_k} – моменти інерції мас, приведених до колінчатого валу і ротору турбокомпресора; Ω , Ω_{T_k} – кутові швидкості колінчастого валу і ротора турбокомпресора; N_i – індикаторна потужність дизеля; $M_{\text{МП}}$ – момент механічних втрат; $M_{\text{ДОП}}$ – момент навантаження допоміжних агрегатів; M_e – момент навантаження; N_T , N_k – механічна потужність турбіни і компресора; g_u – циклова подача палива; η_i – індикаторний К.К.Д. дизеля; p_T, p_k, p_0 – тиск перед турбіною, після компресора і навколишнього середовища відповідно; T_T, T_0 – температура газів перед турбіною і навколишнього середовища; $N_i, M_{\text{МП}}, M_{\text{ДОП}}, N_T, N_k$ – відомі функції своїх аргументів.

Підсистема диференціальних рівнянь, що описують перехідний процес в ресивері, виводиться на основі рівнянь енергетичного і матеріального балансу, і за допомогою рівняння газового стану може бути зведена до системи двох диференціальних рівнянь вигляду:

$$p = f(G_{BX}, G_{BIX}, T_0, \Omega_{T_k}),$$

$$T = \varphi(G_{BX}, G_{BIX}, T_{BX}, T, p), \quad (2.3)$$

де p, T – тиск і температура газу в ресивері; T_{BX} – температура на вході в ресивер; G_{BX}, G_{BIX} – витрати речовини на вході й виході ресивера.

Масові витрати через елементи двигуна визначаються на основі відомих витратних характеристик у вигляді функціональних залежностей:

$$G_k = G_k(p_0, p_k, T_0, \Omega_{T_k}); G_{\text{Пк}} = G_{\text{Пк}}(p_k, p_s, T_k, \Omega),$$

$$G_{\text{ДВ}} = G_{\text{ДВ}}(p_s, p_T, T_s, \Omega); G_T = G_T(p_T, p_0, T_T, \Omega_{T_k}), \quad (2.4)$$

де $G_k, G_{\text{пк}}, G_{\text{дв}}, G_T$ – витрати компресора, приводного компресора, дизеля і турбіни відповідно; p_s, T_s – тиск і температура повітря у впускному колекторі.

Остання група рівнянь описує перетворення енергії газового потоку в компресорі, приводному компресорі, повітроохолоджувачі, дизелі, і має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} T_d &= T_d(T_s, G_{\text{дв}}, \eta_i, \Omega, g_u), \eta_i = \eta_i(\alpha, \omega), \alpha = \alpha(p_i, p_T, \Omega, g_u), \\ T_{T_k} &= T_0 + T_0 \left((p_k / p_0)^{(\kappa-1)/\kappa} - 1 \right) / \eta_k(\Omega_{T_k}, p_k, p_0, T_0) = T_{T_k}(p_k, p_0, T_0, \Omega_{T_k}), \\ T_{BO} &= T_k + T_k \left((p_s / p_k)^{(\kappa-1)/\kappa} - 1 \right) / \eta_{\text{кп}}(\Omega, p_k, p, T_k) - \Delta T_{BO} = T_{BO}(p_s, p_k, T_k, \Omega) \end{aligned} \right\}, \quad (2.5)$$

де T_d – температура на виході з дизеля, визначається з розрахунку теплового балансу (співвідношення для η_i и α взяті з роботи [12]); T_{T_k} – температура повітря після компресора, визначається за адіабатичним К.К.Д.; T_{BO} – температура повітря після охолоджувача повітря, визначається за адіабатичним К.К.Д. приводного компресора, а також характеристиками охолоджувача повітря і системи термостатування.

Система диференціальних (2.2), (2.3) і статичних (2.4), (2.5) рівнянь при спільному рішенні описує поведінку двигуна в перехідному процесі, і таким чином є його математичною моделлю. Для її чисельної реалізації необхідно задати початкові умови на змінні стану $\Omega, \Omega_{T_k}, T, p$ для кожного з ресиверів, а також керуючі дії T, p і M_e як функції часу. В результаті інтегрування (2.2), (2.3) та обчислення статичних співвідношень (2.4), (2.5) на кожному кроці інтегрування отримаємо перехідний процес у вигляді часових функцій параметрів дизеля.

Спрощення базової математичної моделі двигуна може бути досягнуто за рахунок наступних обставин: по-перше, як показали чисельні та експериментальні дослідження [45, 72], інерційність механічних елементів істотно перевищує інерційність ресиверів робочої речовини. Це дозволяє з деякою похибкою апроксимувати систему диференціальних рівнянь (2.2) та (2.3) восьмого порядку системою (2.2) другого порядку, а диференціальні

рівняння (2.3) замінити відповідними статичними зв'язками. По-друге, з системи статичних рівнянь можна виключити всі проміжні параметри, виразивши їх через параметри стану, механічні елементи Ω , Ω_{Tk} і керуючий фактор. Таке виключення може бути виконано прирівнянням витрат через всі елементи газового контуру між собою, тобто перетворенням (2.4) до вигляду:

$$\left. \begin{aligned} G &= G_k(p_0, p_k, T_0, \Omega_{Tk}), G = G_{Ik}(p_k, p_s, T_k, \Omega), \\ G &= G_{dB}(p_s, p_T, T_s, \Omega), G = G_T(p_T, p_0, T_T, \Omega_{Tk}) \end{aligned} \right\}, \quad (2.6)$$

а також прирівнянням температур газу в ресиверах температурі на виході перетворюючих елементів, тобто система (2.5) трансформується в наступну:

$$\left. \begin{aligned} T_T &= T_d(T_s, G, \eta_i, \Omega, g_u), \eta_i = \eta_i(\alpha, \Omega), \\ \alpha &= \alpha(p_s, T_s, \Omega, g_u), \\ T_k &= T_{Tk}(p_k, p_0, T_0, \Omega_{Tk}), T_s = T_{Bo}(p_s, p_k, T_k, \Omega), \end{aligned} \right\}. \quad (2.7)$$

Можна побачити, що система дев'яти співвідношень (2.6), (2.7) містить 12 змінних: $p_s, p_T, p_k, T_s, T_T, T_k, G, \alpha, \eta_i, \Omega, \Omega_{Tk}, g_u$, тобто принципово допускає вираження перших дев'яти через Ω, Ω_{Tk}, g_u , і підстановку їх у праву частину системи (2.2).

Таким чином, показана принципова можливість апроксимації базової математичної моделі двигуна системою диференціальних рівнянь другого порядку виду:

$$J_{\Omega} = P_1(\Omega, \Omega_{Tk}, g_u) - M_e, J_{Tk} = P_2(\Omega, \Omega_{Tk}, g_u),$$

де P_1 і P_2 – деякі функції параметрів стану Ω, Ω_{Tk} і керуючого впливу g_u .

2.1.1. Динамічна модель ГДГА для дослідження обмінних коливань потужності в умовах АЕЕС

ГД не містить таких елементів, як паливна рейка, паливний насос, катаракт, механічний регулятор швидкості, а регулювання подачі газоповітряної суміші здійснюється малопотужним реверсивним двигуном постійного струму потужністю 100 Вт, управління яким здійснюється від швидкодіючого широтно-імпульсного регулятора.

Динамічна модель власне дизеля, без урахування турбонагнітача деякими авторами як для збурюючого, так і для керуючого впливу, описується відомою передавальною функцією:

$$W(p) = \frac{M(p)}{\lambda(p)} = \frac{1/D}{\frac{T_E}{D}p + 1},$$

де $M(p)$ – момент, що розвивається двигуном на валу; $\lambda(p)$ – параметр палива, що підводиться; D – коефіцієнт, що враховує саморегулюючі властивості первинного двигуна; T_E – еквівалентна постійна часу двигуна, що враховує інерційність махових мас власне двигуна і ротора генератора [11, 85, 91, 101]. З наведених формул випливає, що ГД без турбонагнітача в широкому діапазоні потужностей являє собою нелінійну ланку зі змінними коефіцієнтом підсилення $1/D$ й еквівалентної постійної часу T_E/D . Оскільки ГДГА, що працює паралельно з іншими на загальне навантаження, зазвичай навантажений не менше ніж на 20% від номінальної потужності, то сімейство його логарифмічних амплітудно-частотних характеристик буде мати вигляд, зображений на рис. 2.1, а. Узагальнена динамічна модель представлена на рис. 2.1, б.

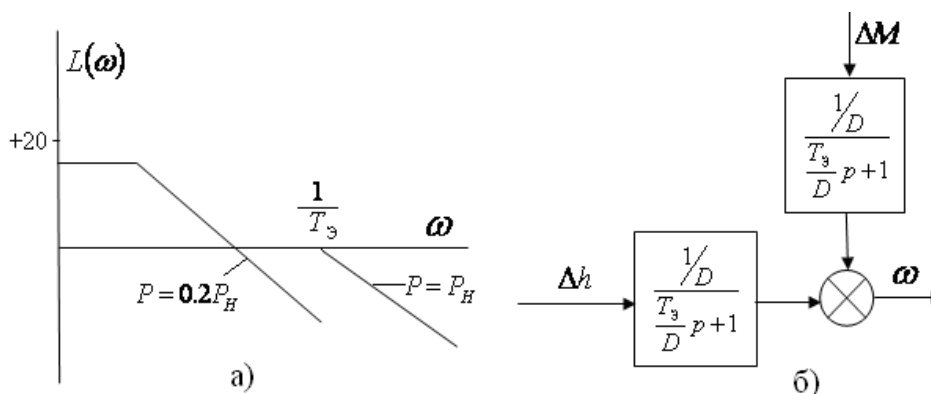


Рис. 2.1. Сімейство ЛАЧХ (а) та узагальнена динамічна модель (б)

В [41, 73] показано, що рівняння, які описують динаміку двигуна з турбонагнітачем по каналу навантажувального збурювання, мають вигляд, аналогічний двигуну без нагнітача. Однак це не так.

На рис. 2.2 приведена функціональна схема ГДГА з урахуванням взаємозв'язку елементів.

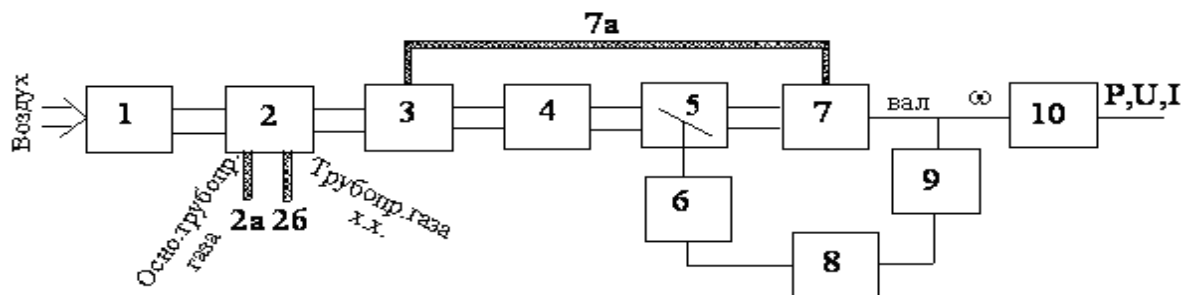


Рис. 2.2. Функціональна схема ГДГА

Повітряний потік через повітряний фільтр 1 подається в змішувач 2, до якого підводиться газ по газовим трубам 2а і 2б. По трубі 2а подається основний потік газу, а по трубі 2б – газ, необхідний для підтримання режиму холостого ходу. Після змішувача газоповітряна суміш відбирається турбонагнітачем 3, з виходу якого через охолоджувач 4 і регульовану заслонку 5 подається в блок циліндрів 7 двигуна. Турбонагнітач працює від вихідних газів, які надходять до нього, через вихідну трубу 7а. Заслонка управляється двигуном постійного струму 6, а останній – через ШПР від сигналу ПІД-регулятора 8, виконаного з використанням мікропроцесорної техніки. Як датчики обертів використовуються датчики Холла 9.

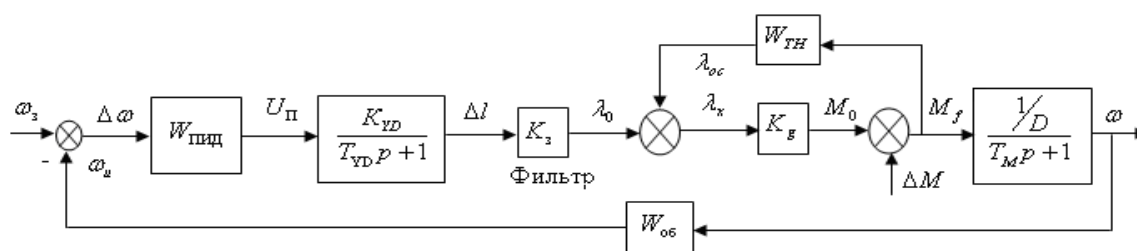


Рис. 2.3. Структурна схема, що відображає особливість роботи ГД

У відповідності з описом роботи ГДГА на рис. 2.3 зображена структурна схема, що відображає особливість роботи ГД як в статиці, так і в динаміці. ПІД-регулятор умовно представлений передавальною функцією $W_{\text{ПІД}}$. Він формує вигляд АЧХ одноконтурної замкненої системи. Двигун керування паливною заслонкою, спільно з самою заслонкою, представлений

у вигляді аперіодичної ланки першого порядку, вхідним параметром якої є сигнал з виходу ПД-регулятора, а вихідним – кількість газоповітряної суміші λ . Власне ГД представляється у вигляді двох ланок. Підсилювальна ланка K_g , що відображає перетворення потоку газоповітряної суміші в момент на валу M , та інерційна ланка першого порядку, що встановлює взаємозв'язки між обертами на валу і величиною моменту.

Особливістю у даній динамічній моделі є урахування та пояснення впливу турбонагнітача на роботу машини. Спроби обґрунтування впливу турбонагнітача на роботу дизеля виконані рядом авторів на математичному рівні [41, 91]. Однак у цих роботах, з одного боку, передбачалося інше його розташування, а саме – в головному контурі управління [35, 49]. Це дозволяло враховувати його як інерційну ланку, керовану як обертами двигуна, так і його моментом. З іншого боку, врахування турбонагнітача виконано настільки неявно і не очевидно, що фізично врахувати його роль, а тим більше динамічні параметри, не представлялося можливим.

У розглянутій динамічній структурі турбонагнітач представляється у вигляді аперіодичної ланки першого порядку з низьким коефіцієнтом підсилення, яка позитивним зворотним зв'язком охоплює власне першу ланку дизеля. Відбір потужності у вигляді крутного моменту здійснюється безпосередньо після ланки. Така спрощена структурна схема зв'язку турбонагнітача з дизелем усуває будь-який вплив обертів дизеля на роботу турбонагнітача, що в якісному плані відзначалося деякими авторами [41, 91], а в кількісному – було зовсім не очевидно.

У той же час є очевидним вплив крутного моменту. Зростання моменту еквівалентно зростанню інтенсивності вихлопних газів і розкручуванню обертів турбіни, що адекватно додатковому відкриванню газоповітряної заслонки. Зниження моменту – навпаки, еквівалентно частковому закриванню повітряної заслінки.

Трохи інакше процеси протікають при різких змінах навантаження (моменту). При набросі навантаження відбувається миттєвий відбір моменту

$M_f = M_0 - \Delta M$, що підводиться до останньої ланки, внаслідок чого відповідно до постійної часу ($\frac{T_{\dot{Y}}}{D}$) знижуються оберти двигуна. Зниження моменту M_f призведе до зниження сигналів λ_{oc} і, відповідно λ_x , що призводить до додаткового зниження M_0 . Це посилює перехідний процес. Тому оберти Ω продовжують знижуватися до тих пір, поки за допомогою головного зворотного зв'язку не буде забезпечено відповідне відкривання заслінки ΔI та збільшення кількості газоповітряної суміші.

При скиданні навантаження має місце зворотний процес – процес збільшення $M_f = M_0 + \Delta M$. Оберти двигуна починають зростати. У той же час, збільшення M_f призводить до зростаючого λ_{oc} і, відповідно, $\lambda_x = \lambda_0 + \lambda_{oc}$. Цьому відповідає додаткове зростання M_f і, відповідно, обертів двигуна Ω .

По керуючому впливу передавальна функція двигуна з урахуванням турбонагнітача в ланцюзі позитивного зворотного зв'язку має вигляд:

$$W_{Tg} = \frac{k_g}{1 - k_g W_{TH}}$$

Якщо врахувати, що турбонагнітач звичайно уявляється у вигляді аперіодичної ланки:

$$W_{TH} = \frac{k_{TH}}{T_{TH} p + 1};$$

то

$$W_{Tg} = \frac{k_g}{1 - \frac{k_g k_{TH}}{T_{TH} p + 1}} = \frac{k_g}{1 - k_g k_{TH}} \cdot \frac{T_{TH} p + 1}{\frac{T_{TH}}{1 - k_g k_{TH}} p + 1} \quad (2.8)$$

З (2.8) виходить, що по керуючому впливу ця ланка містить швидкодіючу диференціюючу складову з постійною часу T_{TH} та інтегруючу з постійною часу $\frac{T_{TH}}{1 - k_g k_{TH}}$. Оскільки за умовою стійкості $k_g k_{TH} < 1$, то постійна часу може наближатися до еквівалентної постійної часу махових мас ГДГА.

2.1.2. Оптимізація параметрів ПІД-регулятора ГДГА

Отримана в [110] модель газового двигуна з високим ступенем вірогідності відображає його динаміку як для режиму малих, так і великих збурень, а головне, відображає явище виникнення автоколивань при скиданні навантаження. Отримана авторами модель (рис. 2.4) відображає фізичні процеси, що відбуваються в замкненій системі стабілізації обертів.

Наступним етапом у створенні реальної системи стабілізації повинно бути пошук оптимальних параметрів коефіцієнтів ПІД – регулятора та їх практична реалізація для забезпечення стабільної роботи двигуна в широкому діапазоні зміни навантажень.

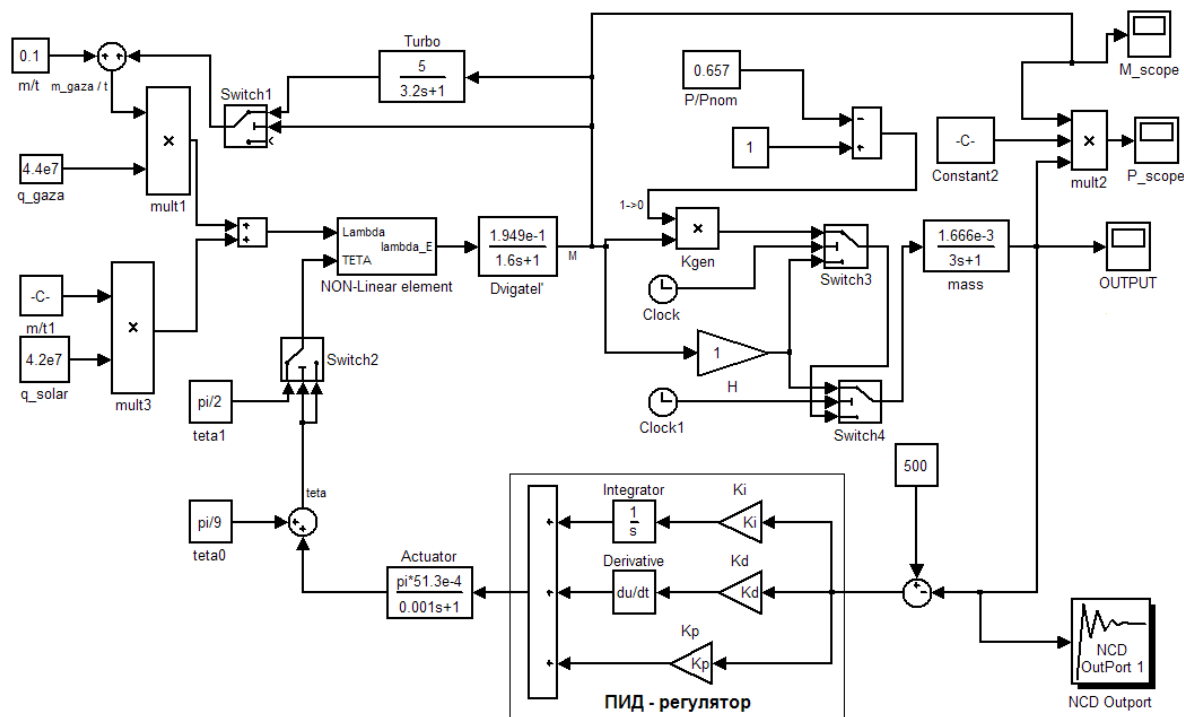


Рис. 2.4.

При пошуку оптимальних параметрів зазвичай вибирається один з наступних критеріїв оптимальності:

- аперіодичне регулювання;
- регулювання із заданим перерегулюванням;
- мінімізація середньоквадратичної помилки.

Для розглянутого випадку використання газового двигуна в автономних електроенергетичних системах в якості критерію оптимізації вибирається критерій, відповідно до якого повинне бути забезпечене максимально швидке відновлення номінальних обертів із припустимим перерегулюванням, що у відповідності зі стандартами на якість напруги автономних електроенергетичних систем не повинне перевищувати 5%.

Для вирішення завдання оптимізації параметрів коефіцієнтів ПІД – регулятора скористаємося методом динамічної оптимізації в ході імітаційного моделювання з використанням пакета прикладних програм побудови нелінійних систем керування Nonlinear Control Design (NCD), що входить до складу інструментальних засобів BlockSets Simulink 5. У пакеті NCD Blockset/Simulink 5 передбачена можливість реалізації методу динамічної оптимізації з використанням спеціального інструмента NCD Output, що автоматично налаштовує керуючі параметри системи, ґрунтуючись на певних обмеженнях, що задаються перед початком оптимізації. Можливості NCD Output дозволяють проводити оптимізацію параметрів моделі й значень керуючих змінних без безпосереднього аналітичного рішення системи диференціальних рівнянь, використовуючи один з методів пошуку екстремума нелінійних функцій багатьох змінних.

Блок NCD Output призначений для налаштування параметрів нелінійної моделі методом чисельної оптимізації по перехідному процесу. Цей блок підключається до виходу системи. У його властивостях задаються припустимі границі для перехідного процесу.

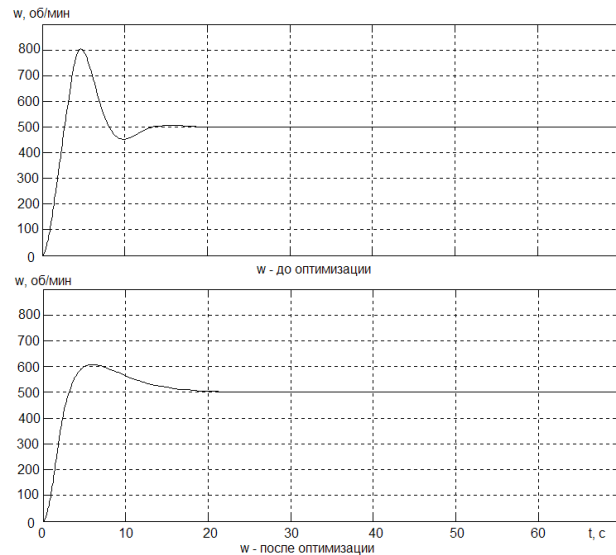
При заданій структурі об'єкта керування й відомих невизначеностей його параметрів необхідно знайти значення коефіцієнтів K_p , K_i й K_d регулятора (рис. 2.4). Значення коефіцієнтів K_p , K_i та K_d регулятора обрані відповідно до методики Зіглера-Ніколса (Ziegler-Nichols method), призначеної для оптимального налаштування ПІД-регуляторів.

При початкових значеннях параметрів, що налаштовуються, $K_p=1,025$; $K_i=0,7$; $K_d=1,2999$, і коливальному характері перехідних процесів, результат

оптимального процесу показаний на рис. 2.5, б. На даному рисунку дві криві відповідають перехідним процесам у системі при початкових значеннях і значення коефіцієнтів $K_p=1,6824$; $K_i=0,304$ та $K_d=2,364$, що отримані після оптимізації ПІД – регулятора.



а)



б)

Рис. 2.5. Оптимізація регулятора

Якість керування, що забезпечує ПІД – регулятор, у значній мірі залежить від того, наскільки добре обрані параметри регулятора відповідають властивостям системи. Це означає, що ПІД – регулятор перед початком моменту підключення навантаження необхідно переналаштувати.

Оскільки газодизель-генераторний агрегат характеризується високою нестабільністю частоти обертів, які у свою чергу залежать від навантаження генератора (моменту на валу газодизеля), то необхідно коригувати коефіцієнти регулятора залежно від потужності навантаження, що підключається до генератора, і викликає провал обертів газодизеля.

На основі проведеного експерименту отримані значення коефіцієнтів регулятора, які при заданій потужності навантаження забезпечують найкращий перехідний процес в динамічних режимах. Значення коефіцієнтів приводяться в табл. 2.1, табл. 2.2, табл. 2.3 при різних значеннях потужності ГД ΔP (при режимі холостого ходу; при $\Delta P = 15\% P_{гд.н.}$ і при $\Delta P = 30\% P_{гд.н.}$)

у момент підключення навантаження потужністю P_d (у відносних одиницях у порівнянні з потужністю на виході ГД).

Таблиця 2.1. Оптимальні значення коефіцієнтів регулятора в режимі х.х.

P_d	K_d	K_i	K_p
0,1	1,4322	1,0624	1,4796
0,2	1,4322	1,0622	1,4681
0,3	1,448	1,0688	1,4744
0,4	1,448	1,069	1,468
0,5	1,4467	1,048	1,4537
0,55	1,4219	1,0655	1,4501
0,6	1,4041	1,0162	1,4366
0,65	1,3473	0,999	1,3677

Таблиця 2.2. Оптимальні значення коефіцієнтів при $\Delta P = 15\% P_{гд.н.}$.

P_d	K_d	K_i	K_p
0,1	1,4203	1,067	1,4698
0,27	1,3946	1,0548	1,4699
0,4	1,3495	1,08	1,4753
0,5	1,3493	1,0787	1,4758

Таблиця 2.3. Оптимальні значення коефіцієнтів при $\Delta P = 30\% P_{гд.н.}$.

P_d	K_d	K_i	K_p
0,1	1,3825	1,0594	1,3584
0,2	1,4195	1,0769	1,4746
0,25	1,4229	1,0822	1,4719
0,3	1,3969	1,0724	1,5234
0,35	1,4199	1,0724	1,5181

Налаштування може виконуватися вручну або автоматично, без участі людини (автоналаштування).

Автоналаштування може виконуватися повністю автоматично й на вимогу. Повністю автоматичне налаштування може ініціюватися при

настанні заздалегідь заданої умови (наприклад, при зміні навантаження, при зміні зовнішніх впливів, при зміні похибки регулювання), або безперервно.

Для перевірки реакції ПД – регулятора, з отриманих залежностей коефіцієнтів від величини потужності навантаження була побудована Matlab-модель газового двигуна з автоналаштуванням оптимізованих параметрів ПД – регулятора по зміні потужності навантаження. Структура моделі показана на рис. 2.6.

Різновидом автоналаштування є розімкнене керування параметрами регулятора, коли заздалегідь знайдені параметри регулятора для різних умов роботи системи заносяться в таблицю, з якої вони беруться при настанні умов, по яких ініціюється адаптація. Для даного випадку, залежності коефіцієнтів ПД – регулятора K_p , K_i та K_d від потужності навантаження реалізовані в Matlab/Simulink через нелінійні елементи Pr, In, De (блок Look-Up Table), на виходах яких автоматично видаються відповідні значення K_p , K_i та K_d при зміні потужності навантаження.

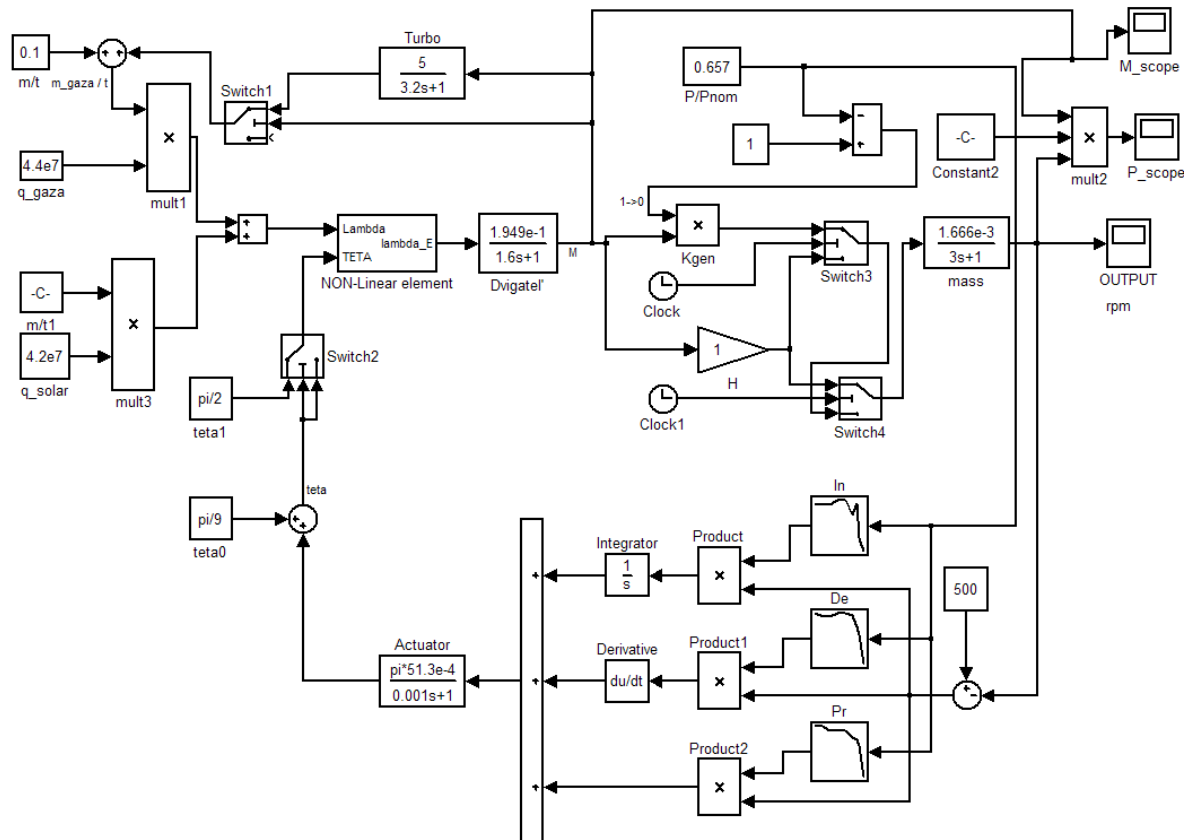


Рис. 2.6. Модель газового двигуна з автоналаштуванням регулятора

На рис. 2.7 показаний перехідний процес провалу й сплеску обертів газового двигуна з автоналаштуванням (рис. 2.7, а) з оптимізованими параметрами K_p , K_i й K_d при потужності навантаження, що дорівнює $0,357P_n$, та без неї (рис. 2.7, б)

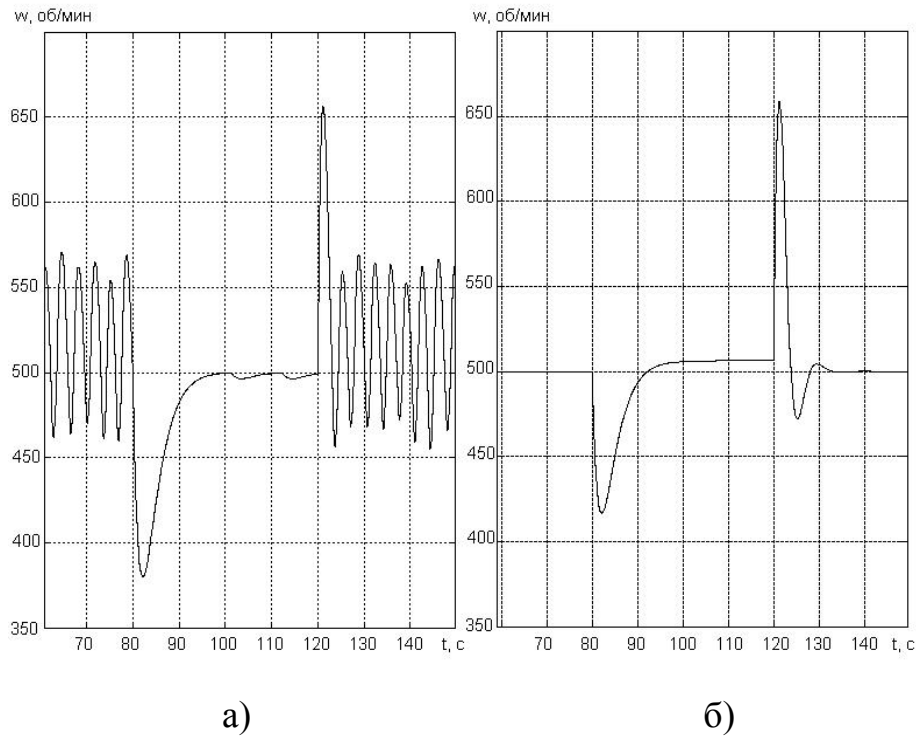


Рис. 2.7. Процес провалу й сплеску обертів газового двигуна

Відзначимо, що адаптація в принципі є повільним процесом, тому її не можна розглядати як безперервне спостереження параметрів регулятора за параметрами об'єкта, що змінюються.

2.2. Використання нечіткої логіки для налаштування коефіцієнтів регулятора обертами газодизеля

Налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора не викликає труднощів у тому випадку, коли об'єкт керування має стабільні параметри. У випадку виникнення різких коливань керованої величини якість перехідного процесу в системі з ПІД-регулятором може виявитися незадовільною, оскільки вихідне припущення про лінійність об'єкта не виконується. Виникає

необхідність у використанні додаткових пристроїв, що корегують роботу ПД-регулятора.

У подібних випадках заміна (доповнення) ПД-регуляторів регуляторами на нечіткій логіці часто виявляється більш зручною, ніж використання звичних, але ускладнених регуляторів стану або застосування адаптивного підходу. Регулятори з нечіткою логікою забезпечують підвищену надійність систем, дозволяють враховувати обмеження по стійкості, отримані за допомогою теорії Ляпунова [148-152].

Функціональна схема системи автоматичного керування на базі нечіткої логіки (системи керування з нечітким регулятором (НР)) представлена на рис. 2.8. Схема складається із пристрою порівняння, нечіткого регулятора, об'єкту керування (ГДГА), і ланцюга зворотного зв'язку.

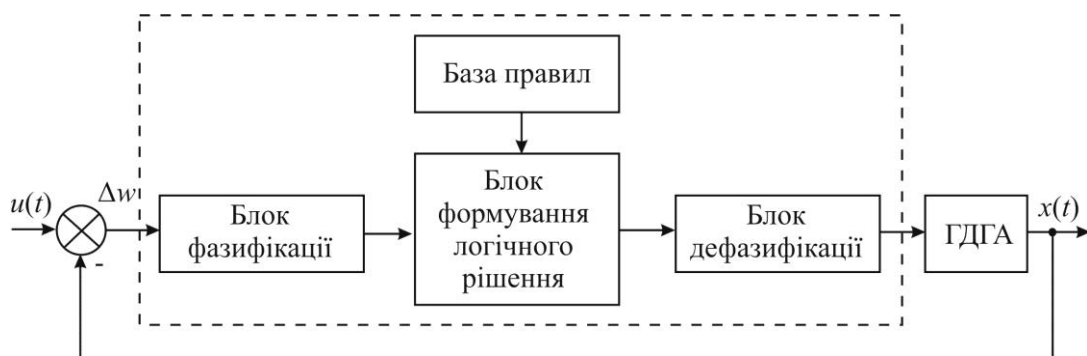


Рис. 2.8. Функціональна схема системи автоматичного керування

Нечіткий регулятор включає три основних блоки: блок фазифікації, блок формування логічного рішення й блок дефазифікації.

У даній роботі використовується нечіткий регулятор типу Мамдани, спроектований в Matlab.

База правил для K_d , K_p й K_i має вигляд:

Якщо $P=PL$ й $d=NL$ То $K_d=PH$, $K_p=PH$, $K_i=PH$
Якщо $P=PL$ й $d=Z$ То $K_d=PH$, $K_p=PH$, $K_i=PH$
Якщо $P=PL$ й $d=PL$ То $K_d=PM$, $K_p=PH$, $K_i=PH$
Якщо $P=PM$ й $d=NL$ То $K_d=PM$, $K_p=PH$, $K_i=PH$
Якщо $P=PM$ й $d=Z$ То $K_d=PM$, $K_p=PM$, $K_i=PH$
Якщо $P=PM$ й $d=PL$ То $K_d=PM$, $K_p=PM$, $K_i=PM$
Якщо $P=PH$ й $d=NL$ То $K_d=PM$, $K_p=PH$, $K_i=PM$
Якщо $P=PH$ й $d=Z$ То $K_d=PL$, $K_p=PM$, $K_i=PL$

Якщо $P=PH$ й $d=PL$ То $Kd=PL$, $Kp=PL$, $Ki=PL$
 $Kp=[Kp_{\min} Kp_{\max}]=[1,3677 \ 1,4796]$.

$Ki=[Ki_{\min} Ki_{\max}]=[0,999 \ 1,0624]$.

$Kd=[Kd_{\min} Kd_{\max}]=[1,3473 \ 1,4322]$.

Нелінійна залежність коефіцієнту пропорційної ланки регулятора в залежності від значень на вході нечіткого регулятора показана на рис. 2.9, а. Нелінійна залежність коефіцієнта інтегральної ланки регулятора залежно від значень на вході нечіткого регулятора показана на рис. 2.9, б.

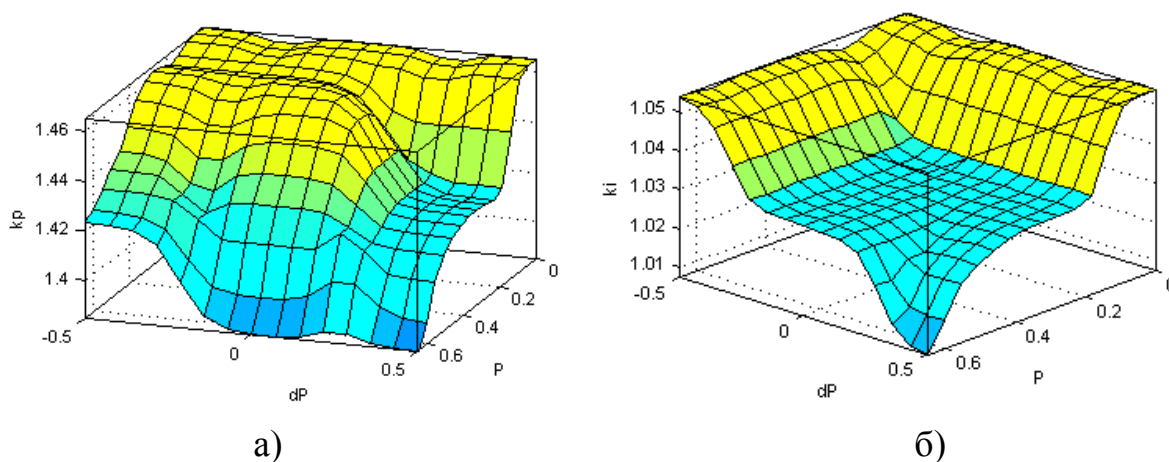


Рис. 2.9.

Нелінійна залежність коефіцієнта диференціальної ланки регулятора залежно від значень на вході нечіткого регулятора показана на рис. 2.10.

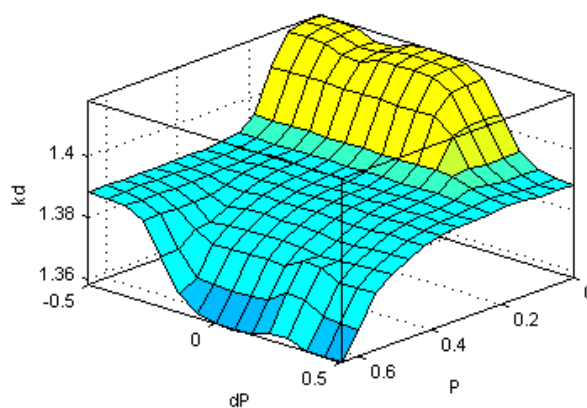


Рис. 2.10.

Дані залежності дозволяють створити систему коригування коефіцієнтів ПД-регулятора в залежності від режиму роботи дизельного

двигуна й потужності навантаження, що дозволить поліпшити якість перехідних процесів.

2.3. Моделювання роботи газодизеля з регулятором на базі нечіткої логіки

Для демонстрації результатів застосування нечіткого регулятора проведемо моделювання роботи ГДГА. На рис. 2.11 представлена модель ГДГА, в якій використовується регулятор на базі нечіткої логіки.

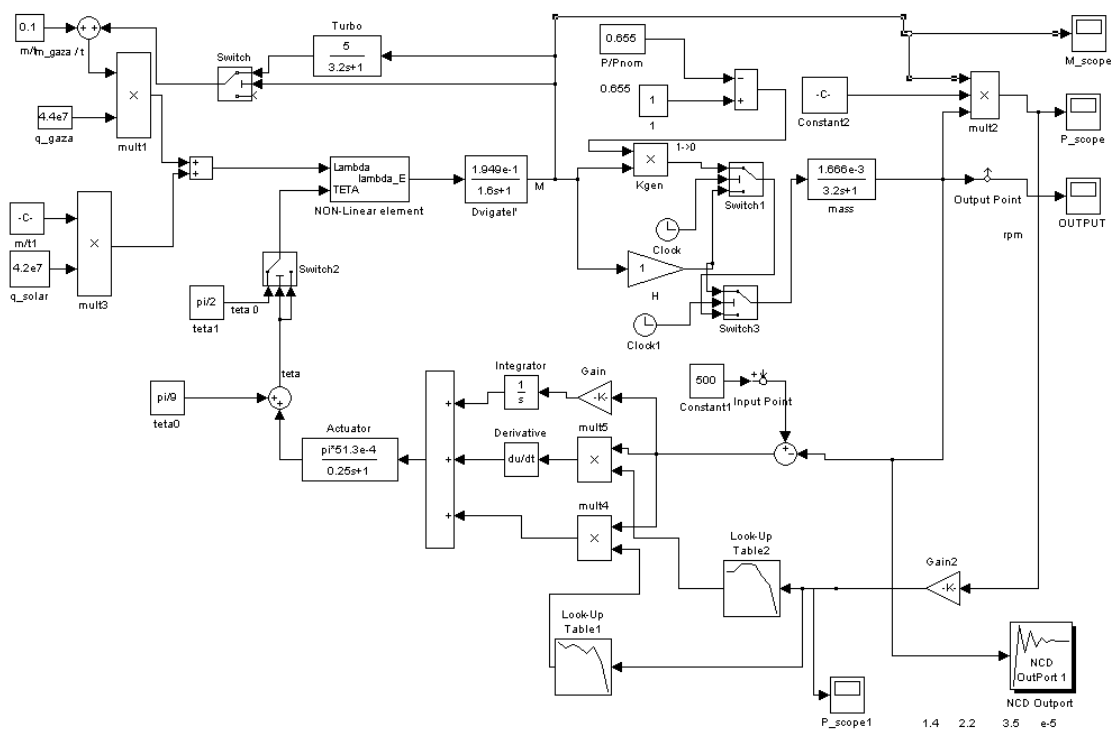
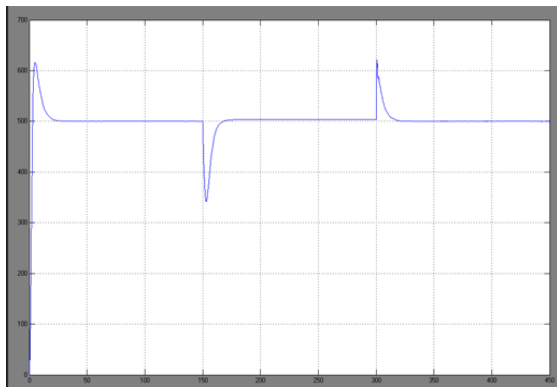
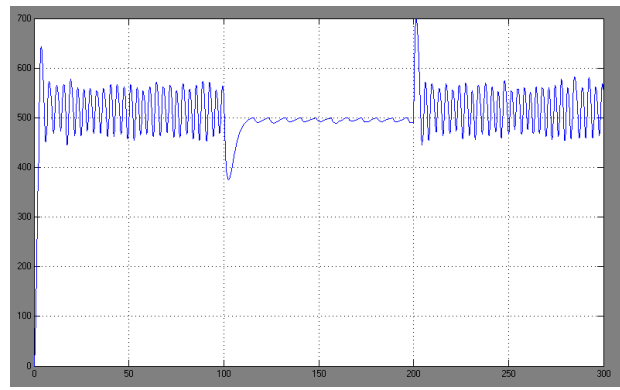


Рис. 2.11. Модель ГДГА з регулятором на базі нечіткої логіки

Осцилограма зміни частоти обертів ГДГА при комутації навантаження показана на рис. 2.12, а. З графіку видно, що коливання обертів зведені до мінімуму. На рис. 2.12, б, представлена осцилограма зміни частоти обертів ГДГА при відсутності регулятора



а)



б)

Рис. 2.12. Осцилограми зміни частоти обертів ГДГА при комутації навантаження

2.4. Засоби імітації низькочастотних завад для моделювання газодизельного агрегату

Для дослідження процесів, які відбуваються в енергосистемі при зміні частоти приводних двигунів, необхідно моделювати зміну частоти двигуна. У систему стабілізації обертів приводного двигуна включений блок імітації нерівномірності частот. При включенні цього блоку в структуру системи стабілізації стає можливою робота системи в режимі імітації ГДГА.

Задача імітації низькочастотних перешкод безперервного характеру зводиться до формування випадкового процесу, який відповідає реальному. Це завдання вирішується за допомогою генератора білого шуму й формуючих фільтрів, і описуються виразом:

$$G_{\text{вих}}(\omega) = \sigma_{\text{ш}}^2 |W_{\text{фф}}(j\omega)|^2,$$

де $G_{\text{вих}}(\omega)$ – спектральна щільність випадкового процесу; $\sigma_{\text{ш}}^2$ – дисперсія білого шуму; $W_{\text{фф}}(j\omega)$ – комплексний коефіцієнт передачі формуючого фільтра. Таким чином, вигляд і числові характеристики спектру перешкоди, що імітується, визначаються виглядом і числовими характеристиками передатної функції формуючого фільтра.

Для імітації випадкових перешкод, якими є флуктуації частоти обертання ГД, розроблений пристрій, робота якого зводиться до зміни

частоти обертання приводного двигуна шляхом відповідного керування електроприводом заслінки карбюратора.

Джерело білого шуму може бути створене за допомогою алгоритмів формування псевдовипадкових послідовностей. Як фільтр може використовуватися аперіодична ланка першого порядку, передатна характеристика якого має вигляд:

$$W(s) = \frac{k_0}{T_0 s + 1},$$

де T_0 – постійна часу аперіодичної ланки; k_0 – коефіцієнт пропорційності.

Для реалізації цифрового фільтра необхідно визначити його дискретну передатну функцію:

$$D(z) = \frac{x(z)}{\Theta(z)} = Z \left\{ \frac{1 - e^{-sT}}{s} \frac{k_0}{1 + T_0 s} \right\} = \frac{bz^{-1}}{1 - az^{-1}}, \quad (2.9)$$

де $a = e^{-\frac{T}{T_0}}$, $b = k_0(1 - a)$; $x(z)$ – вихідний сигнал фільтра; $\Theta(z)$ – вхідний сигнал фільтра; T – період дискретизації.

На рис. 2.13 представлена структурна схема алгоритму програмної реалізації дискретної передатної функції.

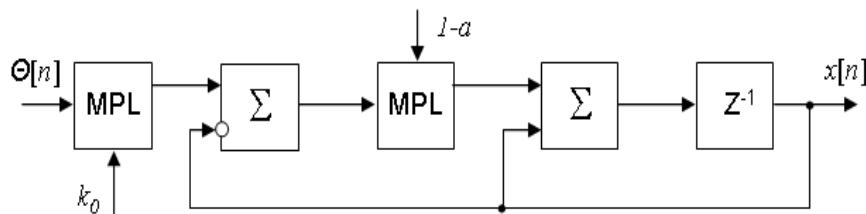


Рис. 2.13. Структурна схема алгоритму

З рівняння дискретної передатної функції (2.9) можна визначити частотну передатну функцію при використанні кругової частоти ω :

$$W(e^{j\omega T}) = U + jV = \frac{b}{\cos(\omega T - a + j \sin \omega T)} = b \left[\frac{\cos \omega T - a}{1 - 2a \cos \omega T + a^2} - j \frac{\sin \omega T}{1 - 2a \cos \omega T + a^2} \right]. \quad (2.10)$$

Модуль виразу (2.10):

$$A(\omega) = |W(e^{j\omega T})| = \sqrt{U^2 + V^2} = \frac{b}{\sqrt{1 - 2a \cos \omega T + a^2}}.$$

Вигляд частотної характеристики (частота зрізу, підсилення) визначається значеннями k_0 і T_0 .

Вихідними даними при практичному рішенні завдання є середнє значення викидів частоти f_B протягом певного інтервалу часу за рівень f_n , середня кількість викидів N_B за час T_B , тривалість періоду τ_y відхилення частоти від номінальної, вірогідність відхилення частоти в інтервалі часу Δt . Середню частоту відхилень можна визначити з виразу:

$$\bar{f}_B = \frac{a_x}{\sqrt{2\pi}} \varphi\left(\frac{f_0}{B_{ui}}\right).$$

Величина значення середньої частоти викидів може бути досягнута за рахунок формування швидко осцилюючих процесів, що досягається завдяки зменшенню постійної часу формуючого фільтра. При цьому буде зменшуватися середня тривалість відхилень частоти.

В результаті моделювання були отримані осцилограми шуму й сигналу на виході фільтра після додавання до константи (рис. 2.14, а). Для порівняння, на рис. 2.14, б, представлений графік зміни частоти газодизеля, побудований за експериментальними даними. Вимірювання проводилися протягом 40 секунд. Порівняння наведених графіків показує, що генератор білого шуму разом з формуючим фільтром здатний моделювати відхилення частоти, що виникають у реальних ГДГА.

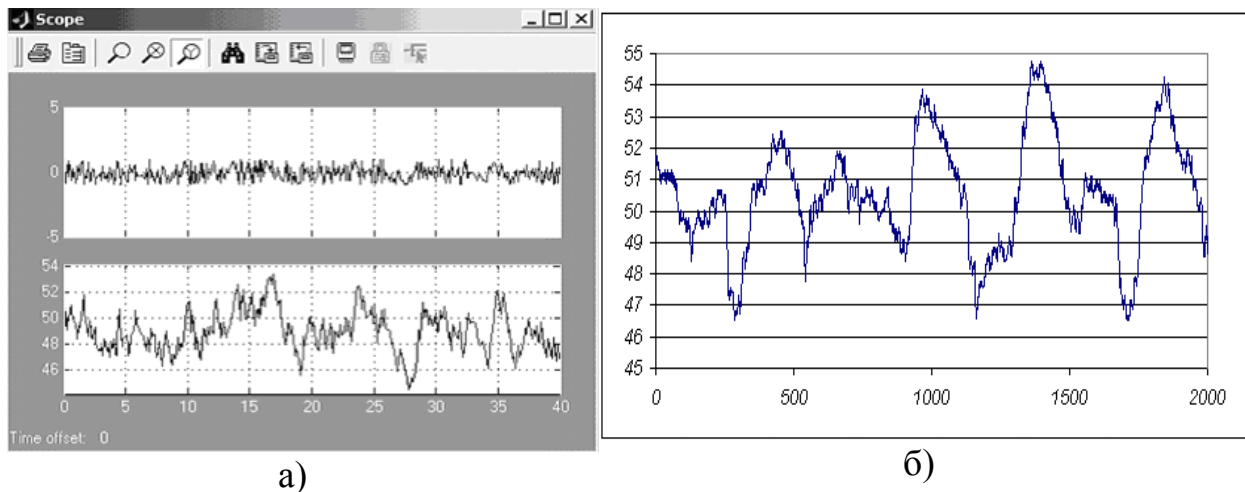


Рис. 2.14. Осцилограми шуму й сигналу на виході фільтра (а) та графік зміни частоти газодизеля (б)

2.5. Спрощена модель синхронного генератора для рішення задачі упереджуючого керування

Однією з головних задач керування в автономній (в тому числі судновій) електроенергетиці є зниження сплесків та провалів напруги мережі, що обумовлені комутацією навантажень. Відомі рішення, засновані на широкому впровадженні систем плавного пуску з використанням типових перетворювачів [64] характеризується значною додатковою потужністю й значними завадами, що створюються цими перетворювачами. У той же час, зовсім не вичерпали себе такі способи, як оптимізація параметрів регуляторів генераторів і приводних двигунів, а також принципи упереджуючого керування [22].

Однак використання цих способів не може бути реалізовано повною мірою через складний математичний опис генераторів, їхніх приводних двигунів й асинхронних двигунів. Тому актуальною є задача пошуку таких моделей елементів автономних електростанцій, які б при більш низькому порядку їхніх рівнянь, давали б адекватну реакцію на збурення.

Підхід до рішення задачі ґрунтується на відомих постулатах теорії автоматичного керування [50, 121], і полягає в тому, що кожна, як завгодно складна система може бути представлена у вигляді системи 2-3-го порядку,

реакція якої на керуючий та збурюючий впливи буде адекватною складній системі.

Найбільше поширення для дослідження процесів в АЕЕС одержали моделі синхронного генератора, розроблені на основі перетворень Горева-Парка [83, 109, 126]. Основною перевагою цих перетворень є одержання постійних коефіцієнтів у диференціальних рівняннях синхронного генератора, що можливо при введенні припущення про синусоїдальність поля в повітряному зазорі машини. Синхронна машина описується системою з 6 диференціальних рівнянь [118]:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial i_d}{\partial t} &= \frac{(U_f - R_f \cdot i_f) \cdot (M_d^2 - L_{kd} \cdot M_d) + M_d \cdot (L_f - M_d) \cdot R_{kd} \cdot i_{kd} +}{L_d \cdot L_{kd} \cdot L_f + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot (L_d + L_{kd} + L_f)} + \\
 &+ \frac{(U_d - R_a \cdot i_d + L_q \cdot \omega \cdot i_q + M_q \cdot \omega \cdot i_{kq}) \cdot (L_{kd} \cdot L_f - M_d^2)}{L_d \cdot L_{kd} \cdot L_f + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot (L_d + L_{kd} + L_f)}; \\
 \frac{\partial i_q}{\partial t} &= \frac{L_{kq} \cdot (U_q - L_d \cdot \omega \cdot i_d - M_d \cdot \omega \cdot (i_f + i_{kd}) - R_a \cdot i_q) + M_q \cdot R_{kq} \cdot i_{kq}}{L_q \cdot L_{kq} - M_q^2}; \\
 \frac{\partial i_f}{\partial t} &= \frac{(U_f - R_f \cdot i_f) \cdot (L_d \cdot L_{kd} - M_d^2) + R_{kd} \cdot i_{kd} \cdot M_d \cdot (L_d - M_d)}{L_d \cdot L_{kd} \cdot L_f + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot (L_d + L_{kd} + L_f)} + \\
 &+ \frac{(U_d - R_a \cdot i_d + L_q \cdot \omega \cdot i_q + M_q \cdot \omega \cdot i_{kq}) \cdot M_d \cdot (M_d - L_{kd})}{L_d \cdot L_{kd} \cdot L_f + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot (L_d + L_{kd} + L_f)}; \\
 \frac{\partial i_{kd}}{\partial t} &= \frac{-M_d \cdot (U_f - R_f \cdot i_f) \cdot (L_d - M_d) - R_{kd} \cdot i_{kd} \cdot (L_d \cdot L_f - M_d^2)}{L_d \cdot L_{kd} \cdot L_f + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot (L_d + L_{kd} + L_f)} + \\
 &+ \frac{-(U_d + R_a \cdot i_d - L_q \cdot \omega \cdot i_q - M_q \cdot \omega \cdot i_{kq}) \cdot M_d \cdot (L_f - M_d)}{L_d \cdot L_{kd} \cdot L_f + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot (L_d + L_{kd} + L_f)}; \\
 \frac{\partial i_{kq}}{\partial t} &= \frac{-M_q \cdot (U_q - \omega \cdot (L_d \cdot i_d + M_d \cdot i_{kd} + M_d \cdot i_f) - R_a \cdot i_q) - L_q \cdot R_{kq} \cdot i_{kq}}{L_q \cdot L_{kq} - M_q^2}; \\
 \frac{\partial \Theta}{\partial t} &= \omega.
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Тут змінними є струми:

i_d – струм якоря по вісі d;

i_q – струм якоря по вісі q;

i_f – струм збудження;

i_{kd} – струм демпферної обмотки по вісі d;

i_{kq} – струм демпферної обмотки по вісі q;

кут Θ – електричний кут між віссю фази А і віссю d машини.

Диференціальні рівняння містять наступні постійні параметри:

R_a – активний опір обмотки якоря;

L_d – індуктивність самоіндукції обмотки якоря по вісі d;

L_{kd} – індуктивність самоіндукції демпферної обмотки по вісі d;

L_q – індуктивність самоіндукції обмотки якоря по вісі q;

L_{kq} – індуктивність самоіндукції демпферної обмотки по вісі q;

L_f – індуктивність самоіндукції обмотки збудження;

L_{af} – взаємна індуктивність між обмоткою якоря й обмоткою збудження.

L_σ – індуктивність розсіювання обмотки якоря;

R_f – активний опір обмотки збудження;

R_{kd} – активний опір демпферної обмотки по вісі d;

R_{kq} – активний опір демпферної обмотки по вісі q;

U_f – напруга обмотки збудження;

p – число пар полюсів.

По них розраховуються індуктивності взаємоіндукції по вісях d, q:

$$M_d = L_d - L_\sigma,$$

$$M_q = L_q - L_\sigma,$$

і власна індуктивність обмотки якоря:

$$L_a = M_d \cdot \frac{U_n^2}{S_n},$$

де U_n – номінальна напруга обмотки якоря; S_n – номінальна повна потужність.

Перетворимо вихідні рівняння (2.11) по Лапласу й з метою спрощень, зробимо заміну постійних коефіцієнтів:

$$k1 = \frac{M_d^2 - \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n \cdot M_d}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2}}{\left(\frac{4 \cdot L_d \cdot S_n^3 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot L_f}{9 \cdot U_n^6 \cdot L_{af}^4} + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot \left(\frac{L_d}{U_n^2} \cdot S_n + \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} + \frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \right)}$$

$$k2 = \frac{\left(M_d^2 - \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n \cdot M_d}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot R_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right)}{\left(\frac{4 \cdot L_d \cdot S_n^3 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot L_f}{9 \cdot U_n^6 \cdot L_{af}^4} + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot \left(\frac{L_d}{U_n^2} \cdot S_n + \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} + \frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \right)}$$

$$k3 = \frac{\left(\frac{2 \cdot R_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n \cdot M_d}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} - M_d \right)}{\left(\frac{4 \cdot L_d \cdot S_n^3 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot L_f}{9 \cdot U_n^6 \cdot L_{af}^4} + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot \left(\frac{L_d}{U_n^2} \cdot S_n + \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} + \frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \right)}$$

$$k5 = \frac{\left(\frac{4 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot S_n^2 \cdot M_d \cdot L_f}{9 \cdot L_{af}^4 \cdot U_n^4} - M_d^2 \right) \cdot \left(\frac{R_a \cdot S_n}{U_n^2} \right)}{\left(\frac{4 \cdot L_d \cdot S_n^3 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot L_f}{9 \cdot U_n^6 \cdot L_{af}^4} + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot \left(\frac{L_d}{U_n^2} \cdot S_n + \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} + \frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \right)}$$

$$k6 = \frac{\left(\frac{4 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot S_n^2 \cdot M_d \cdot L_f}{9 \cdot L_{af}^4 \cdot U_n^4} - M_d^2 \right) \cdot \left(\frac{L_q \cdot S_n}{U_n^2} \right)}{\left(\frac{4 \cdot L_d \cdot S_n^3 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot L_f}{9 \cdot U_n^6 \cdot L_{af}^4} + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot \left(\frac{L_d}{U_n^2} \cdot S_n + \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} + \frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \right)}$$

$$k7 = \frac{\left(\frac{4 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot S_n^2 \cdot M_d \cdot L_f}{9 \cdot L_{af}^4 \cdot U_n^4} - M_d^2 \right) \cdot M_q}{\left(\frac{4 \cdot L_d \cdot S_n^3 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot L_f}{9 \cdot U_n^6 \cdot L_{af}^4} + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot \left(\frac{L_d}{U_n^2} \cdot S_n + \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} + \frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \right)}$$

$$k8 = \frac{\frac{2 \cdot L_{kq} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2}}{\left(\frac{2 \cdot L_{kq} \cdot L_q \cdot S_n^2 \cdot L_a^2}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^4} - M_q^2 \right)}$$

$$k9 = \frac{\frac{2 \cdot L_{kq} \cdot L_d \cdot L_a^2 \cdot S_n^2}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^4}}{\left(\frac{2 \cdot L_{kq} \cdot L_q \cdot S_n^2 \cdot L_a^2}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^4} - M_q^2 \right)}$$

$$k10 = \frac{\frac{2 \cdot L_{kq} \cdot M_d \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2}}{\left(\frac{2 \cdot L_{kq} \cdot L_q \cdot S_n^2 \cdot L_a^2}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^4} - M_q^2 \right)}$$

$$k11 = \frac{\frac{2 \cdot L_{kq} \cdot M_d \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2}}{\left(\frac{2 \cdot L_{kq} \cdot L_q \cdot S_n^2 \cdot L_a^2}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^4} - M_q^2 \right)}$$

$$k12 = \frac{\frac{2 \cdot L_{kq} \cdot R_a \cdot L_a^2 \cdot S_n^2}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^4}}{\left(\frac{2 \cdot L_{kq} \cdot L_q \cdot S_n^2 \cdot L_a^2}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^4} - M_q^2 \right)}$$

$$k13 = \frac{\frac{2 \cdot M_q \cdot R_{kq} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2}}{\left(\frac{2 \cdot L_{kq} \cdot L_q \cdot S_n^2 \cdot L_a^2}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^4} - M_q^2 \right)}$$

$$k14 = \frac{\left(\frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_d \cdot S_n^2 \cdot L_a^2}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^4} - M_d^2 \right)}{\left(\frac{4 \cdot L_d \cdot S_n^3 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot L_f}{9 \cdot U_n^6 \cdot L_{af}^4} + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot \left(\frac{L_d}{U_n^2} \cdot S_n + \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} + \frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \right)}$$

$$k15 = \frac{\left(\frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_d \cdot S_n^2 \cdot L_a^2}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^4} - M_d^2 \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot R_f \cdot S_n \cdot L_a^2}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right)}{\left(\frac{4 \cdot L_d \cdot S_n^3 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot L_f}{9 \cdot U_n^6 \cdot L_{af}^4} + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot \left(\frac{L_d}{U_n^2} \cdot S_n + \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} + \frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \right)}$$

$$k16 = \frac{\left(\frac{L_d \cdot S_n}{U_n^2} - M_d \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot R_{kd} \cdot M_d \cdot S_n \cdot L_a^2}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right)}{\left(\frac{4 \cdot L_d \cdot S_n^3 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot L_f}{9 \cdot U_n^6 \cdot L_{af}^4} + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot \left(\frac{L_d}{U_n^2} \cdot S_n + \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} + \frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \right)}$$

$$k17 = \frac{\left(\frac{4 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot S_n^2 \cdot M_d \cdot L_f}{9 \cdot L_{af}^4 \cdot U_n^4} - M_d^2 \right)}{\left(\frac{4 \cdot L_d \cdot S_n^3 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot L_f}{9 \cdot U_n^6 \cdot L_{af}^4} + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot \left(\frac{L_d}{U_n^2} \cdot S_n + \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} + \frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \right)}$$

$$k18 = \frac{\left(M_d - \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \cdot \left(\frac{R_a \cdot S_n \cdot M_d}{U_n^2} \right)}{\left(\frac{4 \cdot L_d \cdot S_n^3 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot L_f}{9 \cdot U_n^6 \cdot L_{af}^4} + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot \left(\frac{L_d}{U_n^2} \cdot S_n + \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} + \frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \right)}$$

$$k19 = \frac{\left(M_d - \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \cdot \left(\frac{L_q \cdot S_n \cdot M_d}{U_n^2} \right)}{\left(\frac{4 \cdot L_d \cdot S_n^3 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot L_f}{9 \cdot U_n^6 \cdot L_{af}^4} + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot \left(\frac{L_d}{U_n^2} \cdot S_n + \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} + \frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \right)}$$

$$k20 = \frac{\left(M_d - \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \cdot M_d \cdot M_q}{\left(\frac{4 \cdot L_d \cdot S_n^3 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot L_f}{9 \cdot U_n^6 \cdot L_{af}^4} + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot \left(\frac{L_d}{U_n^2} \cdot S_n + \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} + \frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \right)}$$

$$k_{21} = \frac{\left(\frac{L_d \cdot S_n}{U_n^2} - M_d \right) \cdot M_d}{\left(\frac{4 \cdot L_d \cdot S_n^3 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot L_f}{9 \cdot U_n^6 \cdot L_{af}^4} + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot \left(\frac{L_d}{U_n^2} \cdot S_n + \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} + \frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \right)}$$

$$k_{22} = \frac{\left(\frac{L_d \cdot S_n}{U_n^2} - M_d \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot R_f \cdot M_d \cdot S_n \cdot L_a^2}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right)}{\left(\frac{4 \cdot L_d \cdot S_n^3 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot L_f}{9 \cdot U_n^6 \cdot L_{af}^4} + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot \left(\frac{L_d}{U_n^2} \cdot S_n + \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} + \frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \right)}$$

$$k_{23} = \frac{\left(\frac{2 \cdot L_f \cdot L_d \cdot S_n^2 \cdot L_a^2}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^4} - M_d^2 \right)}{\left(\frac{4 \cdot L_d \cdot S_n^3 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot L_f}{9 \cdot U_n^6 \cdot L_{af}^4} + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot \left(\frac{L_d}{U_n^2} \cdot S_n + \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} + \frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \right)}$$

$$k_{24} = \frac{\left(\frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} - M_d \right) \cdot M_d}{\left(\frac{4 \cdot L_d \cdot S_n^3 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot L_f}{9 \cdot U_n^6 \cdot L_{af}^4} + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot \left(\frac{L_d}{U_n^2} \cdot S_n + \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} + \frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \right)}$$

$$k_{25} = \frac{\left(\frac{R_a \cdot S_n \cdot M_d}{U_n^2} \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} - M_d \right)}{\left(\frac{4 \cdot L_d \cdot S_n^3 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot L_f}{9 \cdot U_n^6 \cdot L_{af}^4} + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot \left(\frac{L_d}{U_n^2} \cdot S_n + \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} + \frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \right)}$$

$$k_{26} = \frac{\left(\frac{L_q \cdot S_n \cdot M_d}{U_n^2} \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} - M_d \right)}{\left(\frac{4 \cdot L_d \cdot S_n^3 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot L_f}{9 \cdot U_n^6 \cdot L_{af}^4} + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot \left(\frac{L_d}{U_n^2} \cdot S_n + \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} + \frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \right)}$$

$$k27 = \frac{\left(\frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} - M_d \right) \cdot M_d \cdot M_q}{\left(\frac{4 \cdot L_d \cdot S_n^3 \cdot L_{kd} \cdot L_a^4 \cdot L_f}{9 \cdot U_n^6 \cdot L_{af}^4} + 2 \cdot M_d^3 - M_d^2 \cdot \left(\frac{L_d}{U_n^2} \cdot S_n + \frac{2 \cdot L_{kd} \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} + \frac{2 \cdot L_f \cdot L_a^2 \cdot S_n}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^2} \right) \right)}$$

$$k28 = \frac{M_q}{\left(\frac{2 \cdot L_{kq} \cdot L_q \cdot S_n^2 \cdot L_a^2}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^4} - M_q^2 \right)}$$

$$k29 = \frac{\frac{M_q \cdot L_d \cdot S_n}{U_n^2}}{\left(\frac{2 \cdot L_{kq} \cdot L_q \cdot S_n^2 \cdot L_a^2}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^4} - M_q^2 \right)}$$

$$k30 = \frac{M_q \cdot M_d}{\left(\frac{2 \cdot L_{kq} \cdot L_q \cdot S_n^2 \cdot L_a^2}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^4} - M_q^2 \right)}$$

$$k31 = \frac{M_q \cdot M_d}{\left(\frac{2 \cdot L_{kq} \cdot L_q \cdot S_n^2 \cdot L_a^2}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^4} - M_q^2 \right)}$$

$$k32 = \frac{\frac{M_q \cdot R_a \cdot S_n}{U_n^2}}{\left(\frac{2 \cdot L_{kq} \cdot L_q \cdot S_n^2 \cdot L_a^2}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^4} - M_q^2 \right)}$$

$$k33 = \frac{\frac{2 \cdot L_q \cdot R_{kq} \cdot S_n^2 \cdot L_a^2}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^4}}{\left(\frac{2 \cdot L_{kq} \cdot L_q \cdot S_n^2 \cdot L_a^2}{3 \cdot L_{af}^2 \cdot U_n^4} - M_q^2 \right)}$$

В результаті одержуємо матрицю рівнянь $[A][X]=[b]$, де:

$$A = \begin{pmatrix} k5 + s & -k6 \cdot \omega(s) & k2 & -k3 & -k7 \cdot \omega(s) \\ k9 \cdot \omega(s) & k12 + s & -k10 \cdot \omega(s) & -k11 \cdot \omega(s) & k13 \\ k18 & -k19 \cdot \omega(s) & k15 + s & -k16 & -k20 \cdot \omega(s) \\ -k25 & k26 \cdot \omega(s) & k22 & s - k23 & k27 \cdot \omega(s) \\ -k29 \cdot \omega(s) & -k32 & -k31 \cdot \omega(s) & -k30 \cdot \omega(s) & k33 + s \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

$$b = \begin{pmatrix} k1 \cdot U_f(s) + k17 \cdot U_d(s) \\ k8 \cdot U_q(s) \\ k14 \cdot U_f(s) + k17 \cdot U_d(s) \\ k21 \cdot U_f(s) - k24 \cdot U_d(s) \\ -k28 \cdot U_q(s) \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Математичний опис синхронного генератора засновано на наступних припущеннях:

- магнітна індукція в будь-якій точці пропорційна напруженості;
- розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі СГ синусоїдальний;
- наявність пазів статора не впливає на індуктивність ротора при зміні його положення. У свою чергу, зміна положення ротора не впливає на величину індуктивного опору розсіювання;
- втрати в сталі й витиснення струму в обмотках відсутні, а параметри машини не залежать від струму й температури [84].

У математичній моделі синхронної машини враховані тільки параметри обмоток відносно вісі d, тому що вона містить обмотку збудження. Параметри обмоток по вісі q не враховуються [83].

Виходячи з конструктивних особливостей синхронної машини, її масові співвідношення обмоток перебувають у такій пропорції: обмотки статора – 14,78%, обмотка збудження – 82,91%, демпферна обмотка – 2,7%. Якщо знехтувати демпферною обмоткою по вісях ($R_{kd}=0$, $L_{kd}=0$, $R_{kq}=0$, $L_{kq}=0$), то відповідно похибка при такому припущенні буде $\varepsilon_d = 2,7\%$. Тепер розглянемо параметри статорної обмотки: R_a – активний опір, L_σ – індуктивність розсіювання, L_q – індуктивність по вісі q, L_d – індуктивність по вісі d. Ці параметри рівноцінні між собою, відповідно, кожний має вагове відсоткове значення 14,78% поділене на 4, тобто, 3,695%. Фактично

виходить, якщо ми знехтуємо параметрами ($L_\sigma=0, L_q=0$), похибка при такому припущенні становить $\varepsilon_c = 7,39 \%$. Загальна сумарна похибка прийнятих припущень:

$$\varepsilon_\Sigma = \varepsilon_d + \varepsilon_c = 10,09 \approx 10 \%$$

З огляду на величину отриманої похибки можна зробити висновок, що дане припущення не впливає на процеси, що відбуваються при рішенні задач упереджуючого керування, а істотно спрощує математичну модель синхронного генератора:

$$L_\sigma=0, L_q=0, R_{kd}=0, L_{kd}=0, R_{kq}=0, L_{kq}=0.$$

Після підстановки вихідні матриці (2.12) і (2.13) приймають вигляд (2.14) і (2.15):

$$A = \begin{pmatrix} k5+s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s-k23 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

$$b = \begin{pmatrix} k1 \cdot U_f \\ 0 \\ k14 \cdot U_f \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

Рішенням системи рівнянь $[A][X] = [b]$ є матриця (6):

$$X = \begin{pmatrix} \frac{k1 \cdot U_f}{k5+s} \\ 0 \\ \frac{k14 \cdot U_f}{s} \\ s \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

Таким чином, математична модель синхронного генератора може бути представлена у вигляді двох інерційних ланок першого порядку (2.17) і (2.18):

$$W_B(s) = \frac{K_B}{1 + T_B \cdot s} \quad (2.17)$$

$$W_r(s) = \frac{K_r}{1 + T_r \cdot s} \quad (2.18)$$

де:

$W_b(s)$ – передатна функція обмотки збудження;

$W_r(s)$ – передатна функція фази генератора (взаємозв'язок між обмоткою збудження й фазною обмоткою статора генератора);

$K_b = \frac{k1 \cdot U_f}{k5}$ – коефіцієнт підсилення обмотки збудження;

$K_r = U_f$ – коефіцієнт підсилення фази статора генератора;

$T_b = \frac{1}{k5}$ – постійна часу обмотки збудження;

$T_r = \frac{1}{k14}$ – постійна часу фази статора генератора;

2.6. Дослідження характеристик спрощеної моделі генератора в динамічних режимах

Спрощена модель синхронного генератора в Matlab/Simulink представлена на рис. 2.15.

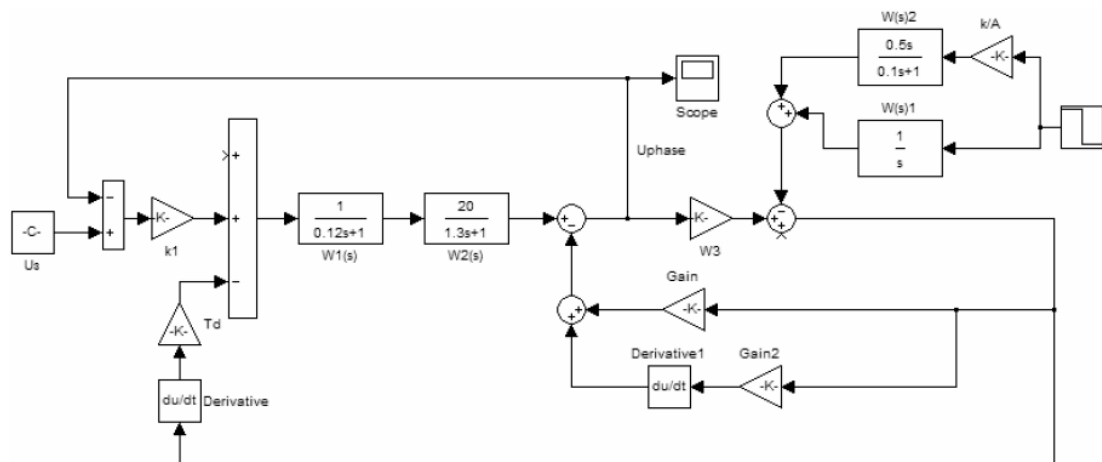


Рис. 2.15. Спрощена модель синхронного генератора ГМС13-31-12

На рис. 2.16 представлено порівняння вихідних напруг перехідних процесів точної Matlab-моделі (а) та спрощеної моделі (б) при підключенні навантаження в момент часу моделювання $t = 5$ с. похибка по амплітуді провалу та тривалості провалу складає відповідно 5,8 та 7%.

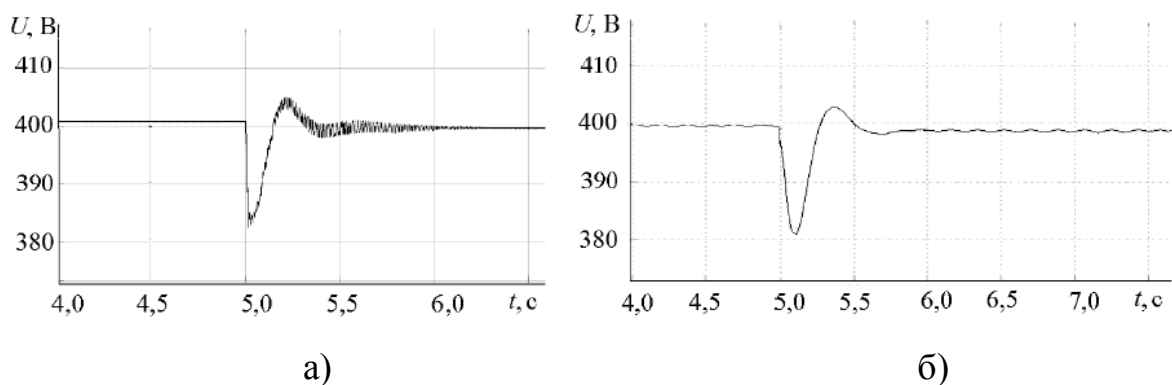


Рис. 2.16. Порівняння вихідних напруг моделей при підключенні асинхронного двигуна потужністю 75 кВт

Характеристики холостого ходу (а) та статичні характеристики (б) Matlab-моделі (лінія 1) та розробленої моделі (лінія 2) показані на рис. 2.17.

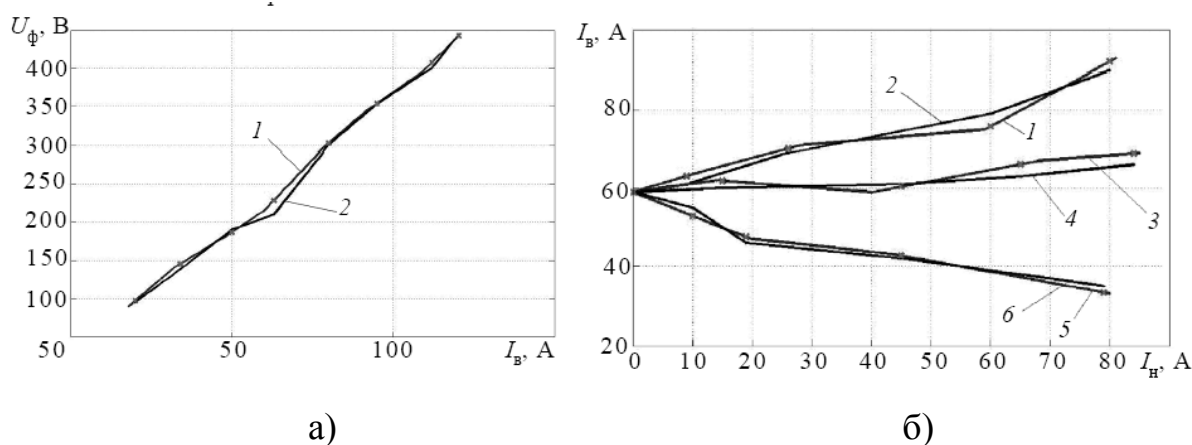


Рис. 2.17. Характеристики моделей генераторів

На рисунку позначено: 1, 3, 5 – статичні характеристики спрощеної моделі при активному, активно-індуктивному та активно-ємнісному навантаженні; 2, 4, 6 – Matlab-моделі при відповідних навантаженнях.

На рис. 2.18, а, представлені залежності провалу напруги від потужності двигуна для Matlab-моделі (суцільна лінія) та для спрощеної моделі (пунктирна лінія). На рис. 2.18, б, представлені залежності тривалості перехідного процесу від потужності двигуна, що підключається до

стандартної для Matlab-моделі (суцільна лінія) та для спрощеної моделі (пунктирна лінія).

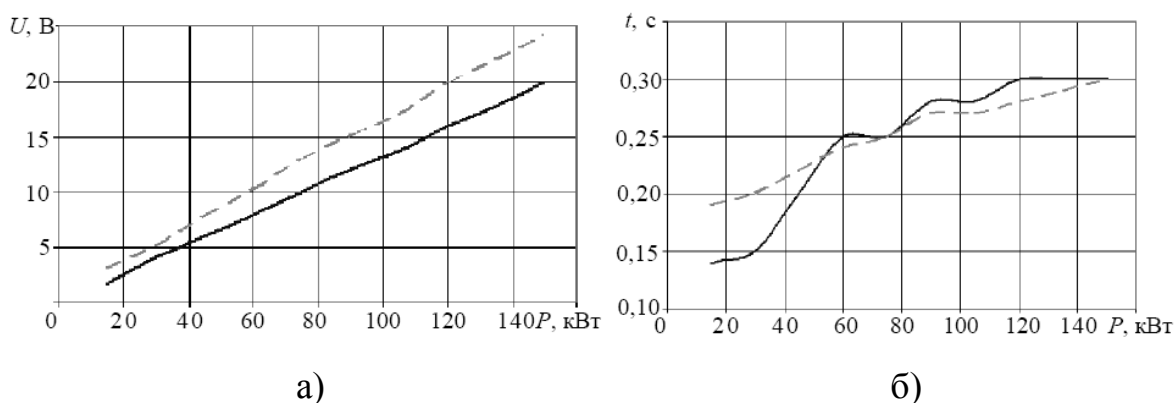


Рис. 2.18. Залежності провалу напруги та його тривалості від потужності двигуна для різних моделей генераторів

2.7. Моделювання процесів коливань частоти й напруги, обумовлених комутацією навантаження

Отримана вище матриця перехідних ймовірностей, а також система рівнянь стаціонарних ймовірностей, дозволила розробити програмні модулі автоматичного виводу графіків і параметрів режиму роботи електростанції. Однак вони не дозволяють визначити характер випадкових процесів коливань напруги і частоти, оскільки повинні бути суміщені з системою диференціальних рівнянь, що описують динамічні режими роботи електростанції. Аналітично таке завдання важко вирішити, тому слід звернутися до технологій моделювання.

Велика кількість публікацій з моделювання систем електроенергетики [9, 15, 23, 38, 92, 108, 118, 134] не дозволяють вирішувати поставлені завдання. У той же час, використання типових програмних продуктів з моделювання пристроїв електроенергетики, наприклад, Matlab-Simulink, що має всі необхідні для моделювання бібліотеки, стає фактично не працездатним при моделюванні великих систем, а, тим більше при аналізі процесів з випадковими збуреннями [134]. Власні спроби моделювання електроенергетичної системи з двома синхронними генераторами з їх

приводними двигунами і декількома асинхронними двигунами призводили фактично до зупинки процесу моделювання в Matlab. Тому скористаємося спрощеними моделями приводних двигунів, генератора й асинхронних навантажень, які розроблені колективом кафедри ТЕЕС НУК, та апробовані в [108, 110-114]. На рис. 2.19 приведена модель дизель – генераторного агрегату з можливістю аналізу динамічних режимів, обумовлених комутацією навантажень, що призводять як до появи сплесків та провалів напруги, так і коливань частоти.

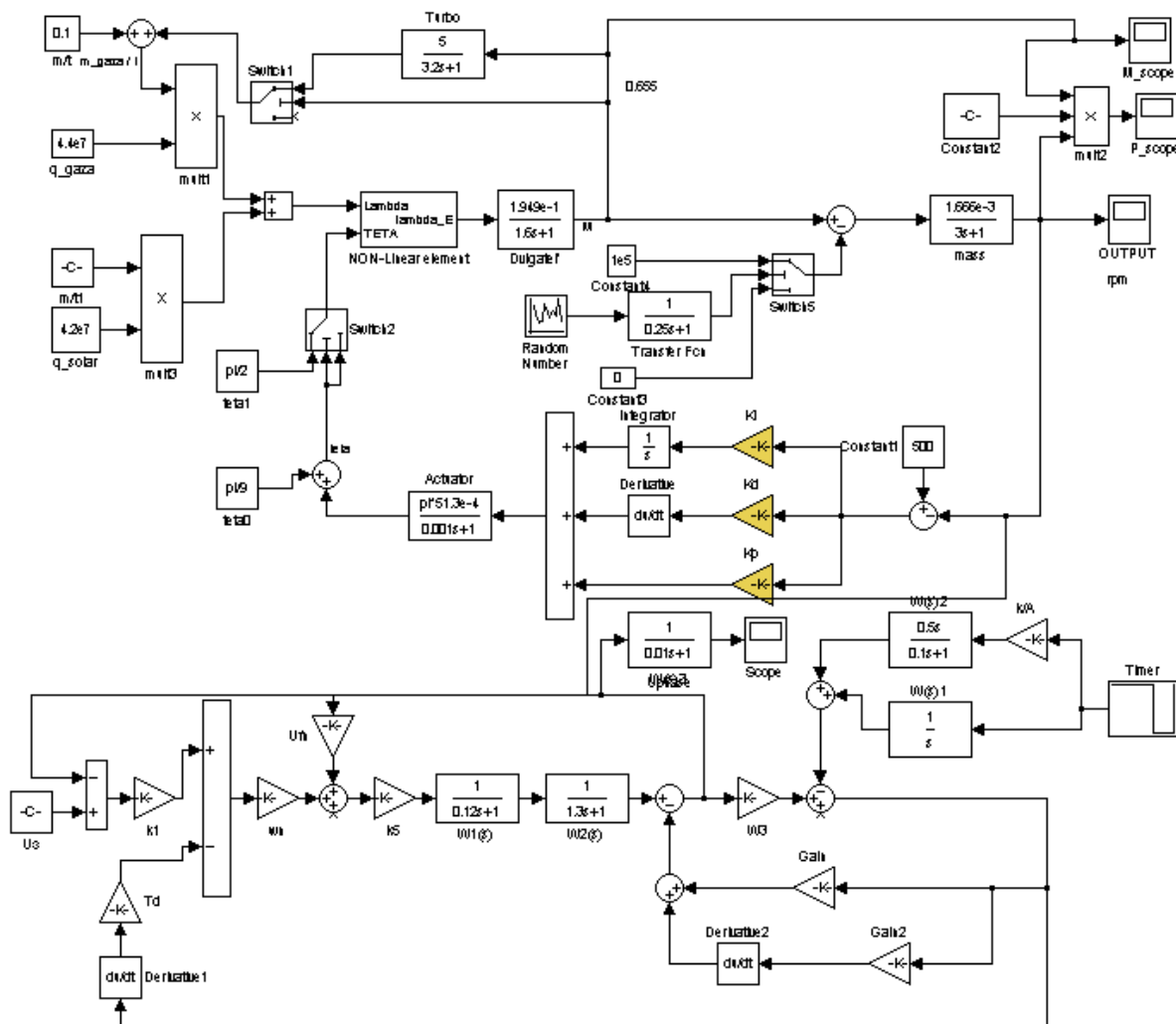


Рис. 2.19. Модель дизель-генератора з можливістю комутації навантаження

На рис. 2.20 представлена осцилограма, що відображає коливання частоти приводного газового двигуна (рис. 2.20, а) при комутаціях

навантаження (рис. 2.20, б). Номінальна частота обертів двигуна складає 500 об/хв.

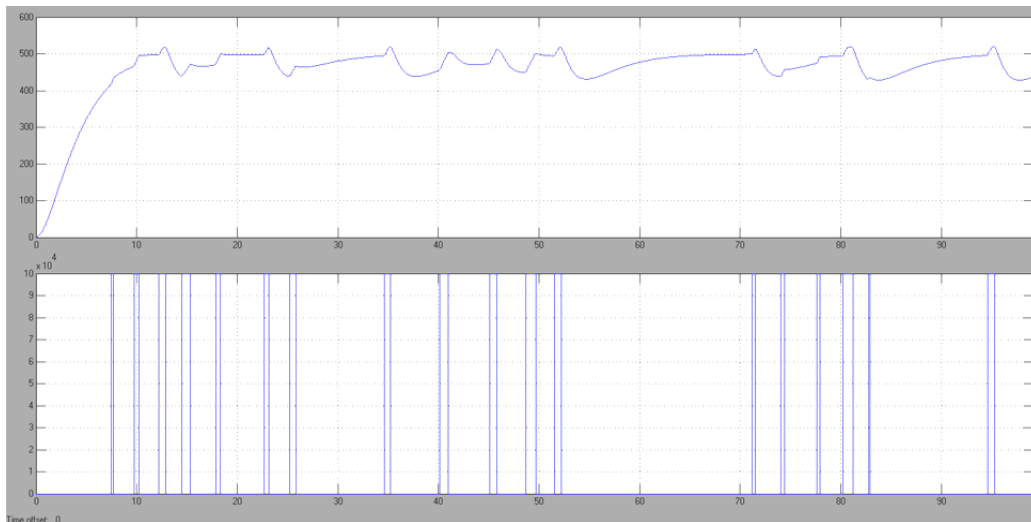


Рис. 2.20. Вихідна частота обертів валу газодизеля при комутації навантаження

Як випливає з рис. 2.20, а, при номінальній частоті 50 Гц, провали частоти, які обумовлені підключенням навантаження, досягають 43 Гц.

На рис. 2.21. наведено результати моделювання установки при комутації навантажень (рис. 2.21, в) і відображенні інформації про коливання напруги (рис. 2.21, а) та частоти (рис. 2.21, б). З аналізу наведених осцилограм видно, що коливання напруги і частоти мають помітний кореляційний зв'язок. Вигляд автокореляційних функцій та взаємної кореляційної функції розглянутих процесів наведено на рис. 2.22.

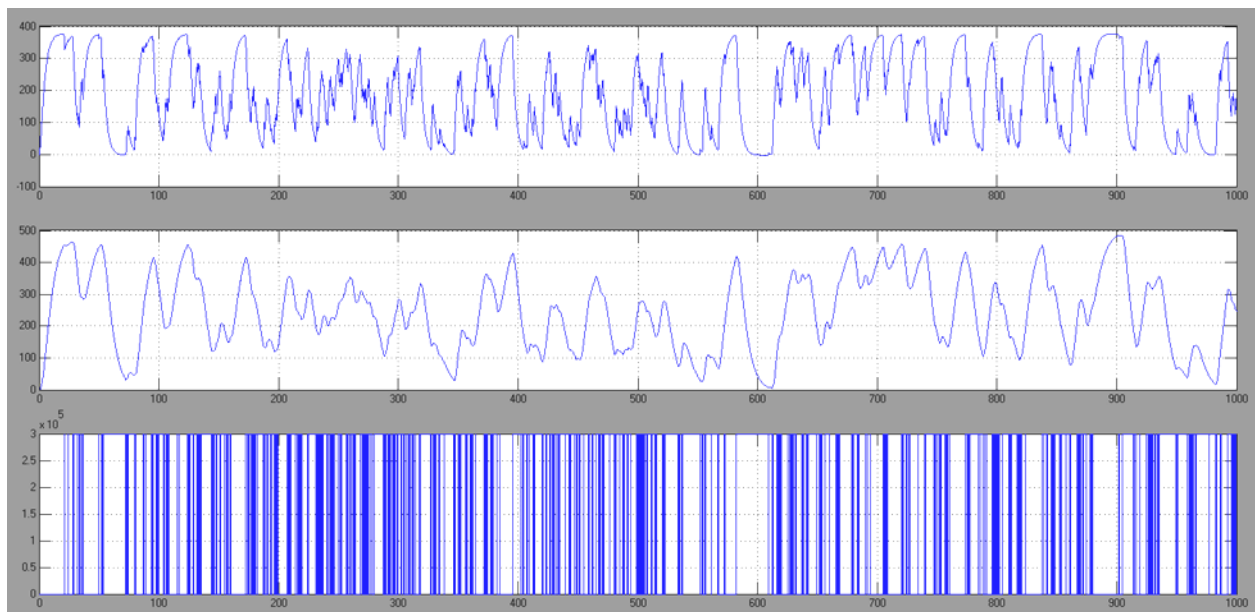


Рис. 2.21. Вихідна частота обертання валк газодизеля при комутації навантаження

Як впливає з малюнків, автокореляційна функція (АКФ) коливань напруги (рис. 2.22, а) містить більше високочастотних складових, які характеризують більш широкий спектральний склад коливань напруги. Фізично це виявляється в тому, що комутація навантажень призводить до короткочасних коротких замикань по мережі, що супроводжується миттєвими провалами напруги мережі, або миттєвими підключеннями додаткових Е.Р.С, що супроводжуються сплесками напруги мережі. Ці складові вносять свій внесок у високочастотну складову АКФ.

Сплески і провали коливань частоти зазвичай згладжуються великими маховими масами електроенергетичної установки, тому їх високочастотна складова в автокореляційній функції істотно менше.

Взаємна кореляційна функція (ВКФ) встановлює взаємозв'язок між коливаннями напруги і частоти. Вона має максимальне значення, що збігається з максимумами попередніх функцій, і загасає у часі. Перші дві функції описуються виразами:

$$r(\tau) = \sigma^2 \exp(-\alpha|\tau|) \cos \Omega \tau,$$

а взаємна кореляційна функція – косинусною функцією.

4. Розроблений комплекс апаратно-програмних засобів когигування коефіцієнтів ПД-регулятора в залежності від навантаження ГДГА дозволив оптимізувати динамічні режими його роботи у всьому діапазоні навантажень та в 15-20 разів знизити дисперсію коливань обертів ГД.

5. На основі нечіткої логіки розроблена структура ПД-регулятора ГДГА, яка дозволяє коригувати його параметри в функції поточного режиму, забезпечуючи адаптацію ГДГА до величини його навантаження та необхідну «грубість» у керуванні.

6. Розроблена спрощена динамічна модель синхронного генератора, що може бути використана для дослідження динамічних режимів роботи в автономних електроенергетичних системах. Показано, що похибка цієї моделі в порівнянні з повною Matlab-моделлю не перевищує 10%.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КОМУТАЦІЇ НАВАНТАЖЕННЯ В АЕЕС

3.1. Аналіз процесів комутації навантаження в АЕЕС

Однією з причин появи провалів та сплесків напруги є зміна навантаження автономної електростанції, особливо при пуску потужних асинхронних двигунів. Принциповим аспектом роботи автономної електроенергетичної системи є випадковий характер вхідного потоку заявок на комутацію навантаження. В даному випадку під заявкою розуміється сигнал на вмикання або вмикання споживача електроенергії, наприклад асинхронного двигуна.

Отже, адекватною моделлю такого процесу буде система масового обслуговування, яка характеризується стохастичним процесом $x(t)$ з дискретною множиною значень, що утворюють безперервний ланцюг Маркова:

$$\Pr[X(t) = j \mid X(\tau) \text{ for } (\tau_1 \leq \tau \leq \tau_2 \leq t)] = \Pr[X(t) = j \mid X(\tau_2)].$$

Оскільки в даному випадку розглядаються події вмикання та вимикання споживачів електроенергії, можна припустити, що їх тривалість роботи підпорядковується показниковому закону розподілення. Таке розподілення тривалості заявок на комутацію навантаження має марківську властивість – відсутність післядії (пам'яті). Відповідно, вірогідність завершення обслуговування виклику на малому інтервалі часу має вигляд:

$$P(t, t + \Delta t) = \mu \Delta t + f(\Delta t),$$

і не залежить від положення цього інтервалу на вісі часу.

Оскільки всі процеси в системі, що досліджуються, мають марківські властивості, то всі потоки заяв, що переводять систему з одного стану в інший, є пуасонівськими (в даному випадку під різними станами розуміється режим роботи електросистеми з різною потужністю, що генерується силовими агрегатами, і, відповідно, споживається навантаженням).

Для спрощення аналізу системи будемо розглядати весь поті заявок на комутацію навантаження як сигнали, що поступають на деякий комутатор в автономній електроенергетичній системі (АЕЕС) (рис. 3.1).

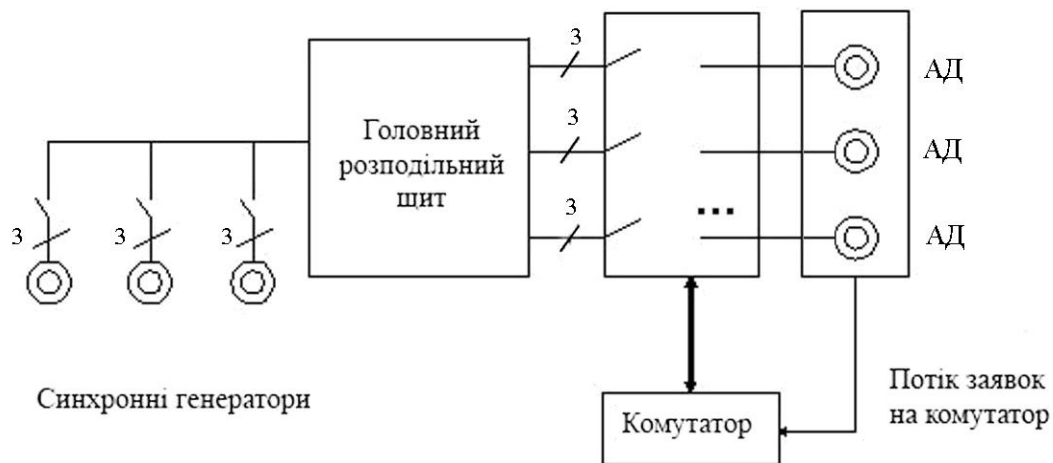


Рис. 3.1. Структура АЕЕС для імітаційного моделювання процесу комутації навантаження

Загальний випадок опису комутатора як системи масового обслуговування, що має марківські властивості, має важливе практичне значення – випадок чистої системи масового обслуговування з очікуванням та пуасонівським навантаженням. Така система має буфер, що дозволяє зберігати чергу нескінченної довжини, стан якого можна ототожнити з кількістю запитів, що є в системі в кожний момент часу.

Добовий графік навантаження АЕЕС розбивається на часові інтервали Δt тривалістю 10 хвилин. Час обробки заявки диспетчером (тривалість перехідного процесу після комутації навантаження) складає кілька одиниць секунд, і значно менший, ніж тривалість роботи споживача.

В рамках теорії булевих функцій кожний елемент системи може мати лише два стани – ввімкнений чи вимкнений (включений або виключений). Відзначимо, що булева функція – це функція, аргументи якої, як і сама функція, приймають значення з множини, яка складається з двох елементів $[0, 1]$.

При побудові булевих моделей приймається припущення, згідно якому миттєві стани елементів (в даному випадку стан навантаження – включене чи виключене) однозначно задають стан системи в той самий момент часу. Кожному i -му елементу присвоюється булева змінна:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i\text{-й елемент включений,} \\ 0, & \text{якщо } i\text{-й елемент виключений.} \end{cases}$$

Функціонування всієї електроенергетичної системи інтерпретується як випадковий процес, який в кожний момент часу для кожного з навантаження приймає значення 1 або 0. Поведінка i -го елементу ($i = 1, 2, \dots, N$) описується випадковим процесом $y_i(t)$.

3.2. Використання ланцюгів Маркова для аналізу режимів роботи АЕЕС

Для кількісного аналізу системи з використанням графу, використаний марківський процес [9, 23].

Марківським процесом називається випадковий процес із скінченною кількістю станів, який розвивається в дискретному часі та має марківські властивості: поведінка процесу, починаючи з будь-якого моменту часу, визначається лише поточним станом і не залежить від всієї передісторії процесу переходу з одного стану в інші. Марківський ланцюг з n різними станами характеризується матрицею значень так званих перехідних вірогідностей:

$$P = \begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{vmatrix}$$

Елементи матриці переходів p_{ij} відповідають вірогідності того, що марківський ланцюг, який знаходиться в стані i , на наступному кроці перейде в стан j . Вірогідність p_{ij} представляє вірогідність того, що на наступному кроці процесу стан i збережеться.

Перехід з одного стану системи в інший описується випадковою величиною, що має своє розподілення $F_k(t)$ для кожного k -го стану. Для марківського процесу всі розподілення $F_k(t)$ є експоненційними.

Марківський ланцюг зручно описувати орієнтованим графом, «ваги» ребер якого відповідають інтенсивності переходу з одного стану в інший. Знаючи перехідні вірогідності p_{ij} та параметр λ_i розподілення $K_i(t)$ часу перебування процесу в i -м стані, можна знайти «ваги» ребер по формулі:

$$\lambda_{ij} = p_{ij} \lambda_i.$$

Метод графу станів, з енергетичної точки зору, є найбільш універсальним методом побудови структурних схем для дослідження діаграми навантаження АЕЕС. Суттєвою перевагою цього методу є можливість моделювання процесів комутації навантаження та визначення статистичних характеристик таких процесів з метою оперативного короткострокового планування навантаження АЕЕС та резервування потужності.

Розглянемо систему, що складається з одного генератора та одного споживача електроенергії – асинхронного двигуна (АД). Цей приклад дозволяє розглянути методологічні підходи до аналізу функціонування енергосистеми та побудови в подальшому діаграми навантаження. Отже, асинхронний двигун може знаходитися в двох станах: S_1 – виключений, S_2 – включений. На рис. 3.2 представлений граф станів енергосистеми.

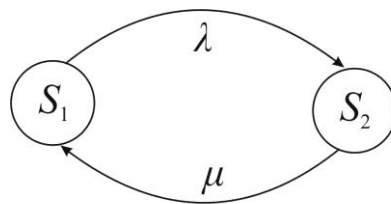


Рис. 3.2. Граф станів енергосистеми

Перехід зі стану S_1 у стан S_2 відбувається за принципом однорідного марківського процесу з інтенсивністю λ . Перехід із стану 2 в стан 1 відбувається з інтенсивністю μ .

Вірогідність того, що в момент часу $\tau + \Delta\tau$ навантаження знаходиться в стані S_1 (виключене), оцінюється наступним алгоритмом. В стані S_1 енергоблок по закінченню часу $\tau + \Delta\tau$ може знаходитись по двом причинам:

- в момент часу τ він знаходився в стані S_1 і не перейшов до стану S_2 за проміжок $\Delta\tau$;
- в момент часу τ енергоблок знаходився у стані S_2 і за період часу $\Delta\tau$ перейшов у стан S_1 .

Вірогідність знаходження енергоблоку в стані S_1 визначається добутком $P_1(\tau)$ на вірогідність $(1 - \lambda \cdot \Delta\tau)$ того, що енергоблок не перейшов в стан S_2 за проміжок часу $\Delta\tau$. Аналогічно визначається вірогідність знаходження енергоблоку в стані S_2 : $P_2(\tau)\mu\Delta\tau$. Використовуючи правило додавання вірогідностей знайдемо:

$$P_1(\tau + \Delta\tau) = P_1(\tau)(1 - \lambda\Delta\tau) + P_2(\tau)\mu\Delta\tau.$$

Перетворимо це рівняння до вигляду:

$$\frac{P_1(\tau + \Delta\tau) - P_1(\tau)}{\Delta\tau} = -\lambda P_1(\tau) + \mu P_2(\tau).$$

Подібні рівняння можна скласти для кожного стану графа. При цьому граф станів буде описуватися системою диференціальних рівнянь і їх кількість дорівнює кількості станів на графі. Отже, для графа, що представлений на рис. 3.2 можна записати:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{d\tau} = -\lambda P_1 + \mu P_2, \\ P_1 + P_2 = 1. \end{cases}$$

Граф станів формується на основі послідовних процедури перетворення функціональної схеми енергоблоку в структурну схему, на базі якої базується граф станів.

Розглянемо енергосистему, що складається з двох генераторів та визначеної кількості споживачів. При наявності достатньої кількості резерву потужності (в цьому режимі включені не всі споживачі), на навантаження працює лише один генератор, а другий знаходиться в резерві. При нестачі потужності, що генерується, другий генератор вводиться на паралельну

роботу з першим генератором і бере на себе частину навантаження. Спрощена схема та граф станів такого енергоблоку представлений на рис. 3.3.

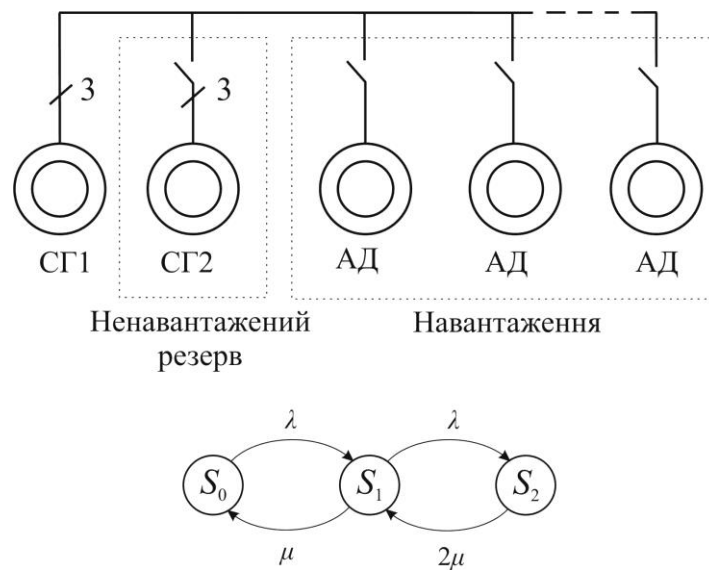


Рис. 3.3. Спрощена схема енергосистеми

Така схема роботи може використовуватись у тих випадках, коли тривалість вмикання в роботу додаткового генератора невелика, і його можна тримати у виключеному стані. Для стаціонарних потоків заявок на комутацію навантаження можна записати:

$$\begin{cases} -\lambda P_0 + \mu P_1 = 0, \\ -(\lambda + \mu)P_1 + \lambda P_0 + 2\mu P_2 = 0, \\ P_0 + P_1 + P_2 = 1. \end{cases}$$

Рішенням системи рівнянь є:

$$P_0 = \frac{2}{\left(1 + \frac{\lambda}{\mu}\right)^2 + 1}; \quad P_1 = \frac{\lambda P_0}{\mu}; \quad P_2 = P_0 + P_1.$$

Для режиму, коли обидва генератори працюють, вірогідність станів визначається виразом:

$$P_0 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2}; \quad P_1 = \frac{2\lambda P_0}{\mu}.$$

Для енергосистеми, що складається з трьох генераторів, два з яких знаходяться у роботі, а один – в резерві (ненавантажений), вірогідності станів можна визначити наступним чином:

$$P_0 = \frac{3}{2\left(1 + \frac{\lambda}{\mu}\right)^3 + 1}; \quad P_1 = \frac{2\lambda P_0}{\mu}; \quad P_2 = \frac{\lambda P_1}{\mu}.$$

Для побудови моделі енергосистеми, що складається з трьох синхронних генераторів, використовується апарат марковських процесів. Енергосистема в будь-який момент часу може знаходитися в одному з 5 станів: S_0 – вимкнені всі генератори, S_1 – працює перший генератор, другий – в гарячому резерві; S_2 – працює перший та другий генератори, третій знаходиться в резерві; S_3 – всі три генератори працюють. На рис. 3.4 представлена часова діаграма, яка показує стан кожного з генераторів протягом доби. Як зазначалося раніше, генератор, як елемент системи, може бути описаний булевою функцією, яка має два значення – 0 (виключений) та 1 (включений). Потужність кожного з генераторів складає 300 кВт.

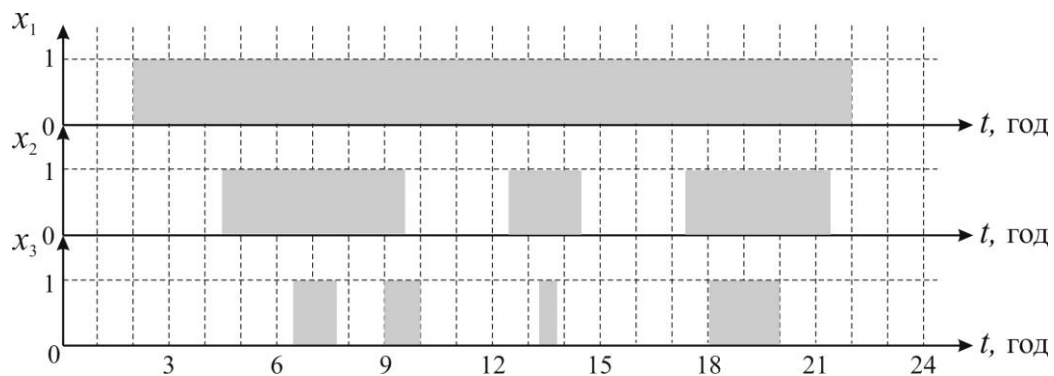


Рис. 3.4. Часова діаграма роботи генераторів протягом доби

Для електроенергетичної системи, яка розглядається, виконаємо імітаційне моделювання, яке полягає в логіко-аналітичній імітації функціонування системи.

Задачею імітаційного моделювання в даному випадку є побудова алгоритму поведінки підсистем та окремих елементів системи генераторів у часі [33]. Цей алгоритм може бути реалізований у вигляді програми.

Потоком випадкових подій у даному випадку є заявки на підключення (відключення) генератора на паралельну роботу з іншим генератором. Статистична обробка цієї інформації дозволяє отримати статистичні оцінки показників ефективності. Спеціальним чином генерується вхідний потік заявок, причому момент появи кожної заявки є випадковою подією. Блок-схема алгоритму програми імітації роботи системи представлена на рис. 3.5.

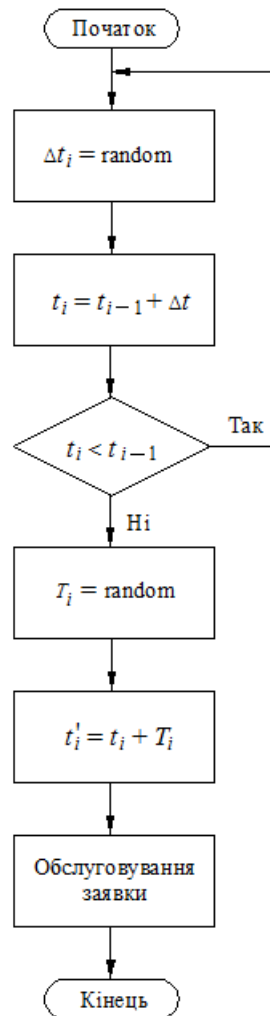


Рис. 3.5. Блок-схема алгоритму імітації роботи системи

На рисунку позначено: t_i – момент появи заявки; t'_i – момент завершення обслуговування; T_i – тривалість обслуговування:

$$T_i = t_i - t'_i.$$

АЕЕС розглядається на двох рівнях деталізації. Зміна кількості генераторів, що працюють паралельно на загальне навантаження

розглядається як процес більш високого рівня, а комутація навантаження (кожного з двигунів) – як процес більш низького рівня. Навантаження (асинхронний двигун) може знаходитись у двох станах – включений або виключений. Перехідні процеси, що супроводжуються пуском асинхронних двигунів на даних рівнях деталізації не розглядаються. На рис. 3.6 показані різні рівні деталізації. Використані наступні позначення: S_0 – жоден з генераторів не працює, S_1 – працює один генератор, S_2 – працює 2 генератори, S_3 – працює 3 генератори, S_{1j} – робота визначеної групи асинхронних двигунів, ($1 \leq j \leq n$), де n – кількість двигунів в енергосистемі, S_{13i} – стани ($1 \leq i \leq 5$), в які переходить асинхронний двигун при запуску або зупинці.

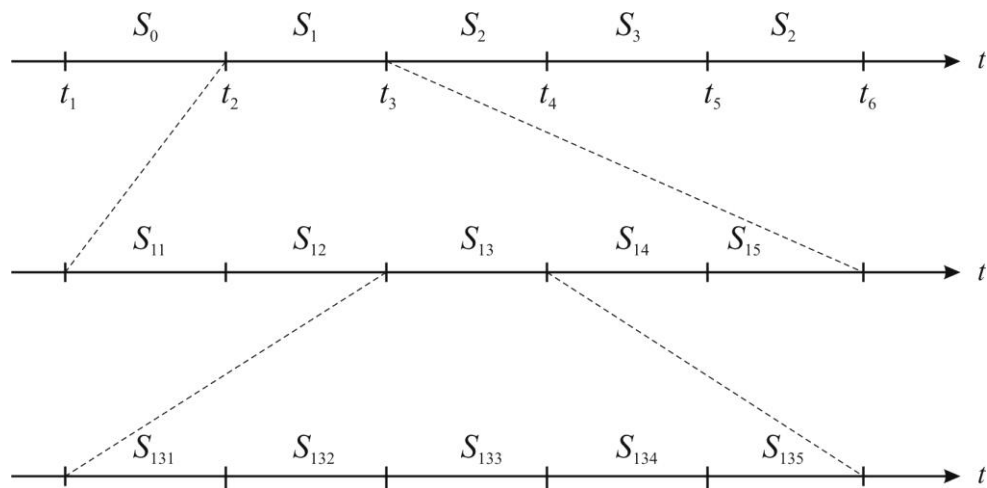


Рис. 3.6. Рівні деталізації роботи АЕЕС

Тривалість знаходження системи у визначеному стані на порядок перевищує час, протягом якого система перейшла з одного стану в інший. Тому будемо вважати переходи системи з одного стану в інший такими, що відбуваються миттєво.

Автономна електроенергетична система в кожний момент часу може знаходитися одному з декількох санів, $S_0, S_1, \dots, S_n$, що визначаються кількістю паралельно працюючих генераторів. Основна властивість ланцюга Маркова полягає в тому, що стан, в якому система опиниться в наступний момент часу, залежить тільки від поточного стану і не залежить від попередніх [9].

Кожному моменту часу відповідає вектор станів $[S(t)]$, елементами якого є вірогідності знаходження системи в кожному із можливих станів.

$$[S(t_k)] = [S_1(t_k), S_2(t_k), \dots, S_n(t_k)],$$

$$\sum_{i=1}^n S_i(t_k) = 1,$$

де n – кількість генераторів в АЕЕС.

3.3. Моделювання процесів зміни навантаження

Виконаємо імітаційне моделювання поведінки дискретного ланцюга Маркова. Початковий стан системи заданий. Строка матриці вірогідностей переходів (рис. 3.7) для цього стану встановлює вірогідності переходів з поточного стану в будь який інший. Новий стан отримаємо як дискретне випадкове значення.

$$|p| = \begin{matrix} & \begin{matrix} S_0 & S_1 & S_2 & S_3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,1 & 0,9 & 0 & 0 \\ 0,05 & 0,7 & 0,25 & 0 \\ 0 & 0,6 & 0,3 & 0,1 \\ 0 & 0 & 0,8 & 0,2 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Рис. 3.7. Матриця вірогідностей переходів

Розглянемо строку матриці переходів, якій відповідає стан АЕЕС з одним працюючим генератором. Вірогідність того, що система залишиться в цьому ж стані дорівнює 0,7. Вірогідність підключення другого генератора на паралельну роботу дорівнює 0,25. Вірогідність зупинки генератора дорівнює 0,05. Ряд вірогідностей представлений на рис. 3.7. Генерується випадкове значення ξ . Припустимо, що воно дорівнює 0,473. Це означає, що система із стану S_0 перейде в стан S_1 , тобто був включений один генератор. Генерується наступне випадкове значення, наприклад 0,831. Це означає, що система перейде в стан S_2 , тобто буде включений другий генератор на паралельну роботу з першим. Нове випадкове значення дорівнює 0,936, і система залишається в стані S_2 (з двома паралельно працюючими генераторами). Цей

алгоритм продовжується доти, доки не буде отримані стани, в яких може знаходитися АЕЕС протягом доби. Необхідно виконати $6 \cdot 24 = 144$ ітерацій за умови, що крок дискретного часу складає 10 хвилин. На рис. 3.4 представлений результат імітації режимів роботи АЕЕС.

В кожному із режимів роботи енергосистеми сумарна потужність, що споживається навантаженням, може знаходитися у визначених діапазонах.

Рис. 3.8 демонструє вищезазначене.

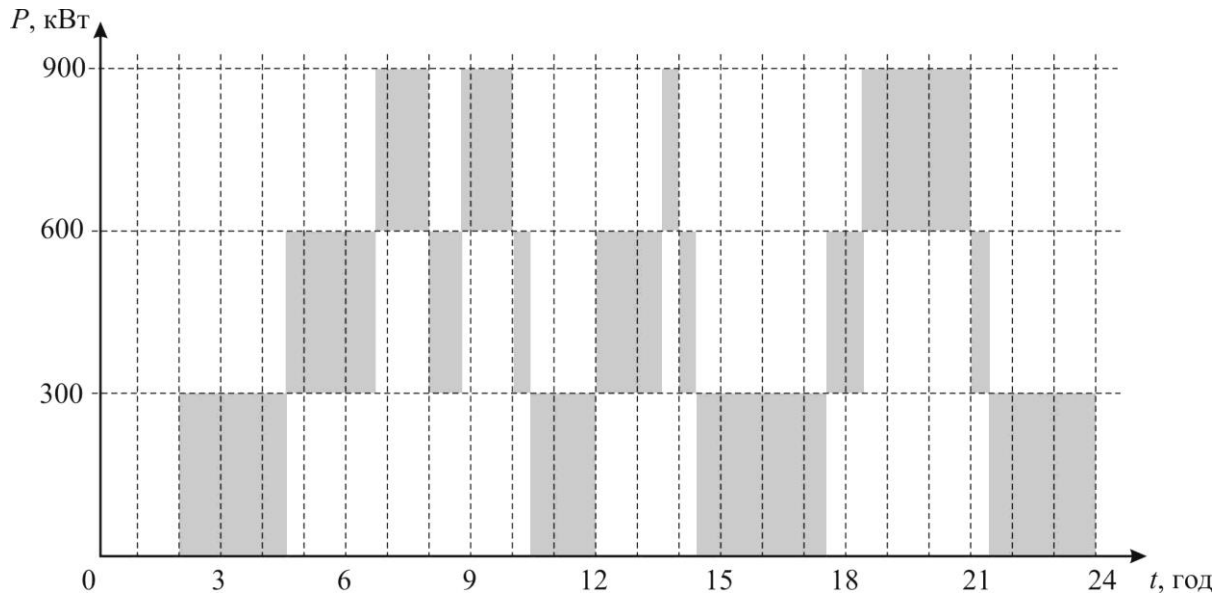


Рис. 3.8. Діаграма роботи генераторів протягом доби

В кожній із зазначених областей значення споживаної потужності визначається кількістю навантаження, що підключене до шини ГРЩ, і є випадковою величиною y , яка є функцією $y = f(\alpha, \beta, \dots, \omega)$ випадкових величин $\alpha, \beta, \dots, \omega$, з відомими функціями розподілення, які визначаються шляхом аналізу діаграми навантаження в попередні моменти часу.

Коефіцієнт заповнення графіка навантаження показує, у скільки разів вироблена (спожита) кількість електроенергії за аналізований період (добу) менше тієї кількості енергії, яка було б вироблена (спожита) за той же час, якби навантаження установки весь час було максимальним. Очевидно, що чим рівномірніший графік, тим ближче значення ККД до максимально можливого. Для характеристики графіка навантаження установки можна

скористатися також умовною тривалістю використання максимального навантаження:

$$T_{\max} = \frac{W_n}{P_{\max}} = \frac{P_{\text{сеп}} T}{P_{\max}} = K_{\text{зан}} T.$$

Ця величина показує, скільки годин за аналізований період T (доба) установка повинна була б працювати з незмінним максимальним навантаженням, щоб виробити дійсну кількість електроенергії W_n за цей період часу.

Ступінь нерівномірності графіка роботи установки оцінюється коефіцієнтом заповнення:

$$k_{\text{зан}} = \frac{W_n}{P_{\max} T} = \frac{P_{\text{сеп}}}{P_{\max}}.$$

Модель системи представляє собою сукупність моделей елементів, і для задачі, що розглядається, під моделлю елемента системи розуміється набір правил поведінки елемента по відношенню до вхідних викликів та зміна станів елемента. Метою імітаційного моделювання є:

- відтворення поведінки навантаження в процесі роботи електроенергетичної системи;
- накопичення статистичних даних про роботу кожного асинхронного двигуна;
- подальша статистична обробка цих даних для отримання статистичних оцінок кількісних характеристик.

Таким чином, процес імітації роботи енергосистеми і зміни її станів виконується з використанням керуючих послідовностей, що визначаються по функціям розподілення вірогідностей вихідних випробувань. Загальний алгоритм проведення моделювання представлений на рис. 3.9.

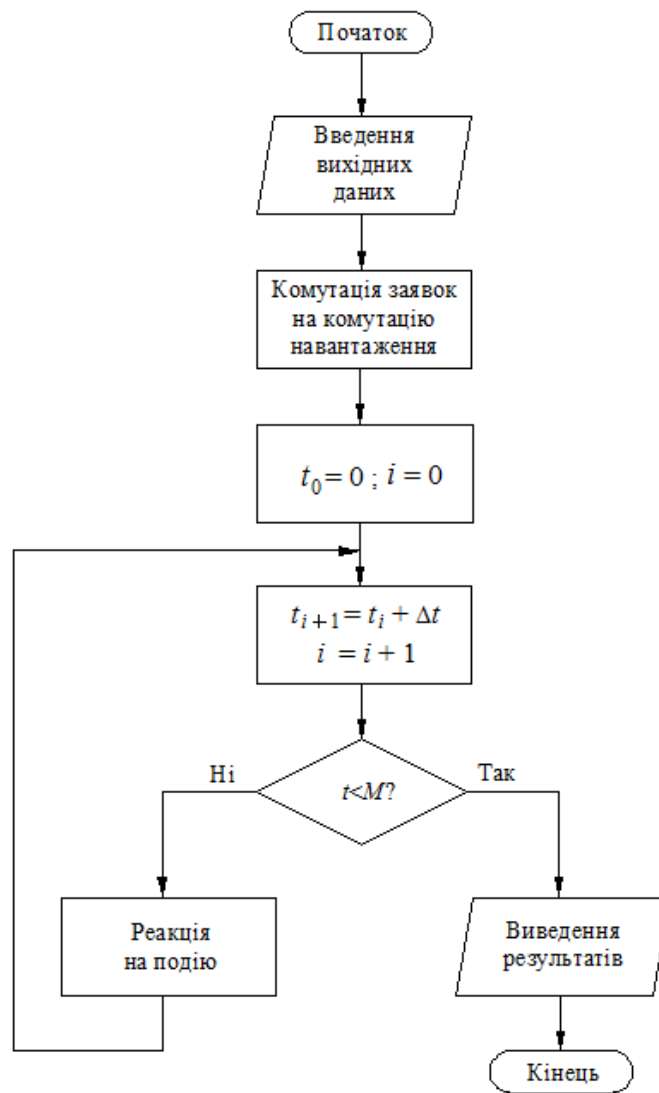


Рис. 3.9. Блок-схема алгоритму проведення моделювання

На практиці, при роботі реальної системи, існують випадкові фактори, які призводять до зміни станів системи. Загалом, ці фактори визначаються як технологічним процесом, електроживлення якого забезпечує АЕЕС, часом доби, структурою електроенергетичної системи, і навіть погодою (при великій температурі працюють кондиціонери та вентилятори, при низькій температурі – обігрівачі, потужність яких співрозмірна з потужністю генераторів). Отже, виникає задача моделювання випадкових величин із різними законами розподілення.

В якості базових використовуються випадкові величини з рівномірним законом розподілення, які з однаковою вірогідністю можуть приймати будь-які значення в даному інтервалі [9].

Генератор випадкових величин видає незалежні, рівномірно розподілені в заданому діапазоні випадкові величини. Оскільки розглядається задача короткострокового прогнозування навантаження АЕЕС (протягом доби), то кількість дискретних інтервалів часу протягом доби складає $24 \cdot 6 = 144$.

Шаг дискретного часу складає 10 хвилин, отже генерується масив випадкових чисел, що розподілені в інтервалі часу від 0 до 24 годин, тобто число з діапазону $[0..144]$. Це значення визначає момент часу, коли буде відбуватися комутація навантаження. Крім того, генерується друге випадкове значення, яке визначає тривалість роботи навантаження. Якщо цю процедуру повторити декілька разів, то для кожного окремого навантаження отримуємо добовий графік роботи.

За принципом суперпозиції сумарне навантаження можна розрахувати шляхом додавання потужності, що споживається повним навантаженням. Це і буде вихідними даними для побудови добового графіку навантаження АЕЕС.

На рис. 3.10 представлений інтерфейс програми, яка дозволяє автоматизувати процес отримання діаграми роботи кожного із споживачів електроенергії.

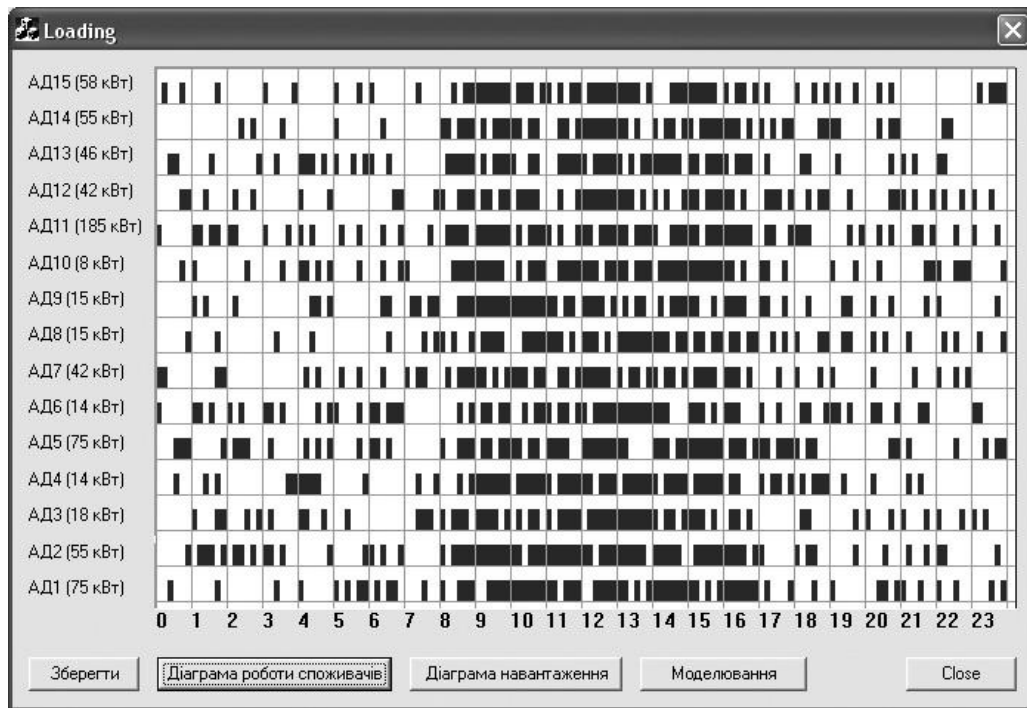


Рис. 3.10. Інтерфейс програми моделювання роботи споживачів

Для генерації базових випадкових величин використовуються різні способи: апаратний, табличний, алгоритмічний [9]. В даній роботі генерування випадкових величин відбувається з використанням табличного способу, оскільки такий підхід дозволяє гнучко змінювати закон розподілення та вводити обмеження на одночасну роботу окремих споживачів. Побудована таким чином модель в найбільшій мірі відповідатиме реальній системі.

На рис. 3.11 представлений приклад випадкових чисел з рівномірним розподіленням, що представляють собою заявки на вимикання або вмикання асинхронного двигуна.

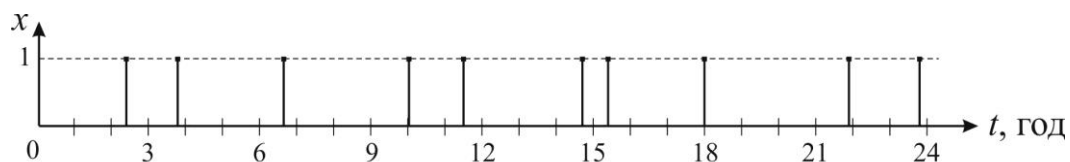


Рис. 3.11. Випадкові числа з рівномірним розподіленням

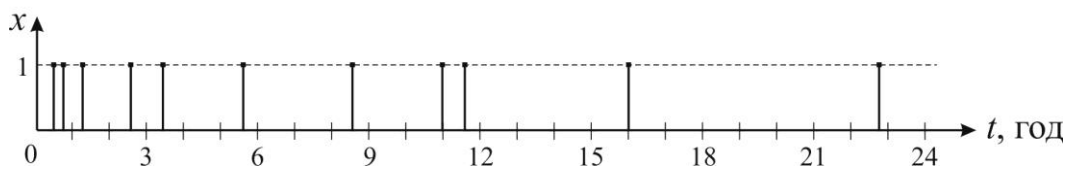


Рис. 3.12. Випадкові числа з експоненційним розподіленням

Для експоненціального розподілення функція розподілення відповідностей має вигляд:

$$F(k) = 1 - e^{-\lambda k}.$$

На рис. 3.12 представлений приклад випадкових величин з експоненціальним розподіленням. Отже, для моделювання всієї енергосистеми для кожного з навантажень необхідно задати характер розподілення, що визначається безпосередньо функціями, які виконує окремий споживач електроенергії (насос, вентилятор, освітлення, електропривід та ін.).

В автономній електроенергетичній системі можна виділити групи споживачів, які можуть бути описані функціями з рівномірним, експоненціальним, нормальним або іншим видом розподілення. Всі ці фактори потрібно враховувати при побудові діаграми навантаження. Для нормального розподілення функція розподілення вірогідностей має вигляд:

$$F(k) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(k-m)^2}{2\sigma^2}} dk,$$

де σ – середньоквадратичне відхилення, σ^2 – дисперсія, m – математичне очікування.

Процедура отримання чисел, розподілених по одному із зазначених законів полягає в наступному. Проводиться визначена кількість випробувань. В процесі кожного випробування значення кожної випадкової величини ξ порівнюється із p . Якщо $\xi \leq p$, то до лічильника подій додається 1. Після завершення n випробувань, значення лічильника можна вважати випадковою величиною, розподіленою по закону Пуасона. Для отримання потоку Ерланга достатньо виконати «просіювання» простішого потоку [9].

3.4. Аналіз роботи АЕЕС при комутації навантаження

Задачу імітаційного моделювання роботи АЕЕС з метою побудови діаграми навантаження розглянемо на прикладі секції головного розподільного щита електроенергетичної системи риболовного траулера «Находка, споживачі якої відображені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Споживачі, що підключені до ГРЩ

N	Найменування електроприймача	Тип двигуна	P_n (кВт)	I_n (А)	U_n (В)	$\cos\varphi_n$	R_n (Ом)
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Насос рульової машини	МАФ83-94	75	147,6	380	0,86	0,02
2	Масляний насос	4А180М40	55	100,5	380	0,90	0,07
3	Компресор пуск. повітря	4А180М6	18,5	37	380	0,87	0,34
4	Вентиляція МКО	МАФ83-64	14,5	27,9	380	0,9	0,28
5	Електропривід ЯШП	4А250М40	75	136,5	380	0,9	0,04
6	Насос технічних потреб	АМ72-6	14	31,7	380	0,78	0,12
7	Загальносуднова вентиляція	АН91-4	42	92,8	380	0,79	0,11
8	Сушилка	4А180М8	15	55,6	380	0,82	0,43
9	Мельнична установка	4Р180М8	15	55,6	380	0,82	0,43
10	Сепаратор відокремлення жиру	АМ70-6	8	20,5	380	0,73	0,62
11	Гідронасос промисл. либідки	АН112	185	368	380	0,85	0,02
12	Пожежний насос	АН82-2	42	85,6	380	0,83	0,08
14	Виробнича вентиляція	МАФ83-85	46	91,6	380	0,90	0,05
14	Масляний насос	4А180М40	55	100,5	380	0,90	0,07
15	Насос охолодження забортної води	МАФ83-94	58	101,0	380	0,88	0,04

Кожен споживач характеризується своєю діаграмою роботи, яка є незалежною від режимів роботи інших споживачів. Розглянуті споживачі характеризуються індивідуальними режимами роботи та процес їх комутація носить випадковий характер. На рис. 3.13 представлені діаграми роботи

кожного із споживачів електроенергії, а на рис. 3.14 потік заявок на комутацію навантаження.

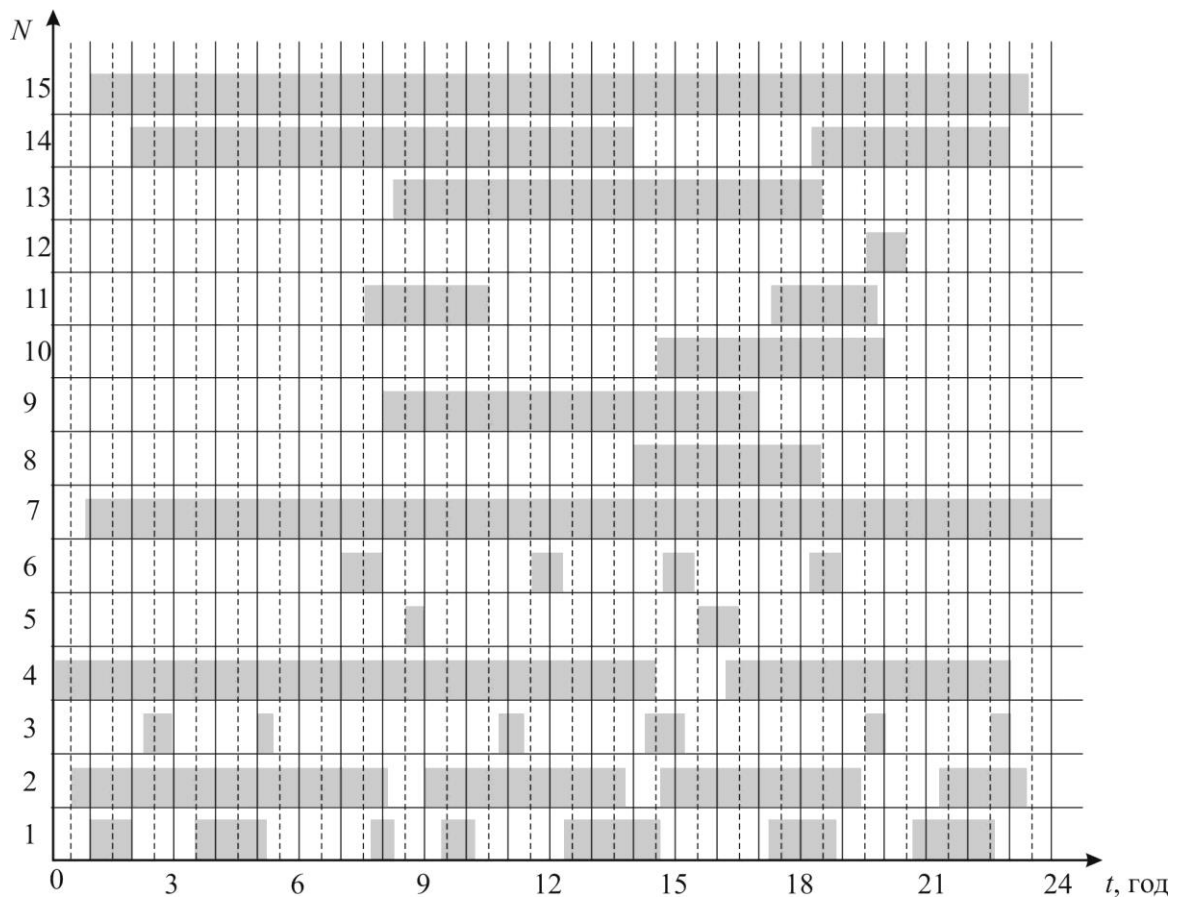


Рис. 3.13. Діаграма роботи кожного із споживачів

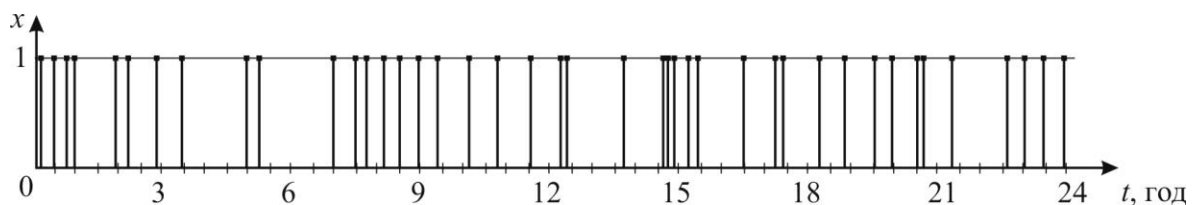


Рис. 3.14. Потік заявок на комутацію навантаження

Від одночасної роботи великої кількості приймачів електроенергії в експлуатаційних режимах з різним характером навантаження залежить сумарне навантаження АЕЕС. Визначення сумарних резкозмінних навантажень слід проводити на підставі індивідуальних графіків навантажень окремих споживачів з урахуванням їх розбіжності. У добовому графіку навантаження АЕЕС є піки, обумовлені включенням і відключенням навантажень в експлуатаційних режимах роботи електростанції, виявлення

яких необхідне для запобігання несприятливих умов роботи електроприймачів.

Блок-схема алгоритму, який дозволяє отримати одне з вищезазначених розподілень, представлена на рис. 3.15.

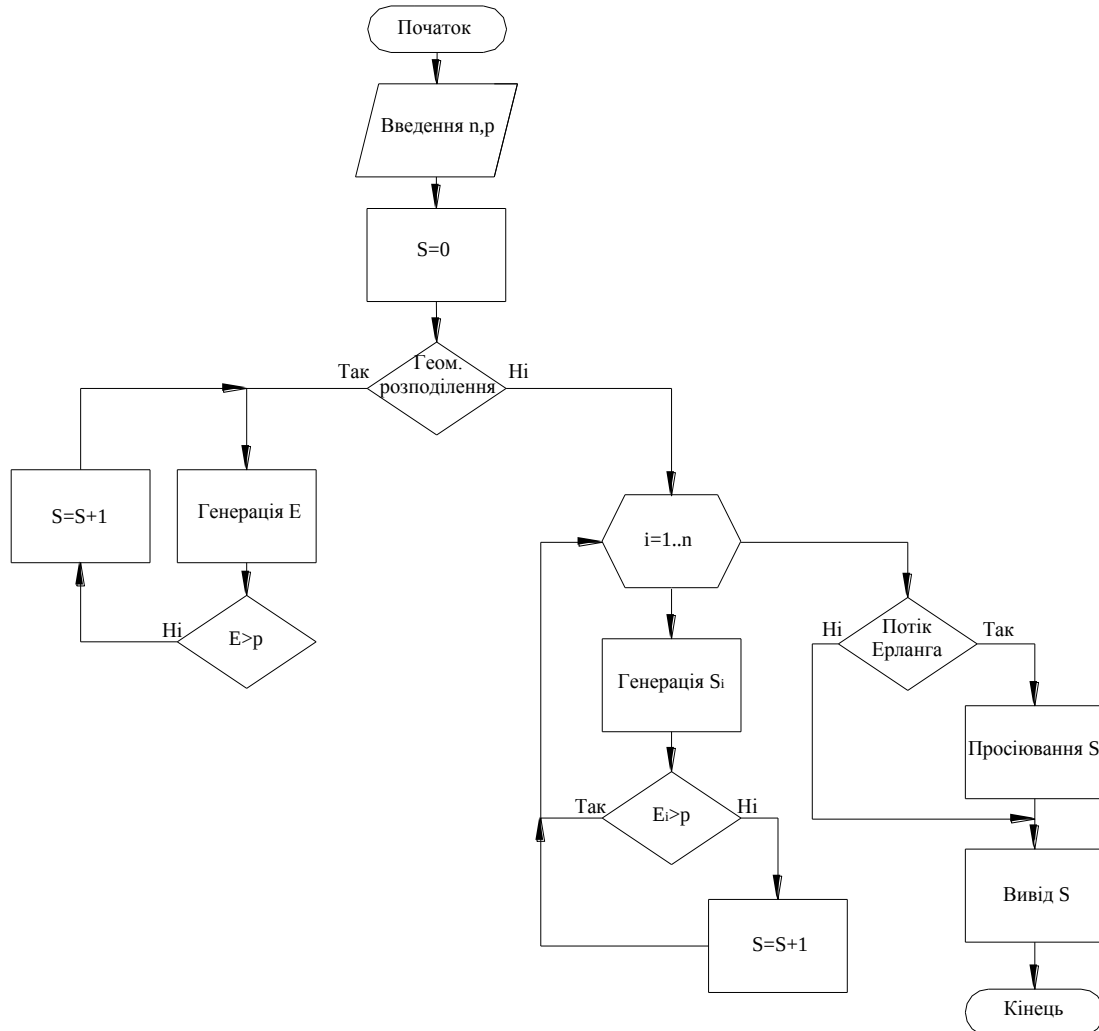


Рис. 3.15. Блок-схема алгоритму генерації випадкових значень для різних законів розподілень

В розглянутому випадку зміна стану системи відбувається шляхом включення або відключення лише одного генератора, тобто, наприклад, якщо працює два генератори, то система може перейти або в стан з одним працюючим генератором, або в стан з трьома паралельно працюючими генераторами, однак аналіз програми навантаження показує, що при працюючому одному генераторі, при запуску споживачів можлива ситуація,

коли сумарна потужність споживачів, що підключається, буде більшою за сумарну потужність двох генераторів. Тому система зі стану з одним працюючим генератором в K -момент може перейти в стан з трьома працюючими генераторами в $(K+1)$ -момент і навпаки, аналогічно ситуація можлива і для стану, коли жоден з генераторів не працює, однак для забезпечення споживачів електроенергією необхідна робота відразу двох генераторів (перехід з Q_0 в Q_2).

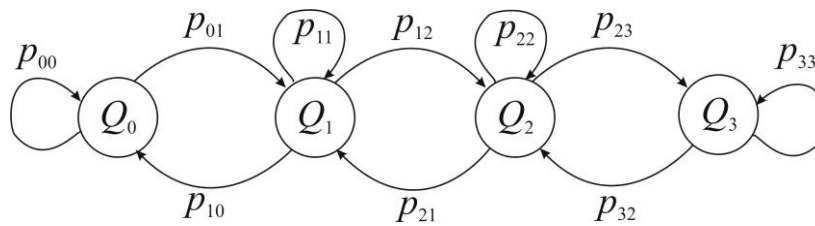


Рис. 3.16. Граф станів системи

На рис. 3.16 позначено: Q_0 – жоден з генераторів не працює, сумарна потужність споживачів дорівнює 0; Q_1 – працює один генератор, сумарна потужність споживачів не більше 250 кВт; Q_2 – працює два генератори, сумарна потужність споживачів не більше 500 кВт; Q_3 – працює три генератори, сумарна потужність споживачів не більше 750 кВт; $\{Q_0, Q_1, Q_2, Q_3\}$ – можливі стани системи.

В загальному вигляді матриця перехідних вірогідностей має вигляд:

$$|P_{ij}| = \begin{vmatrix} P_{00} & P_{01} & P_{02} & P_{03} \\ P_{10} & P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{20} & P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{30} & P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{vmatrix},$$

$$\sum_{j=0}^n p_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, n}.$$

Крім того, ланцюг Маркова характеризується вектором вірогідностей станів:

$$S(t) = \{S_0(t), S_1(t), S_2(t), S_3(t)\},$$

який показує вірогідність $S_i(t)$ знаходження системи в стані Q_i :

$$\sum_{i=1}^n S_i(t) = 1$$

Для автономної електроенергетичної системи, що складається з трьох генераторів, матриця перехідних вірогідностей має вигляд:

$$[P_{ij}] = \begin{vmatrix} 0,05 & 0,95 & 0 & 0 \\ 0,1 & 0,7 & 0,2 & 0 \\ 0 & 0,6 & 0,3 & 0,1 \\ 0 & 0 & 0,9 & 0,1 \end{vmatrix}$$

Рівняння для визначення стаціонарних вірогідностей має вигляд:

$$\begin{cases} S_0 = p_{00}S_0 + p_{10}S_1 \\ S_1 = p_{01}S_0 + p_{11}S_1 + p_{21}S_2 \\ S_2 = p_{12}S_1 + p_{22}S_2 + p_{32}S_3 \\ S_3 = p_{23}S_2 + p_{33}S_3 \end{cases}$$

Для установленого режиму складемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} S_0 = 0,05S_0 + 0,1S_1 \\ S_1 = 0,95S_0 + 0,7S_1 + 0,6S_2 \\ S_2 = 0,2S_1 + 0,3S_2 + 0,9S_3 \\ S_3 = 0,1S_2 + 0,1S_3 \end{cases}$$

Рішення цієї системи рівнянь дозволяє визначити вірогідності знаходження АЕЕС в кожному зі станів. На рис. 3.17 представлений граф станів системи для випадку, коли одночасно (у випадку дефіциту потужності для живлення споживачів) можуть бути включені в роботу не один, а два генератори.

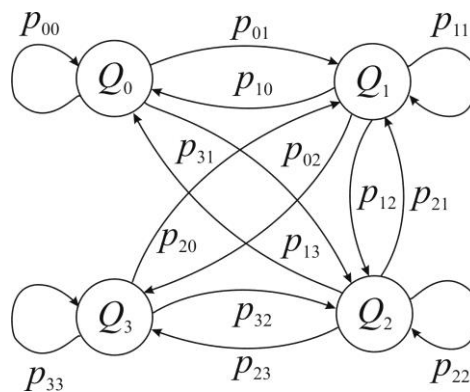


Рис. 3.17. Граф станів системи

Для такого випадку система рівнянь стаціонарних вірогідностей матиме вигляд:

$$\begin{cases} S_0 = p_{00}S_0 + p_{10}S_1 + p_{20}S_2 + p_{30}S_3 \\ S_1 = p_{01}S_0 + p_{11}S_1 + p_{21}S_2 + p_{31}S_3 \\ S_2 = p_{02}S_0 + p_{12}S_1 + p_{22}S_2 + p_{32}S_3 \\ S_3 = p_{03}S_0 + p_{13}S_1 + p_{23}S_2 + p_{33}S_3 \end{cases}$$

Матриця перехідних вірогідностей матиме вигляд:

$$\begin{bmatrix} P_{ij} \end{bmatrix} = \begin{vmatrix} 0,05 & 0,9 & 0,05 & 0 \\ 0,1 & 0,6 & 0,2 & 0 \\ 0,05 & 0,6 & 0,25 & 0,1 \\ 0 & 0,2 & 0,7 & 0,1 \end{vmatrix}$$

Методика статистичного дослідження сплесків потужності в автономних електростанціях, яка буде розглянута в наступному параграфі, включає автоматизацію обробки результатів спостереження за споживанням електроенергії шляхом розробки програмних модулів автоматичного виводу графіків та параметрів режиму роботи електростанції.

3.5. Методика статистичного дослідження сплесків потужності в АЕЕС

Статистичне дослідження числа сплесків та провалів потужності в АЕЕС включає:

- 1) виявлення причин, що впливають на появу сплесків та провалів потужності (і як наслідок провалів напруги) в АЕЕС, що перебувають в експлуатації;
- 2) визначення статистичної функції розподілу імовірності $F(x)$;
- 3) встановлення закону розподілу ймовірностей провалів напруги;
- 4) визначення характеристик випадкової величини провалів напруги (математичного очікування та дисперсії);
- 5) визначення сумарної тривалості провалів за певний період.

Перераховані дані необхідні для розробки заходів щодо зниження (виключення) числа провалів напруги в АЕЕС; синтезу структури АЕЕС із

захистом від провалів напруги, що відповідає вимогам структурної надійності системи і вимогам безперебійності електропостачання споживачів.

Кожен споживач електроенергії характеризується своєю діаграмою роботи, яка в багатьох випадках є незалежною від режимів роботи інших споживачів. Для оцінки характеру зміни навантаження електростанції актуальним є прогнозування діаграми навантаження споживачів. Статистичний аналіз діаграми навантаження виконаний на прикладі електроенергетичної системи траулера «Находка».

Порядок вирішення перерахованих взаємопов'язаних задач на основі відомих статистичних підходів демонструє рис. 3.18.



Рис. 3.18. Загальний порядок проведення дослідження

Статистичне дослідження має на меті встановлення закону розподілу і характеристик сплесків і провалів потужності (напруги) за певний період часу.

Для встановлення кількості провалів напруги, що відповідають включенням і відключенням навантаження, застосовується відомий метод збору статистичних даних, заснований на обробці спостережень за подіями, що призводять до провалів напруги. Отримані таким шляхом данні необхідні для визначення емпіричного (статистичного) розподілу випадкової величини (провалів).

Дискретне розподілення вважається теоретично заданим, якщо відомі всі можливі значення x_i , що приймає випадкова величина, та вірогідності $p(x_i)$ для кожної події $X = x_i$, за умови:

$$\sum_i p(x_i) = 1.$$

При малій кількості дослідів можуть бути знайдені приблизні значення числових характеристик розподілення.

Разом з тим згладжування статистичної кривої розподілу для представлення її за допомогою аналітичних залежностей і перетворення її до вигляду теоретичного розподілу випадкової величини забезпечується попереднім вибором одного із законів розподілу.

Для опису дискретних випадкових величин можуть бути використані біноміальний закон розподілення:

$$P(x) = C_n^x p^x q^{n-x} = \frac{n!}{x!(n-x)!} p^x q^{n-x}, \quad (3.1)$$

де C_n^x – кількість сполучень з n по x , $n=0, 1, 2, \dots$ – цілі числа,

або закон розподілення Пуассона:

$$P_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a}, \quad (3.2)$$

де $m=0, 1, 2, \dots$ – цілі числа;

a – математичне очікування величини X (провалів напруги).

Закон Пуассона є граничним для біноміального розподілу при великій кількості дослідів і малій ймовірності подій.

Знаючи розподілення вірогідностей провалів, потрібно визначити математичне очікування провалів

$$M[X] = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x) p_i, \quad (3.3)$$

дисперсію провалів

$$D[X] = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 p_i \quad (3.4)$$

середньоквадратичне відхилення провалів

$$\sigma[X] = \sqrt{D[X]}. \quad (3.5)$$

Для випадкової величини, розподіленої за законом Пуассона, дисперсія дорівнює її математичному очікуванню. Для цього з експериментальних даних визначають $M[X]$ та $D[X]$, і якщо їхні значення близькі, то можна зробити висновок на користь гіпотези про пуассонівський розподіл.

Одержавши значення $M[X]$ та $\sigma[X]$, можна встановити статистичну величину провалів напруги на інтервалі тривалістю T , необхідну для визначення сумарної тривалості провалів:

$$Y = M[X] + k\sigma[X],$$

де k – коефіцієнт, характерний для вибраного розподілу (від 0,5 до 3). Ця величина потрібна в подальшому для визначення загальної тривалості провалів напруги.

Для АЕЕС тривалості провалів напруги $\Delta t_{\Pi}'$ залежать від швидкодії засобів захисту, а також часу запуску і прийому навантаження резервними джерелами живлення $\Delta t_{\Pi}''$, наприклад, резервними дизель-генераторними агрегатами:

$$\Delta t_{\Pi}' = t_{p.z} + t_{вим} + t_{св},$$

$$\Delta t_{\Pi}'' = t_{p.z} + t_{вим} + t_{p.дж},$$

де $t_{p.z}$ – час дії релейного захисту; $t_{вим}$ – час вимкнення комутаційного апарату; $t_{св}$ – час вмикання вимикача секції; $t_{p.дж}$ – час запуску та приймання навантаження резервним джерелом живлення.

Сумарну тривалість провалів напруги в АЕЕС можна представити виразом:

$$\sum \Delta t_{\Pi} = (M[X] + k\sigma[X])(\Delta t_{\Pi}' + \Delta t_{\Pi}'').$$

Маючи такі розрахункові характеристики, можна вжити заходів по забезпеченню безперебійності електропостачання шляхом підвищення швидкодії засобів захисту, застосування резервних джерел електропостачання, джерел безперебійного живлення або спеціальних пристроїв – споживачів від короткочасних порушень електропостачання.

Методика статистичного дослідження сплесків потужності в автономних електростанціях включає автоматизацію обробки результатів спостереження за споживанням електроенергії шляхом розробки програмних модулів автоматичного виводу графіків та параметрів режиму роботи електростанції. На рис. 3.19 представлена блок-схема алгоритму програми, що реалізує обчислення виразів (3.3) – (3.5).



Рис. 3.19. Блок-схема алгоритму програми

На рис. 3.20 представлений інтерфейс програми обробки даних про споживану потужність та розрахунку статистичних параметрів.

Програма дозволяє визначити моменти часу та значення максимального і мінімального навантаження, розрахувати середнє значення потужності, середньоквадратичне відхилення, значення максимальної зміни потужності навантаження, середню величину сплесків та провалів. Крім того є можливість отримати вказані характеристики за вказаний період. В залежності від споживаної потужності вибирається режим роботи електростанції та визначається відсоток завантаження генераторів.

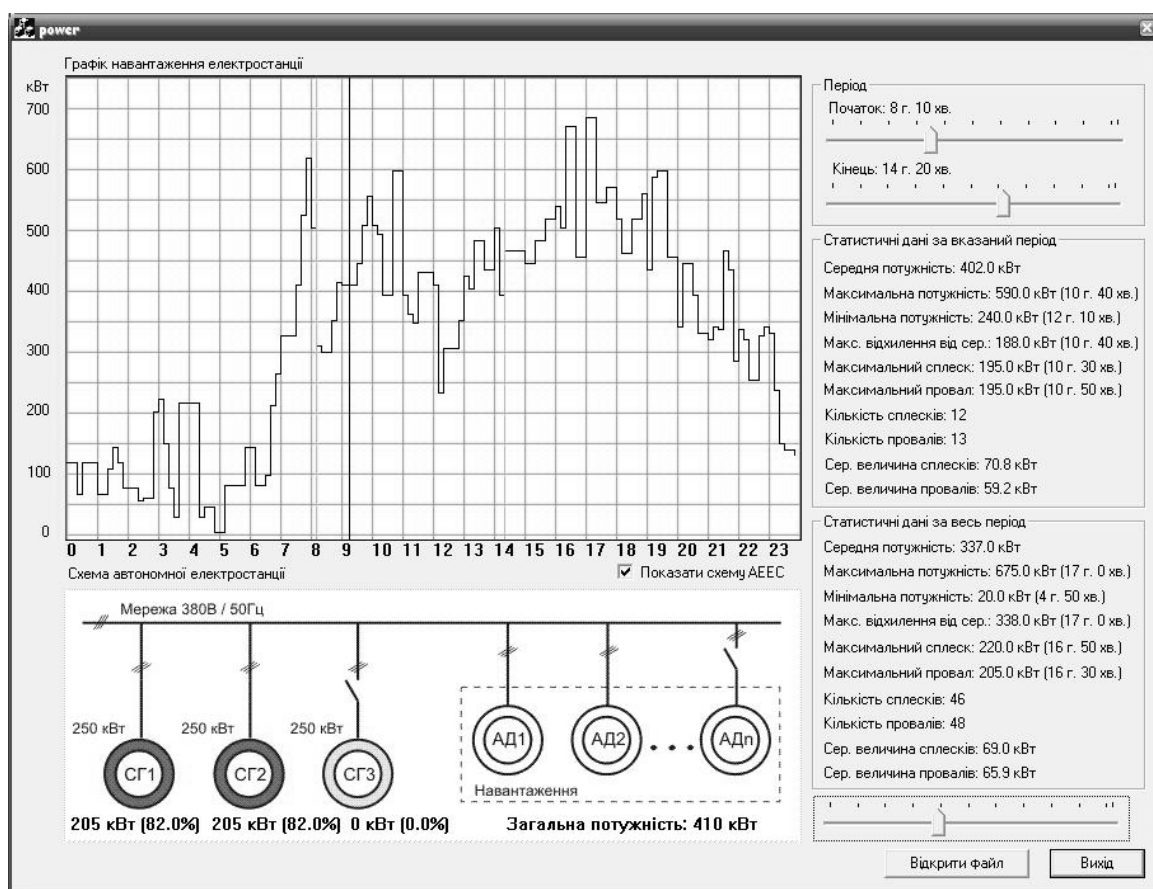


Рис. 3.20. Інтерфейс програми статистичного аналізу

Значення емпіричної функції розподілення $F(x)$ та розподілення частот випадкової величини X провалів представлені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Розподілення вірогідностей провалів

№ Інтервалу спостереження	Середня кількість провалів за період	Частість (вірогідність) провалів	Кумулятивна емпірична функція $F(x)$
1	5	0,11	0,11
2	4	0,09	0,20
3	9	0,20	0,40
4	5	0,11	0,51
5	6	0,13	0,64
6	6	0,13	0,78
7	5	0,11	0,89
8	6	0,13	1,00
Загалом	46	1,00	–

По результатам розрахунку емпіричної функції (табл. 3.2) можна побудувати графік її розподілення (рис. 3.21).

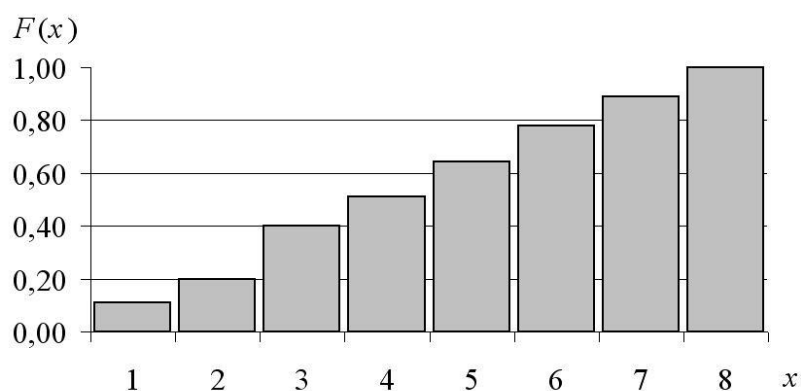


Рис. 3.21 Статистична функція розподілення вірогідностей появи провалів напруги

Для визначення тривалості роботи електростанції в кожному з режимів зручно використовувати гістограму, яка представлена на рис. 3.22.

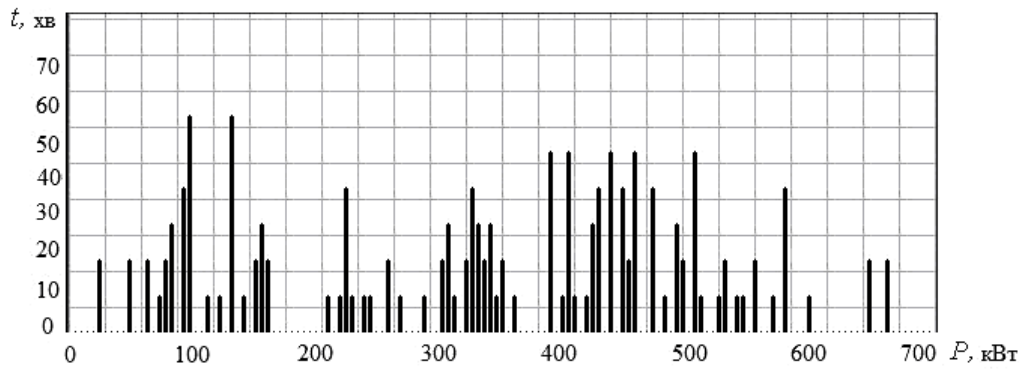


Рис. 3.22. Гістограма споживання електроенергії навантаженням

Для розробки засобів захисту від провалів напруги (ПН) і запобіганню їхніх наслідків необхідно мати прогноз ПН для конкретної АЕЕС. Прогнози можна робити по наявній статистиці або розрахунків для конкретної мережі. Для реєстрації глибини і тривалості ПН необхідно організувати вимірювання спеціальними приладами, які дадуть достовірні прогнози.

3.6. Дослідження провалів і сплесків напруги в АЕЕС

Параметри провалів і формули для їхнього визначення наведені на рис. 3.23, з яких тривалість провалу напруги віднесена до основних показників якості електроенергії, а глибина й частість появи провалу – до допоміжних [17].



Рис. 3.23. Параметри провалів напруги

На рисунку використані наступні позначення: $U_{ном}$ – номінальне значення напруги, U_{min} – мінімальне значення напруги при пуску асинхронного двигуна, t_k – початковий момент часу комутації навантаження, t_H – значення часу, при якому напруга відновлюється до номінального, M – кількість комутацій навантаження, що викликають провали напруги.

Оскільки за своїм характером пусковий струм асинхронного короткозамкненого електродвигуна індуктивний (коефіцієнт потужності при пуску дорівнює 0,15 – 0,20), то він впливає на синхронний генератор і виконує розмагнічуючу дію, що не компенсується в ряді випадків (при пуску потужного асинхронного короткозамкненого електродвигуна).

Відповідно до ГОСТ 23875–88 «Качество электрической энергии. Термины и определения» провал напруги (ПН) – це «раптове значне зниження напруги в системі електропостачання з наступним його відновленням»; а за ГОСТ 13109–97 «Провал напруги – раптове зниження напруги в точці електричної мережі нижче $0,9U_{ном}$, за яким настає відновлення напруги до початкового або близького до нього рівня через проміжок часу від десяти мілісекунд до декількох десятків секунд». Таким чином, ПН – це зниження напруги в точці електричної мережі, за яким настає відновлення напруги до початкового або близького до нього рівня через проміжок часу від декількох періодів до декількох десятків секунд.

Глибина провалу – це «величина, що дорівнює різниці між номінальним, або базовим значенням напруги, й найменшим діючим значенням під час його провалу» (ДСТУ 23875–88).

Тривалість провалу – це «інтервал часу між початковим моментом провалу напруги й моментом відновлення напруги до початкового, або близького до нього рівня» (ДСТУ 13109–97).

«Частість появи провалів напруги – число провалів напруги певної глибини й тривалості за певний проміжок часу, відносно загального числа провалів за цей же проміжок часу» (ДСТУ 23875–88).

Нерегулярні сплески – провали напруг мережі доцільно описати на основі теорії викидів випадкових процесів. Це обумовлено тим, що «чутливість» електронної апаратури до зовнішніх впливів проявляється в основному, при їхньому перевищенні заданого граничного рівня U_{Π} .

Вихідними даними при практичному рішенні завдання є середня частота викидів f_{CB} за рівень U_{Π} впродовж певного інтервалу часу, середня кількість викидів N_{CB} за час T_B , середня тривалість викидів τ_{CB} , ймовірність перевищення випадковим процесом рівня U_{Π} ($P(u > U_{\Pi})$), ймовірність викиду в інтервалі Δt .

Однак визначення параметрів викидів можливо лише для процесів, для яких їхні кореляційні функції є такими, що підлягають операції диференціювання, наприклад, функцією виду:

$$R(\tau) = \sigma_U^2 \exp(-\alpha_U |\tau|) (1 + \alpha_U |\tau|) \quad (3.6)$$

Таким чином, шуканими є параметри кореляційної функції (1.24), що описує випадковий процес, і рівень завдання U_{Π} .

Середню частоту викидів випадкового процесу можна визначити по формулі [29]:

$$f_{CB} = \frac{\alpha_U}{\sqrt{2\pi}} \varphi(U_{\Pi}), \quad (3.7)$$

де

$$\varphi(U_i) = \exp\left(-\frac{U_i^2}{2}\right)$$

Таким чином, задаючись припустимою нечутливістю систем автоматики АЕЕС, а також, знаючи експериментально зняті параметри коефіцієнта кореляційного зв'язку α_U , можемо визначити середню частоту викидів за заданий граничний рівень U_{Π} .

Середня тривалість викидів буде пов'язана із середньою частотою викидів співвідношенням:

$$\tau_C = \frac{P(u > U_{\Pi})}{f_{CB}},$$

де ймовірність перевищення випадковим процесом рівня U_{II} визначається по відомій формулі:

$$P(u > U_{II}) = 1 - \int_{-\infty}^{U_{II}} p(u) du = 1 - \Phi(U_{II}),$$

де $p(u)$ – щільність імовірності розподілу напруг АЕЕС.

Середня кількість викидів за інтервал T_B знаходиться по формулі:

$$N_B = \frac{T_B}{f_{CB}}.$$

У такий спосіб отримані результати дозволяють як на етапі проектування, так й у процесі адаптації спрогнозувати всі необхідні параметри перешкод, які можуть впливати на електронну апаратуру, а також визначатися з доцільністю прийняття більш жорстких заходів по підвищенню стабільності параметрів автономної мережі, і вирішувати необхідні оптимізаційні задачі відносно регуляторів систем, відповідальних за якість напруги мережі.

Для розробки захисту від ПН і запобігання їхніх наслідків необхідно мати прогноз ПН для конкретної АЕЕС. Прогнози можна робити по наявній статистиці, одержуваної на основі багаторічних спостережень, або розрахунків для конкретної мережі. Для реєстрації глибини й тривалості ПН необхідно організувати тривалі виміри спеціальними приладами, які дадуть тим більш достовірні прогнози, чим ширше масштаб охопленої вимірами мережі.

Для розрахунку характеристик ПН необхідно враховувати реальну структуру й конфігурацію АЕЕС та режим роботи її електроустаткування, підключеного до шин. Модель досліджуваної АЕЕС повинна відображати її так, щоб виконані розрахунки дали можливість визначати не тільки напруги, струми, потужності у вузлах, що цікавлять, але й відхилення цих параметрів від нормальних сталих значень.

Для кожного елемента АЕЕС вибирається режим роботи системи, при якому даний елемент перебуває в найбільш важких умовах при пуску

потужного асинхронного двигуна. Враховуються всі генератори, які можуть працювати одночасно, електромашинні перетворювачі, всі синхронні й асинхронні електродвигуни, що працюють у відповідних режимах.

Опори елементів розрахункової схеми можуть бути виражені як в абсолютних, так й у відносних одиницях.

Опори генераторів, двигунів (у ряді випадків інших елементів схеми) задаються розроблювачами у відносних одиницях (в.о.) при номінальних умовах даного елемента. Значення цих параметрів в абсолютних одиницях можуть бути отримані по формулі:

$$A = A_* Z_N$$

де A – параметр в абсолютних одиницях; A_* – той же параметр, але у в.о.; Z_N – номінальний опір, мОм, обчислюється по формулі:

$$Z_N = \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N},$$

де U_N – номінальна напруга, В; S_N – повна номінальна потужність, кВА; I_N – номінальний струм, А.

Розрахунки перехідних процесів виконуються у відносних одиницях. Із цією метою параметри розглянутої схеми приводяться до єдиних базисних умов.

За базисні величини рекомендується приймати наступні:

- базисна потужність, що дорівнює сумі потужностей генераторів розглянутої схеми (частини схеми), які живлять точки к.з.,

$$S_{\sigma} = S_{\sigma 1} + S_{\sigma 2} + \dots + S_{\sigma n};$$

- базисна напруга, дорівнює номінальній напрузі генераторів:

$$U_{\sigma} = U_N,$$

$$I_{\sigma} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3}U_{\sigma}},$$

$$Z_{\bar{o}} = \frac{U_{\bar{o}}^2}{S_{\bar{o}}} = \frac{U_{\bar{o}}}{\sqrt{3}I_{\bar{o}}}.$$

Обрані базисні одиниці служать для вирівнювання у в.о. всіх фізичних величин, як повних, так і складових (активних, реактивних та ін.). При обраних базисних умовах відносно Е.Р.С., напруга, струм, потужності й опори визначаються в такий спосіб:

$$E_{*\bar{o}} = \frac{E}{U_{\bar{o}}}, \quad U_{*\bar{o}} = \frac{U}{U_{\bar{o}}}, \quad I_{*\bar{o}} = \frac{I}{I_{\bar{o}}},$$

$$S_{*\bar{o}} = \frac{S}{S_{\bar{o}}}, \quad P_{*\bar{o}} = \frac{P}{S_{\bar{o}}}, \quad Z_{*\bar{o}} = \frac{Z}{Z_{\bar{o}}},$$

$$r_{*\bar{o}} = \frac{r}{r_{\bar{o}}}, \quad x_{*\bar{o}} = \frac{x}{x_{\bar{o}}},$$

де зірочка вказує, що відповідна величина виражена у в.о., а індекс “ $\bar{o}$ ” – що вона наведена до базисних умов; E , U , I , S , P , Z , r , x , – відповідно Е.Р.С., напруга, струм, повна й активна потужності, повний, активний й індуктивний опори в тих же абсолютних одиницях, що й відповідні базисні величини.

Переведення величин з відносних одиниць в іменовані виконується по формулах:

$$U = U_{*\bar{o}} U_{\bar{o}}, \quad E = E_{*\bar{o}} U_{\bar{o}},$$

$$S = S_{*\bar{o}} S_{\bar{o}}, \quad P = P_{*\bar{o}} S_{\bar{o}},$$

$$I = I_{*\bar{o}} I_{\bar{o}}, \quad Z = Z_{*\bar{o}} Z_{\bar{o}},$$

$$r = r_{*\bar{o}} r_{\bar{o}}, \quad x = x_{*\bar{o}} x_{\bar{o}}.$$

Для обраного розрахункового режиму на підставі принципової схеми АЕЕС складається однолінійна розрахункова схема.

У розрахункову схему включаються:

- джерела електроенергії, що працюють у розглянутому режимі;
- елементи установки, що зв'язують джерела електроенергії між собою й з аварійною ділянкою (силові трансформатори, реактори, комутаційно-захисна апаратура, ділянки кабельних трас);

- синхронні двигуни;
- асинхронне навантаження у вигляді одного або декількох еквівалентних двигунів або окремих двигунів великої потужності.

Потужність і номінальний струм еквівалентного двигуна $P_{\text{эд}}$ й $I_{\text{Nэд}}$ визначаються по таблиці навантажень як сума номінальних потужностей і номінальних струмів асинхронних двигунів, що працюють у розглянутому режимі. Еквівалентний двигун приєднується безпосередньо до шин ГРЩ.

На підставі розрахункової схеми складається схема заміщення. Для цього елементи схеми (генератори, трансформатори, двигуни, реактори, ділянки кабельних трас і протяжних шинопроводів) заміщуються активними й індуктивними опорами. Магнітно зв'язані ділянки системи замінюються еквівалентними електрично зв'язаними ланцюгами.

Синхронні генератори, синхронні й асинхронні двигуни в схемі заміщення враховуються своїми Е.Р.С., активними й індуктивними опорами.

Якщо схема повністю симетрична (однакові джерела, однакові опори і т.п.), або її частина має симетрію щодо деякої проміжної точки, її можна скласти по осі симетрії, тобто з'єднати точки рівного потенціалу. У цьому випадку потужність джерел або двигунів дорівнює сумі їхніх потужностей, а опори складаються паралельно. Електростанція містить три синхронних генератори потужністю 250 кВт кожний (рис. 3.24).

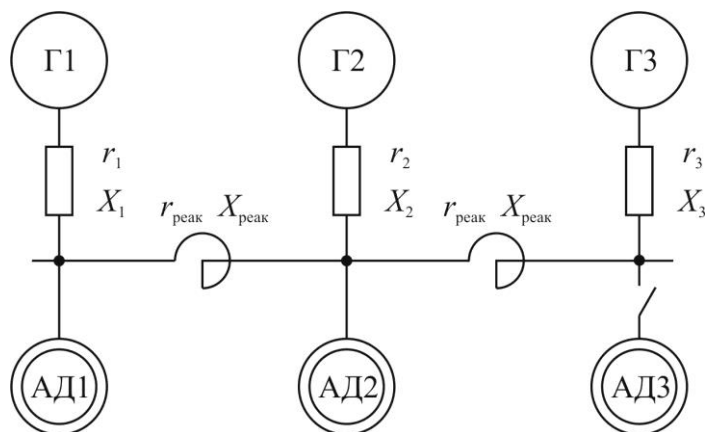


Рис. 3.24. Схема електроенергетичної системи

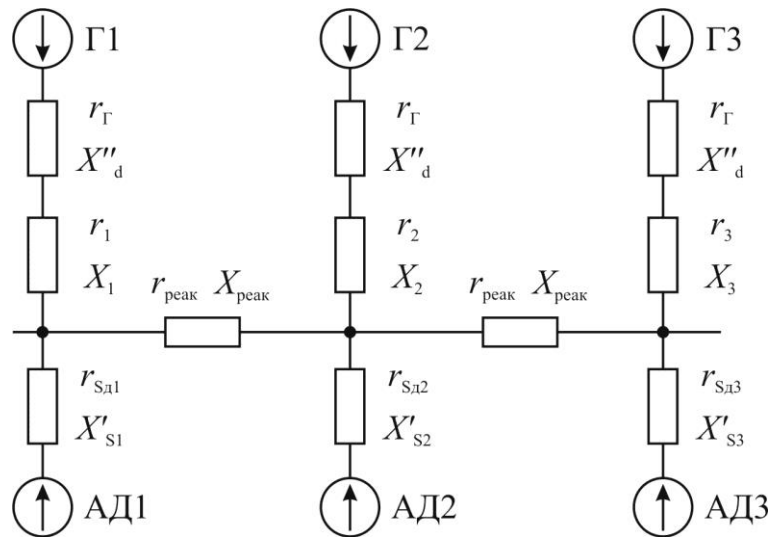


Рис. 3.25. Схема заміщення електроенергетичної системи

Перетворення схеми заміщення може виконуватися як в абсолютних, так і у відносних (базисних) одиницях.

У випадках, коли варто очікувати, що розрахункові значення пускових струмів будуть у межах припустимих, можна знехтувати відносно невеликими опорами автоматичних вимикачів, генераторних кабелів довжиною до 10–15 м, перехідними опорами контактів і т.п.

3.7. Прогнозування навантаження автономної електростанції з використанням штучних нейронних мереж

При управлінні автономними електроенергетичними системами одним із важливих інструментів для прийняття виважених управлінських рішень щодо планування режимів роботи АЕЕС є прогнозування електричного навантаження (ЕН) та електроспоживання (ЕС).

Прогнози режимів роботи АЕЕС використовуються для вирішення задач планування виробництва електроенергії, балансу потужності енергосистеми, створення графіків ремонту основного обладнання, розрахунку оптимальних режимів роботи електростанції. Кожен споживач електроенергії характеризується своєю діаграмою роботи, яка в багатьох випадках є незалежною від режимів роботи інших споживачів. Для оцінки

характеру зміни навантаження електростанції актуальним є прогнозування діаграми навантаження споживачів.

У задачах короткострокового прогнозування об'єктами прогнозу традиційно є сумарне добове електроспоживання, добові максимуми та мінімуми електричного навантаження [119, 120]. Похибки прогнозування зазначених величин приводять до додаткових витрат (при завищених прогнозах) або до техніко – економічних проблем, що обумовлені дефіцитом генеруючих потужностей. Таким чином, розробка нових та вдосконалення існуючих методів короткострокового прогнозування електроспоживання та їх практична реалізація залишається актуальною задачею, розв'язання якої сприятиме підвищенню надійності та економічності режимів роботи АЕЕС, зменшенню виникнення аварійних ситуацій внаслідок нестачі потужності.

Для розробки захисту від провалів напруги (ПН) і запобіганню їхніх наслідків необхідно мати прогноз ПН для конкретної АЕЕС. Прогнози можна робити по наявній статистиці, одержуваної на основі спостережень, або розрахунків для конкретної мережі [107, 109, 115].

На рис. 3.26 представлена діаграма споживання потужності протягом однієї доби в автономній електроенергетичній установці (траулер «Находка»).

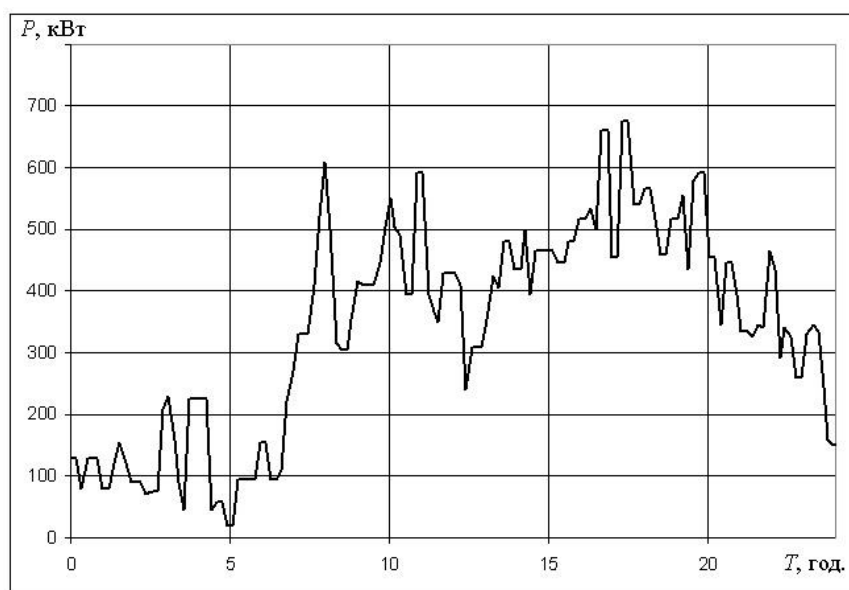


Рис. 3.26. Діаграма споживання потужності в АЕЕС

Правила перетворення сигналів визначаються математичною моделлю нейрона, що може бути записана у формі наступних відомих аналітичних виразів:

$$\begin{aligned} s &= \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i + b, \\ y &= f(s), \end{aligned} \tag{3.8}$$

де w_i – вага синапса ($i \in \{1, 2, \dots, n\}$); b – значення зсуву; s – результат додавання; x_i – компонент вектора чи входу вхідного сигналу ($i \in \{1, 2, \dots, n\}$); y – вихідний сигнал нейрона; n – число входів нейрона; f – функція активації (передатна функція) нейрона, що представляє собою деяке нелінійне перетворення. У загальному випадку: $w_i, x_i, b \in \mathbb{R} (i \in \{1, 2, \dots, n\})$.

Процес побудови і використання нейро-мережових моделей складається з наступних етапів:

1. Вибір типу і структури нейронної мережі для розв'язку задачі прогнозування навантаження (синтез структури нейронної мережі).
2. Навчання нейронної мережі (визначення чисельних значень ваг кожного з нейронів) на основі наявної інформації про навантаження електростанцій протягом доби.
3. Перевірка нейронної мережі на основі використання деякого контрольного приклада (необов'язковий етап).
4. Використання навченої нейронної мережі для прогнозування навантаження в автономній електроенергетичній системі.

В даний час запропоновані різні схеми класифікації нейронних мереж і відповідні алгоритми їх навчання. Одним з найпоширеніших алгоритмів навчання є так званий алгоритм зворотного поширення помилки (back propagation). Цей алгоритм являє собою ітеративний градієнтний алгоритм мінімізації середньоквадратичного відхилення значень виходу від бажаних значень (мінімізації помилки) у багатошарових нейронних мережах.

Для прогнозування навантаження в АЕЕС використовується гібридна мережа. Гібридна мережа являє собою багатошарову нейронну мережу

спеціальної структури без зворотних зв'язків, у якій використовуються звичайні (не нечіткі) сигнали, ваги і функції активації, а виконання операції підсумовування засновано на використанні фіксованої Т-норми. При цьому значення входів, виходів і ваг гібридної нейронної мережі являють собою дійсні числа з відрізка $[0, 1]$.

Основна ідея, покладена в основу моделі гібридних мереж, полягає в тому, щоб використовувати існуючу вибірку даних (значення споживаної потужності АЕЕС в поточний момент часу) для визначення параметрів функцій належності, що найкраще відповідають деякій системі нечіткого виводу. При цьому для знаходження параметрів функцій належності використовуються відомі процедури навчання нейронних мереж.

У пакеті Fuzzy Logic Toolbox системи MATLAB гібридні мережі реалізовані у формі так званої адаптивної системи нейро-нечіткого виводу ANFIS. З одного боку, гібридна мережа ANFIS являє собою нейронну мережу з єдиним виходом і декількома входами, що являють собою нечіткі лінгвістичні змінні. При цьому терми входних лінгвістичних змінних описуються стандартними для системи MATLAB функціями належності, а терми вихідної змінної представляються лінійною чи постійною функцією належності.

З іншого боку, гібридна мережа ANFIS являє собою систему нечіткого виводу FIS типу Сугено нульового чи першого порядку, у якій кожне з правил нечітких продукцій має постійну вагу, рівну 1. У пакеті Fuzzy Logic Toolbox системи MATLAB гібридні мережі реалізовані у формі адаптивних систем нейро-нечіткого виводу ANFIS.

Після завантаження файлу із навчальними даними в редактор ANFIS у робочому вікні редактора буде зображений графік, ордината якого відображає значення потужності, що споживається (рис. 3.27). Вхідні дані представляють собою звичайну числову матрицю розмірності $m \times (n+1)$, у якій кількість рядків m відповідає обсягу вибірки, перші n стовпців –

значенням вхідних змінних моделі, а останній стовпчик – значенню вихідної змінної.

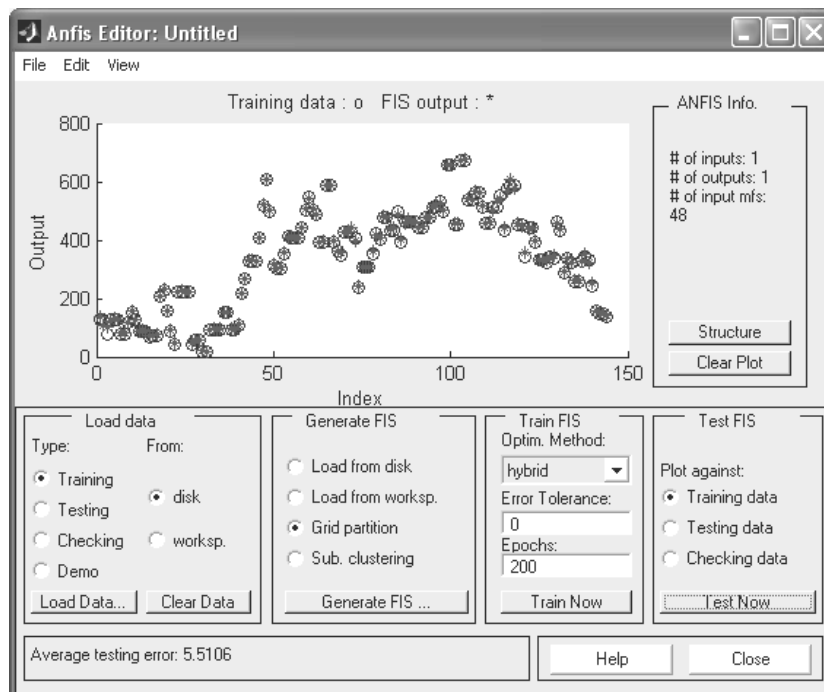


Рис. 3.27. Вікно редактора ANFIS після завантаження даних

На рис. 3.28 представлена структура отриманої мережі.

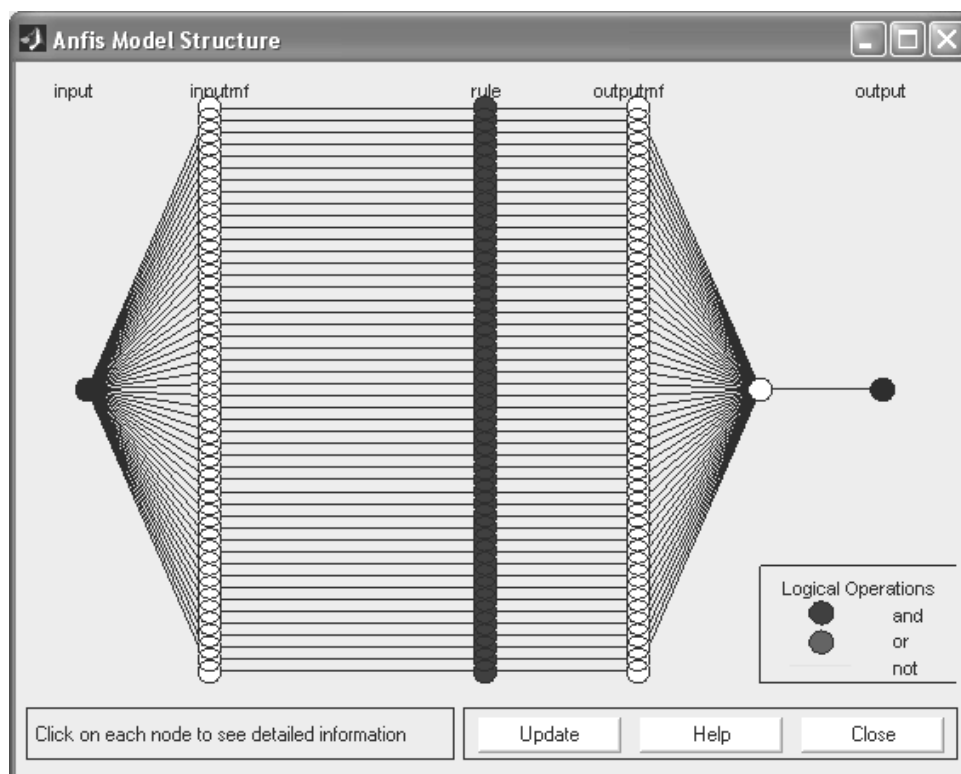


Рис. 3.28. Структура отриманої нейронної мережі для вирішення задачі прогнозування навантаження в АЕЕС

Аналіз адекватності побудованої моделі можна виконати за допомогою перегляду правил відповідної системи нечіткого виводу. Точність одержуваних результатів пропорційно залежить від обсягу навчальної вибірки.

Додаткове налаштування моделі може бути виконане декількома можливими способами. Найбільш прийнятними з них представляються наступні.

1. Підготовка і завантаження більшого за обсягом вибірки файлу з навчальними вхідними даними.

2. Підготовка і завантаження додаткового файлу з перевірочними вхідними даними, сформованими для пар значень розглянутої математичної функції, відсутніх у вибірці навчальних даних.

3. Редагування типів і значень параметрів функцій належності термів вхідної і вихідної змінних за допомогою редактора функцій належності системи MATLAB.

У випадку недостатньої інформації навчальних даних використання гібридних мереж може виявитися взагалі недоцільним, оскільки одержати адекватну нечітку модель, а значить – і точний прогноз значень вихідної змінної не представляється можливим.

Висновки

1. Розроблені моделі марківських процесів, які представлені у вигляді графів та описують процеси зміни станів АЕЕС. Використовуючи метод статистичного моделювання, було проімітовано роботу АЕЕС з трьома генераторами. Отримана часова діаграма, яка показує, яким чином відбувається процес зміни стану енергосистеми.

2. Кожен споживач електроенергії характеризується своєю діаграмою роботи, яка не залежить від режимів роботи інших споживачів. Процеси комутації навантаження в електроенергетичній системі мають випадковий характер.

3. Розроблені алгоритми імітаційного моделювання процесу комутації навантаження в АЕЕС реалізовані у вигляді програми. В результаті імітаційного моделювання були отримані індивідуальні діаграми роботи споживачів. В добовому графіку навантаження АЕЕС є екстремуми, обумовлені підключенням навантаження в експлуатаційних режимах, виявлення яких необхідне для попередження несприятливих умов роботи електроприймачів.

4. У реальній судновій (автономній) електростанції мають місце значні сплески й провали напруг і частоти, а також їх відхилення, які виходять за встановлені Регістром діапазони. У більшості випадків вони обумовлені комутацією навантажень і носять випадковий характер, та істотно впливають на роботу електронної й навігаційної апаратури. Параметри сплесків – провалів і відхилення напруги й частоти в значній мірі залежать від стабілізуючих властивостей систем керування силовими агрегатами, а також від динамічних властивостей останніх.

5. Отримано результати, необхідні для обґрунтування методики статистичного дослідження провалів напруги з урахуванням режимних особливостей електроенергетичних систем. Методика статистичного аналізу провалів напруги з урахуванням режимних особливостей розглянутої електростанції є необхідним інструментом для розробки технічних пропозицій по створенню АЕЕС із захистом від провалів напруги і вибору відповідних критеріїв їхньої оцінки.

6. Чим більш рівномірний графік навантаження, тим краще використання силових агрегатів протягом доби, що призводить до зменшення витрат палива та зменшення вартості вироблення електроенергії. Розроблені програмні засоби дозволяють виконати корегування діаграм роботи окремих споживачів з метою мінімізації відхилень часових навантажень від максимального навантаження.

РОЗДІЛ 4

СИНТЕЗ ЕФЕКТИВНИХ СТРУКТУР ТА ОПТИМАЛЬНИХ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК З ГДГА

4.1. Підвищення точності розподілу активної потужності шляхом контролю положення роторів ГДГА

При побудові автономних електростанцій з використанням ГДГА, що мають значну нестабільність обертів, а також при їх роботі на істотно нелінійне навантаження, що має місце, наприклад, в електростанціях плавбурустановок з потужними тиристорними перетворювачами, виникають значні проблеми паралельної роботи декількох синхронних генераторів. Їх вирішення можливе на принципово нових підходах до вимірювання робочих параметрів генеруючих агрегатів, проте практичне впровадження нових методів вимагає попереднього ретельного модельного експерименту. Датчик частоти обертання ГДГА, заснованого на використанні ефекту Холла, дозволяє з високим ступенем точності визначати не тільки частоту обертання, а з урахуванням додаткового датчика контролювати з цією ж точністю положення колінчастого вала двигуна. Це відкриває можливості на основі сучасних мікропроцесорних засобів контролювати не тільки різницю обертів двигунів, а й різницю кутових положень колінчастих валів, а також швидкості їх відносної зміни.

Контролювати кутові положення роторів синхронних генераторів дуже важливо при їх паралельній роботі для розподілу активної потужності, при синхронізації роботи агрегатів, при різких змінах навантаження, або використанні різних за потужністю та типом ГДГА. Обумовлено це тим, що при появі ударних моментів і різких змінах частоти обертання ротора відбувається збільшення зсуву фаз в системі регулювання ГД. При цьому загальний фазовий зсув між відхиленням швидкості й крутним моментом на валу (вхід-вихід системи розподілу активної потужності) перевищує

допустимий запас стійкості по фазі й ГДГА переходить в режим автоколивань.

Відоме явище [90, 91], яке полягає в тому, що при відносних коливаннях роторів в протифазі відбуваються коливання кутів повороту роторів агрегатів відносно синхронної швидкості. Тому обертовий механічний момент дизеля, як і електромагнітний момент синхронного генератора, представляється у вигляді двох складових кута повороту ротора відносно синхронної швидкості, і синхронізуючої, пропорційної відхиленню кута.

Для ідеальної системи регулювання ГД, в якій відсутні інерційні ланки і чисте запізнення, а регулювання здійснюється лише за відхиленням швидкості, механічний момент є чисто демпферним, пропорційним похідній кута. При наявності в системі запізнювання за часом і зсуву по фазі, в механічному моменті з'являється синхронізуюча складова, що примушує момент змінювати свій знак, тобто проходити нульове положення через половину періоду коливань. При цьому демпферний момент починає розгойдуватися і система виходить на межу стійкості.

Таким чином, для вирішення задачі виключення можливих автоколивань та підвищення стійкості системи, перш за все необхідно знайти спосіб збільшення запасу стійкості як з урахуванням постійного запізнювання Z_3 , так і з урахуванням кута зсуву по фазі Ψ_3 .

Відомо [90], що електромагнітна потужність генератора P , при його роботі паралельно з іншими, є функцією Е.Р.С. E_{Q1} і E_{Q2} обох генераторів, частоти мережі f_c , кута між роторами δ_{12} , та опору навантаження:

$$P = f(f_c, E_{Q1}, E_{Q2}, \delta_{12}, P\delta_{12}, Z_H). \quad (4.1)$$

Для розглянутої задачі розподілу активної потужності, вважаючи навантаження і збудження генераторів незмінними, лінеаризуємо рівняння (4.1):

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial f_c} \Delta f_c + \frac{\partial P}{\partial \delta_{12}} \Delta \delta_{12} + \frac{\partial P}{\partial (P \delta_{12})} \Delta (P \delta_{12}), \quad (4.2)$$

де перша складова враховує зміну електромагнітної потужності, друга – зміну електромагнітної потужності в залежності від кута неузгодженості між роторами. Ця потужність є синхронізуючою і обумовлюється нерівномірністю її розподілу між генераторами.

Третя складова враховує синхронну потужність, що створюється демпферними поперечними контурами паралельно працюючих генераторів [91].

Тому, в загальному випадку, відповідно до діючих на вал моментів (механічного, електромагнітного й інерційного) можуть бути виділені наступні шляхи вирішення задачі:

- підвищення стійкості за рахунок збільшення махових мас (інерційного моменту). Цей шлях неприйнятний з конструктивних особливостей;
- додатковий вплив на електромагнітний момент генератора шляхом зміни параметрів регулятора збудження. Цей шлях може погіршити показники якості електроенергії;
- вдосконалення автоматичних пристроїв розподілу навантаження. Вони орієнтовані на управління первинними двигунами, виходячи з пропорцій між активними складовими струмів генераторних агрегатів;
- додаткове регулювання первинних двигунів (дизелів) по похідній різниці активних навантажень працюючих генераторів, еквівалентній похідній кута неузгодженості їх роторів, а також по похідній відхилення частоти обертання ГД.

Розглянемо в якості прикладу підвищення стійкості паралельної роботи двох ГДГА. Основними показниками стійкості паралельної роботи є: коефіцієнт затухання коливань ротора ДГ:

$$\alpha = \frac{M_d}{2T_J}, \quad (4.3)$$

власна частота коливань:

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{M_c}}{T_J},$$

частота вільних коливань:

$$\omega_c = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2},$$

де M_d , M_c – відповідно питомі демпферні і синхронізуючі моменти, що створюються на роторі системою регулювання частоти обертання; T_J – інерційна постійна ДГ.

Розрахунок запасів стійкості режимів ДГ базується на відомому положенні теорії автоматичного управління [91] – при вільних затухаючих коливаннях вихідного параметра Δy системи з передавальною функцією $W(p)$ при впливі вхідного параметра Δx , вихідний параметр можна представити у вигляді:

$$\Delta y = \left\{ \operatorname{Re}[W(-\alpha + j\omega)] + \frac{\alpha}{\omega} y_m [W(-\alpha + j\omega)] \right\} \Delta x + y_m \left[W(-\alpha + j\omega) \frac{1}{\omega} \frac{d(\Delta x)}{dt} \right].$$

Для механічного моменту дизеля при коливаннях ротора

$$\Delta M = M(p) \Delta \delta,$$

де $M(p)$ – передавальна функція регулювання частоти обертів дизеля:

$$\Delta M = M_c \Delta \delta + M_{md} \left[\frac{d(\Delta \delta)}{dt} \right],$$

де

$$M_c = \operatorname{Re}[M(-\alpha + j\omega)] + \frac{\alpha}{\omega} y_m [M(-\alpha + j\omega)],$$

$$M_d = y_m [M(-\alpha + j\omega)] \frac{1}{\omega}.$$

Істотний вплив на стійкість спричиняють нелінійності, зокрема, постійне запізнювання, яке може бути враховано додатковою ланкою:

$$W_{п.3}(p) = e^{-\varepsilon s}.$$

Коливальний коефіцієнт передачі ланки:

$$W_{п.3}(-\alpha + j\omega) = e^{-\alpha \varepsilon} (\cos \omega \varepsilon - j \sin \omega \varepsilon).$$

Коефіцієнт самовирівнювання дизеля

$$K_c = - \left(\frac{\partial M_M}{\partial \omega_\Gamma} \right) \left(\frac{\omega}{M_{MN}} \right) \quad (4.4)$$

може бути врахований додатковим демпфуючим моментом:

$$M_{\text{мд}}^0 = K_c.$$

Для оцінки максимально можливого контурного коефіцієнту підсилення й забезпечення заданого запасу стійкості були розроблені методики розрахунку запасу стійкості режимів ДГ з додатковим регулюванням по похідній різниці активних навантажень і по похідній швидкості обертання ДГ.

Основні рівняння системи визначаються на основі динамічної моделі дизеля, а параметри обираються за результатами оптимізації налаштування ПІД-регулятора. Вони визначають передавальну функцію системи регулювання частоти обертання з урахуванням запізнювання:

$$W_{\text{п.з}}(P)M(P) = M(P)e^{-\varepsilon p}.$$

Кількісний коефіцієнт передачі системи отримується з виразу (4.4) відповідно до рівнянь (4.1), (4.2), (4.3) для умови межі стійкості $\alpha = 0$; $p = j\omega$; $\omega = 2\pi f_c$ (f_c – власна частота автоколивань ДГ).

За отриманим кількісним коефіцієнтом, відповідно до формул (4.2) і (4.3), отримуються вирази для розрахунку залежностей значень складових питомих демпферного і синхронізуючого моментів, а також їх сумарного значення в залежності від величини постійного запізнювання ε , де

$$M_{\ddot{a}} = M'_{\ddot{a} \text{ max}} \cos \omega \varepsilon + M''_{\ddot{a} \text{ max}} \sin \omega \varepsilon.$$

Електромагнітний, демпферний і синхронізуючий моменти визначаються через перехідні параметри синхронного генератора (x'_d , E'_q). За відомим моментом інерції махових мас $y_{\text{дг}}$ ДГ визначається постійна часу T_J . Після цього знаходиться коефіцієнт затухання ротора ДГ α , власна частота коливань ω_0 і частота вільних коливань ω_c . Для розглянутого ДГ розрахункове значення частоти $\omega_0 = 4$ Гц. Розрахунки показників стійкості

при паралельній роботі ДГ показали, що частота вільних взаємних коливань несуттєво відрізняється від частоти ω_0 . Це зумовлено тим, що при інтенсивних зовнішніх збуреннях, параметри яких досліджено в [91], домінуючий вплив на частоту коливань агрегатів надає електромагнітний синхронізуючий момент.

Для реалізації запропонованого вище способу розподілу активної потужності між паралельно працюючими генераторами пропонується структурна схема мікропроцесорної системи розподілу активної потужності, яка представлена на рис. 4.1.

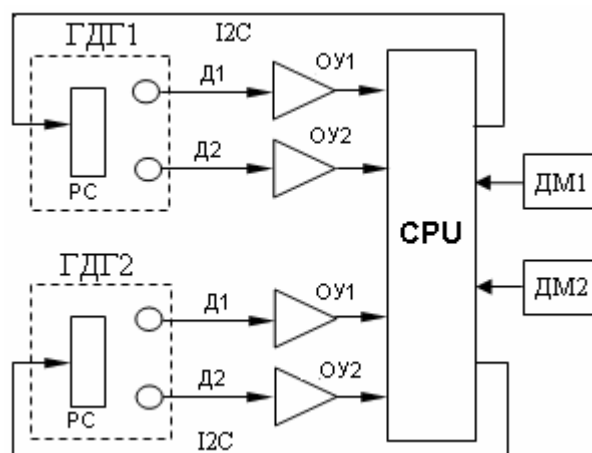


Рис. 4.1. Структурна схема мікропроцесорної системи розподілу активної потужності

Принцип її роботи полягає в наступному. На маховиках обох газодизель-генераторів (ГДГ1 та ГДГ2) розташовані по два індукційних датчика Д1, Д2. Імпульсний сигнал з виходу цих датчиків надходить на підсилювачі ОУ1, ОУ2, де посилюється до необхідного рівня і подається на мікроконтроллер CPU. Таким чином мікроконтроллер має повну інформацію про положення й частоти обертання роторів двох генераторів, а також інформацію про величину моментів на валах обох дизелів від датчиків моментів ДМ1 і ДМ2, або датчиків активної потужності, що одержується на виході синхронних генераторів. У разі значної нелінійності навантаження, наприклад, при наявності сумірних за потужністю напівпровідникових

перетворювачів, виділення активної складової потужності в мережі змінного струму стає проблематичним, тому знімання інформації про величину моменту на валу може відбуватися або за допомогою датчиків моменту, що встановлюються на валах дизелів, або непрямым шляхом по надмірності тиску турбонагнітача. Згідно з цими даними мікроконтроллер розраховує кут неузгодженості (фазовий зсув) між положеннями роторів ГДГ1 і ГДГ2, пропорційний активної потужності, що віддається. Потім CPU виконує операції множення, інтегрування, диференціювання з заданими коефіцієнтами і постійними часу, і формує на виході керуючий сигнал негативного зворотного зв'язку. З виходу CPU по шині I²C сигнал зворотного зв'язку надходить на вхід регуляторів швидкості обертання РС, і ті, в свою чергу, збільшують або зменшують подачу палива таким чином, щоб максимально точно підтримувати задану частоту базового ДГ1 і заданий кут відставання по фазі ГДГ2 відносно ГДГ1.

4.2. Оцінка ефективності стабілізації параметрів ГДГА

Як встановлено в розділі 2, реально функціонуючий ГДГА може розглядатися як ідеальна машина, на яку впливає адитивна перешкода. Оскільки в реальній системі ПД-регулятор налаштовувався лише на одну точку робочого діапазону, то є всі підстави вважати, що запропонований алгоритм управління дозволить істотно підвищити стабільність обертів ГД у всьому діапазоні потужностей навантаження.

На структурній схемі ГДГА, відповідно до прийнятої методики вимірювання, адитивна перешкода у вигляді дестабілізуючої функції f_ω прикладається до виходу (рис. 4.2).

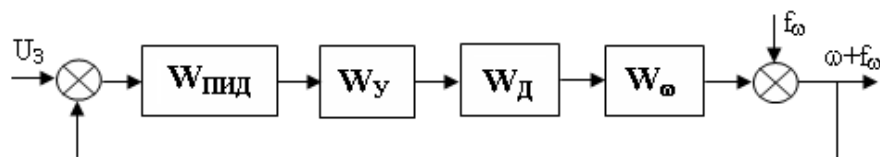


Рис. 4.2. Структурна схема ГДГА

де

$$\left. \begin{aligned} W_{\dot{I}\ddot{A}} &= \frac{T_{\dot{I}} T_g p^2 + K_{\dot{I}} T_{\ddot{e}} p + 1}{T_{\ddot{e}} p}; W_{\dot{o}} = \frac{K_{\dot{o}}}{T_{\dot{o}} p + 1}; \\ W_{\ddot{A}} &= \frac{(T_{\dot{o}f} p + 1)}{\frac{T_{\dot{o}f}}{1 - K_{\ddot{A}} K_{\dot{o}f}} p + 1} \cdot \frac{K_{\ddot{A}}}{1 - K_{\ddot{A}} K_{\dot{o}f}}; W_{\omega} = \frac{1/D}{\frac{T_{\dot{y}}}{D} p + 1} \end{aligned} \right\}.$$

Прийнявши

$$W_K = W_{\text{пид}} W_y W_D W_{\omega},$$

знаходимо рівень перешкоди на виході замкненої системи f_{ω} :

$$f_{\omega} = \frac{f_{\omega}}{1 + W_K} = f_{\omega} \frac{1}{1 + W_K} = f_{\omega} W_3.$$

Спектральна щільність перешкоди на виході замкненої системи:

$$S_{\omega}(\omega) = S_{\omega} \cdot |W_3(j\omega)|^2 = S_{\omega} \cdot \left| \frac{1}{1 + W_K(j\omega)} \right|^2.$$

З наведеної формули, враховуючи характер ЛАЧХ стійкої системи для області ефективного подавлення перешкоди, де $|W_K| \gg 1$, маємо:

$$S_{\omega}(\omega) \approx S_{\omega} \frac{1}{|W_K(j\omega)|^2}.$$

Розглянемо більш детально ЛАЧХ замкненої системи, яка може бути представлена у вигляді:

$$W_K = \frac{T_{\text{и}} T_g p + K_{\text{п}} T_{\text{и}} p + 1}{T_{\text{и}} p} \cdot \frac{K_y}{T_y p + 1} \cdot \frac{K_g \cdot (T_{\text{тн}} p + 1)}{\frac{T_{\text{тн}}}{1 - K_y K_{\text{тн}}} p + 1} \cdot \frac{1/D}{\frac{T_{\dot{y}}}{D} p + 1} =$$

$$\frac{K_y}{D} \cdot \frac{K_{\text{д}}}{1 - K_{\text{д}} K_{\text{тн}}} \cdot \frac{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}{(b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + 1)p} \cdot \frac{1}{T_{\text{и}} p}$$

де

$$a_3 = T_{\text{и}} T_{\text{д}} T_{\text{тн}},$$

$$a_2 = T_{\text{и}} T_g + K_{\text{п}} T_{\text{и}} T_{\text{тн}},$$

$$a_1 = K_{\text{п}} T_{\text{и}} + T_{\text{тн}},$$

$$b_3 = \frac{T_y T_{\text{э}} T_{\text{TH}}}{D(1 - K_{\text{TH}} K_{\text{д}})},$$

$$b_2 = T_y \frac{T_{\text{э}}}{D} + \frac{T_y T_{\text{TH}}}{1 - K_{\text{TH}} K_{\text{д}}} + \frac{T_{\text{э}} T_{\text{TH}}}{D(1 - K_{\text{TH}} K_{\text{д}})},$$

$$b_1 = T_y + \frac{T_{\text{э}}}{D} + \frac{T_{\text{TH}}}{1 - K_{\text{TH}} K_{\text{д}}}.$$

В табл. 4.1 приведені розраховані значення коефіцієнтів a_i і b_i для всього діапазону навантажень ГДГА.

Таблиця 4.1. Розраховані значення коефіцієнтів

P a_i, b_i	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
a_3	0	16,3	12,1	8,8	6,9	5,5
a_2	0	54,6	41	27,76	23,5	18,9
a_1	0	1,1	1,86	2,22	2,0	1,7
b_3	0	0,1	0,19	0,4	0,5	0,3
b_2	0	2,2	4,0	7,8	10,3	6,3
b_1	0	4,5	5,0	6,4	6,6	5,6

З результатів розрахунку коефіцієнтів поліномів $A(a_i, p)$ і $B(b_i, p)$ виходить, що вони фактично компенсують один одного. При цьому похибка не перевищує у вузькому частотному діапазоні 10 Дб. З цієї причини для оцінки ефективності подавлення перешкоди f_{ω} в обертах дизеля W_k можна представити у наближеному вигляді:

$$W_k \approx \frac{K_y K_{\text{д}}}{D(1 - K_{\text{д}} T_{\text{TH}})} \frac{1}{T_u p} = \frac{K_{\text{э}}}{T_u p}.$$

Передавальна функція замкнутої системи має вигляд:

$$W_3(p) = \frac{1}{1 + W_k(p)} = \frac{1}{1 + \frac{K_{\text{э}}}{T_u p}} = \frac{T_u p}{T_u p + K_{\text{э}}} = \frac{\left(\frac{T_u}{K_{\text{э}}}\right)}{\frac{T_u}{K_{\text{э}}} p + 1}.$$

Спектральна щільність перешкоди у вихідних обертах дизеля:

$$S_{\omega_3}(\omega) = S(\omega) \frac{\left(\frac{T_u}{K_{\mathfrak{C}}} j\omega\right)^2}{1 + \left(\frac{T_u}{K_{\mathfrak{C}}}\right)^2 \omega^2}$$

Дисперсія вихідного сигналу визначається з відомого виразу, який використовується для визначення кореляційної функції:

$$R_{\text{Вых}}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\omega_3}(\omega) e^{-j\omega\tau} d\omega,$$

який для $\tau = 0$ перетворюється до вигляду:

$$R_{\text{Вых}}(0) = \sigma_{\text{Вых}}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\omega_3}(\omega) d\omega.$$

Оскільки при значеннях ω_1 , при яких

$$\left(\frac{T_{\mathfrak{e}}}{K_{\mathfrak{Y}}}\right)^2 \omega^2 \gg 1,$$

$$W_{\mathfrak{C}}(j\omega) = 1,$$

то на спектр вихідного параметра впливає лише низькочастотний діапазон, для якого

$$W_{\mathfrak{C}}(j\omega) = \left(\frac{T_{\mathfrak{e}}}{K_{\mathfrak{Y}}}\right)^2 \omega^2.$$

Виходячи з викладеного, дисперсія вихідного параметра, з урахуванням значення $S(\omega)$, може бути визначена за формулою:

$$\begin{aligned} R_{\text{Вых}}(0) = \sigma_{\text{Вых}}^2 &= \frac{1}{2\pi} \left(\frac{T_{\text{И}}}{K_{\mathfrak{C}}}\right)^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sigma_{\text{Вх}}^2 \alpha}{\omega^2 + \alpha^2} \cdot \frac{d\omega}{\omega^2} = \\ &= \frac{1}{2\pi} \left(\frac{T_{\text{И}}}{K_{\mathfrak{C}}}\right)^2 \sigma_{\text{Вх}}^2 \alpha \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{d\omega}{\omega^2 (\omega^2 + \alpha^2)} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{T_{\text{И}}}{K_{\mathfrak{C}}}\right)^2 \frac{\sigma_{\text{Вх}}^2 \pi}{\alpha^2} = \left(\frac{T_{\text{И}} \cdot \sigma_{\text{Вх}}}{\sqrt{2} \cdot K_{\mathfrak{C}} \cdot \alpha}\right)^2 \end{aligned}$$

В результаті знаходимо, що за умови оптимального налаштування ПД-регулятора для всього діапазону потужностей вдається теоретично знижувати діапазон коливань обертів газодизеля в 15-20 разів.

4.3. Розробка й аналіз ефективних структур та схем розподілу активної потужності між ГДГА

Оптимізація параметрів регуляторів ГДГА при його одиночній роботі дозволила фактично підвищити стабільність обертів ГД до стабільності обертів звичайного дизельного агрегату. Це відкриває можливості забезпечення їх паралельної роботи за умови ефективного контролю активної потужності кожного з генераторів.

Для забезпечення рівності потужностей, що генеруються кожним з генераторів, необхідне забезпечення рівності (пропорційності при неоднакових встановлених потужностях) моментів на валах ГД і рівності їх обертів та положень роторів. Датчики моментів, або активної потужності, можуть контролювати як власне активну складову потужності, так і безпосередньо момент на валу (датчики кутового положення, побудовані на основі ефекту Холла).

Загальна структурна схема паралельно працюючих ГДГА наведена на рис. 4.3.

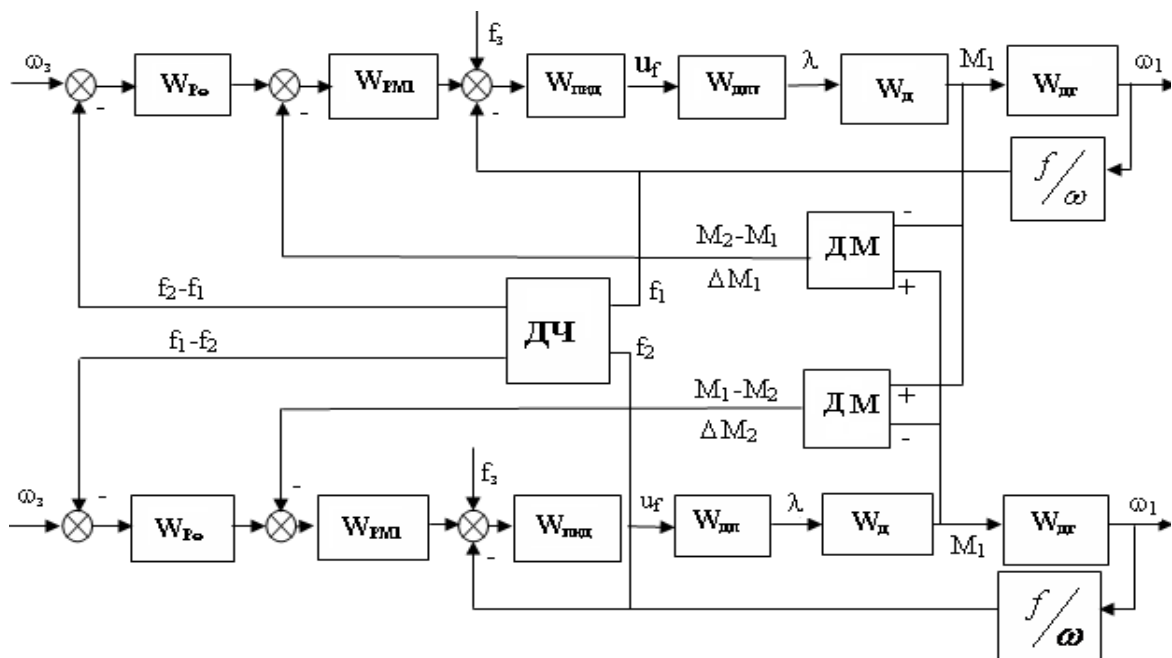


Рис. 4.3. Структурна схема паралельно працюючих ГДГА

Контроль обертів може здійснюватися за принципом роботи систем фазового автоналаштування частоти генераторів, що використовуються в радіопередавальних пристроях. При забезпеченні рівності частот включається схема контролю фазових положень роторів обох генераторів.

Система може бути побудована як на основі взаємозв'язку генераторів як ведений і ведучий, так і на основі перехресних зв'язків, відповідно до рис. 4.3. Перехресна схема, що зображена на рис. 4.3, може бути приведена до багатоконтурної структури (рис. 4.4), методи аналізу і синтезу якої добре вивчені і відпрацьовані в теорії електроприводів з підлеглим регулюванням координат.

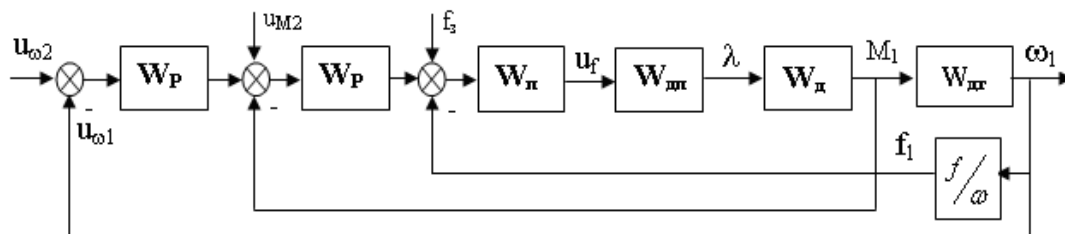


Рис. 4.4. Багатоконтурна структура

Для програмної реалізації на основі мікроконтролера розроблений алгоритм управління, блок-схема якого наведена на рис. 4.5. Робота алгоритму починається з вимірювання частот кожного з ГД. В якості датчика частоти використовується мікроконтролер. На входи мікроконтролера надходять два імпульсних сигнали, пропорційних частоті обертання валів кожного з ГД. Ці сигнали надходять на входи зовнішніх переривань (Int0, Int1 відповідно). При виникненні зовнішнього переривання Int0 виконується перевірка стану прапора flag0 на рівність 0. Ця додаткова змінна використовується для визначення моментів початку та завершення вимірювання частоти дизеля. У разі виконання рівності запускається таймер-лічильник 0, за допомогою якого виконується вимірювання тривалості періоду. Аналогічні дії виконуються для вимірювання частоти обертання вала другого ГД. При повторному виникненні переривання, таймер-

лічильник 0 зупиняється, і визначається значення частоти обертання вала дизеля. При цьому, змінна $flag0$ встановлюється в 0.

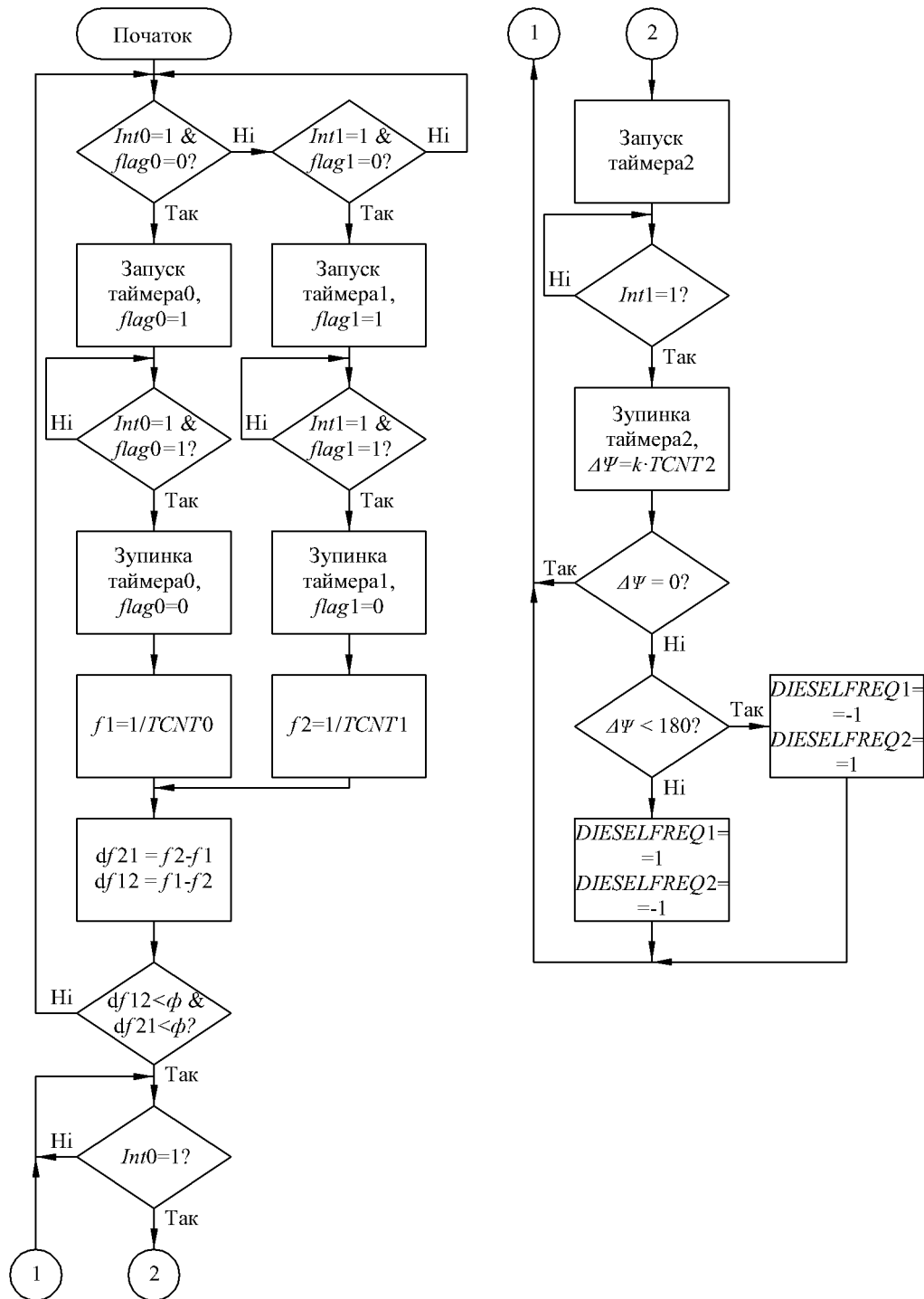


Рис. 4.5. Блок-схема алгоритму керування

Далі виконується визначення різниці частот (змінні $df12=f1-f2$, $df21=f2-f1$). Якщо частоти рівні (або майже рівні), то значення $df12$ і $df21$ рівні (по модулю) протягом деякого інтервалу часу (1 хв). При настанні

такого режиму мікроконтроллер переходить з режиму датчика частоти (ДЧ) в режим фазового детектора і виконує функції вирівнювання фаз. Як і раніше, для вимірювання фазового кута між дизелями використовуються зовнішні переривання. Запуск таймера-лічильника 2 виконується при виникненні переривання 0 (Int0), а зупинка – при виникненні переривання 1 (Int1). Значення, яке буде знаходитися в таймері-лічильнику, пропорційне різниці фаз між кутовими положеннями валів дизелів (відповідно, напруг генераторів). Далі, це значення множиться на нормуючий коефіцієнт k для того, щоб отримати значення фази в діапазоні $0 \div 360^\circ$. При рівності фаз ніяких керуючих сигналів на дизелі не подається. Якщо різниця фаз менша 180° (положення вала другого дизеля «запізнюється» по відношенню до першого), то формуються сигнали на зменшення обертів дизеля 1 (DIESELGEN1 = -1), і на збільшення обертів дизеля 2 (DIESELGEN2 = 1). Якщо різниця фаз більше 180° , то формуються сигнали на зменшення обертів дизеля 2 (DIESELGEN2 = -1), і на збільшення обертів дизеля 1 (DIESELGEN1 = 1). Після цього виконується чергове вимірювання різниці фаз і формування керуючих сигналів.

Детальна модель паралельно працюючих ГДГА наведена на рис. 4.6.

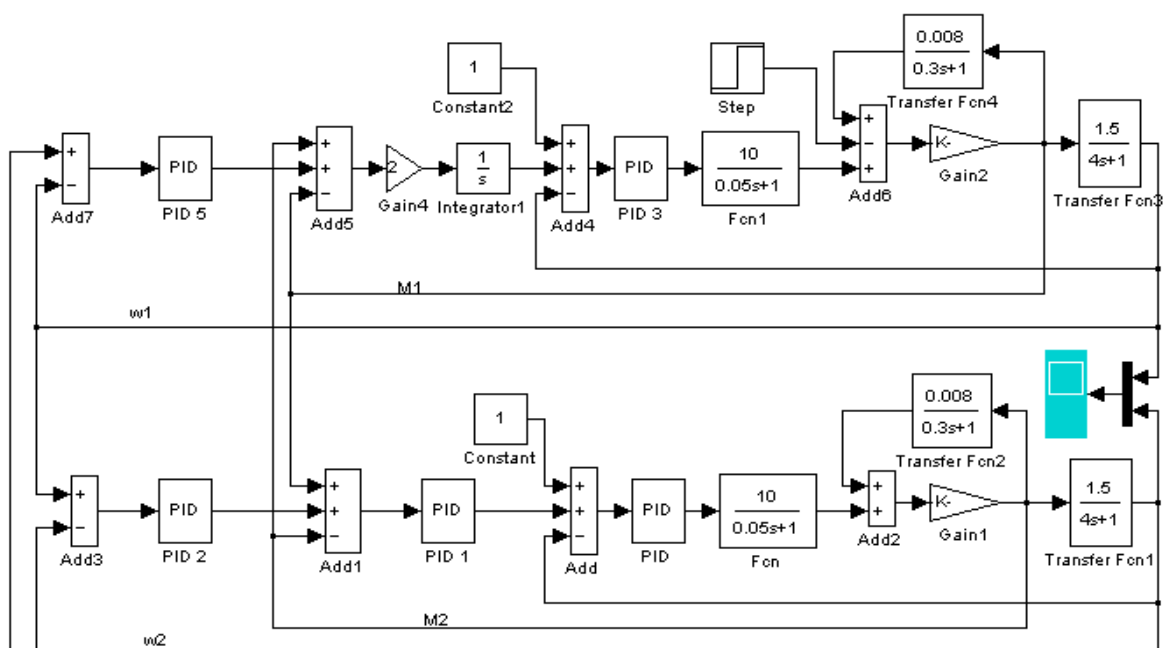


Рис. 4.6. Модель паралельно працюючих ГДГА

На рисунку зображена модель ГД, що складається з двох дизелів з ПІД-регуляторами (PID) та системи розподілу активної потужності, спроектовану з використанням двохконтурної системи регулювання по відхиленням кутових положень роторів і моментів на валах ГД.

На рис. 4.7, а, наведені графіки зміни швидкості двох ГД, при наявності зворотних зв'язків з контролю кутового положення роторів генераторів і моментів. На рис. 4.7, б – при відсутності контролю кутового положення роторів, а на рис. 4.7, в, приведені аналогічні залежності при відсутності зворотних зв'язків за моментами ГДГА.

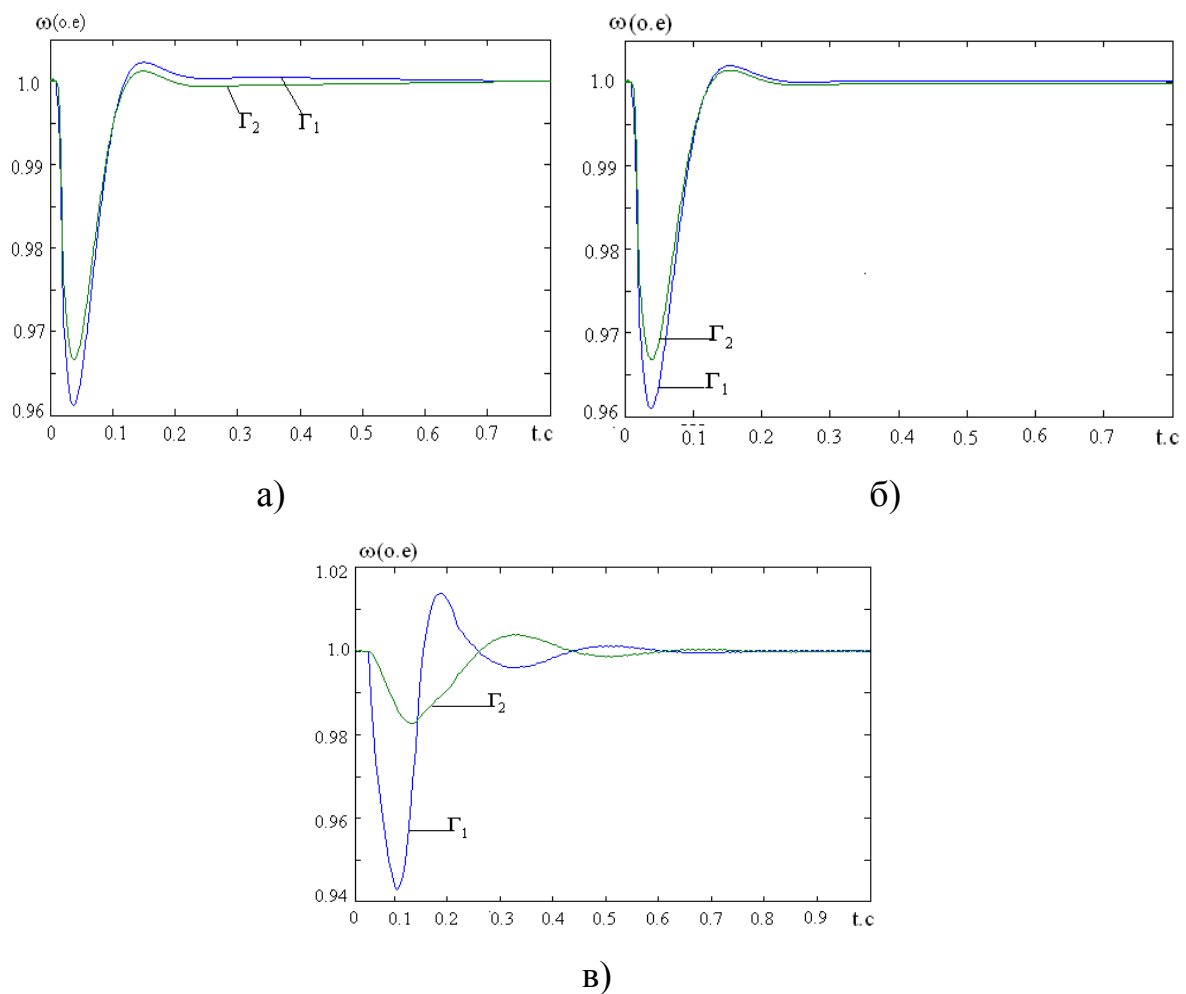


Рис. 4.7. Графіки зміни швидкості двох ГД

З отриманих графіків виходить, що забезпечення контролю кутового положення роторів ГДГА і моментів на валу кожного дизеля дозволяють

забезпечити пропорційний розподіл потужності як в статичних, так і в динамічних режимах.

4.4. Керування коефіцієнтом потужності при паралельній роботі синхронного генератора з мережею

Одним з основних питань, пов'язаних з підвищенням якості електроенергії в мережах, є питання про компенсацію реактивної потужності. Рациональна (оптимальна) компенсація реактивної потужності в промислових електромережах містить у собі широкий комплекс питань, спрямованих на підвищення економічності роботи електроустановок, поліпшення якості споживаної.

Оскільки реактивна складова неминуча при роботі багатьох промислових пристроїв, вона не може бути виключена повністю. Однак доцільно застосовувати засоби, призначені для зменшення її споживання з мережі живлення.

Виникає необхідність у дослідженні додаткових пристроїв, що поставляють в енергетичну систему реактивну потужність. Пристроями такого типу (компенсаторами), можуть служити батареї конденсаторів, синхронні компенсатори й двигуни, а також статичні джерела реактивної потужності. Спільна робота компенсуючих пристроїв з мережею веде до зменшення споживання реактивної складової струму [12, 14].

Для компенсації реактивної потужності можливе застосування синхронних компенсаторів. Синхронний компенсатор – це синхронний двигун, що працює в режимі холостого ходу, тобто без механічного навантаження на валу. Це дозволяє виготовляти спеціальні синхронні компенсатори з меншим повітряним зазором і полегшеним валом у порівнянні зі звичайними синхронними двигунами. При перезбудженні синхронний компенсатор генерує реактивну потужність ємнісного характеру, при недозбудженні споживає індуктивну реактивну потужність [30].

Перевагами синхронних компенсаторів є плавне й автоматичне регулювання реактивної потужності й напруги у великому діапазоні, а також висока надійність роботи.

Недоліками синхронних компенсаторів є відносно висока вартість, отже, і високі питомі капітальні витрати на компенсацію, більша виробнича площа, шум при роботі, можливість пуску від джерел живлення великої потужності. Разом з тим, при роботі когенераційних установок виникає задача стабілізації $\cos\phi$ при роботі синхронного генератора паралельно з мережею шляхом зміни величини збудження.

На рис. 4.8 представлена схема включення системи керування $\cos\phi$, яка включає: СКОД – система керування обертами дизеля, ОЗ – обмотка збудження, СЗ – система збудження, СГ – синхронний генератор.

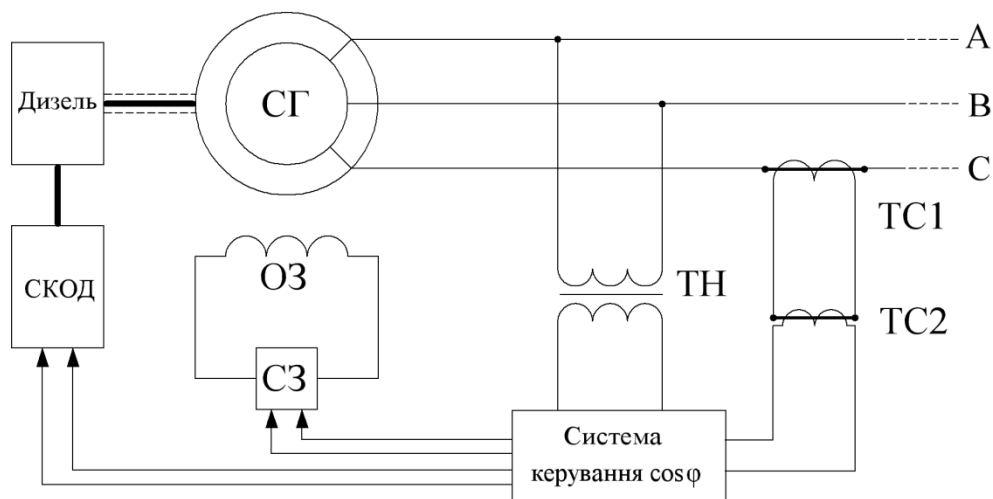


Рис. 4.8. Схема включення системи керування $\cos\phi$

Трансформатор напруги підключається між фазами А та В і вимірює лінійну напругу. Трансформатор струму включається у фазу С. З векторної діаграми можна побачити, що зсув фаз між U_{AB} та I_C дорівнює 90° при активному навантаженні.

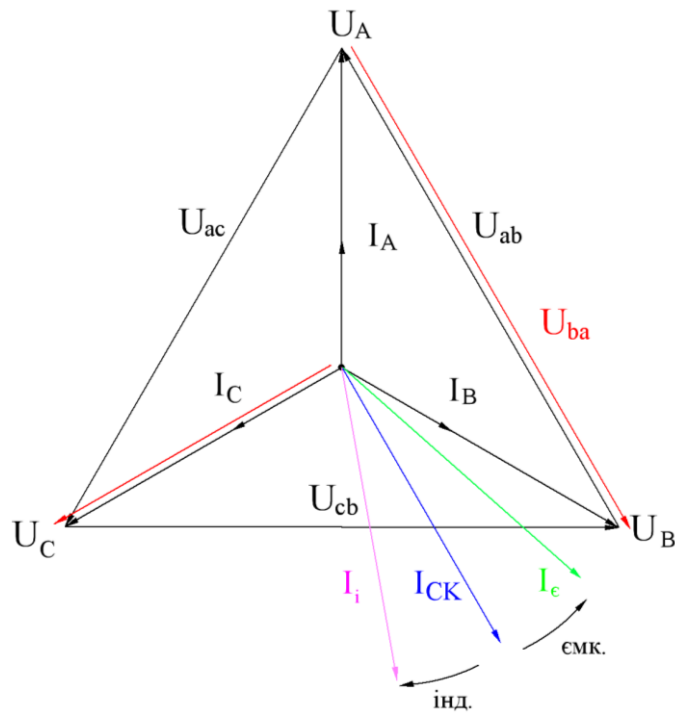


Рис. 4.9. Векторна діаграма струмів генератора

На рис. 4.10 представлена структурна схема система керування $\cos\varphi$. Основними елементами схеми є мікроконтролер, блок задання опорних сигналів, блок індикації, блок перевірки рівнів, а також включає трансформатори напруги та струму, детектори нуля, формувач сигналу різниці фаз, випрямлячі сигналів, підсилювачі сигналів.

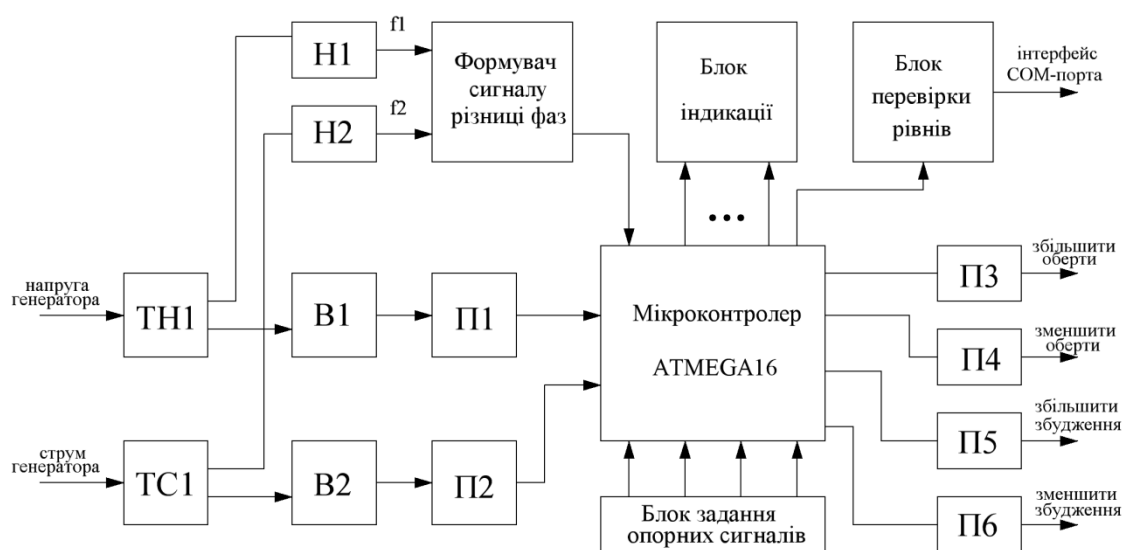


Рис. 4.10. Структурна схема системи

Трансформатори напруги та струму перетворюють сигнали напруги та струму в зручні для подальшої обробки рівні. Впрямлячі В1 та В2 формують постійну напругу. Перетворювачі П1 та П2 нормують сигнали до рівнів 0..5В, які подаються на входи АЦП мікроконтролера. Детектори нуля формують імпульсні сигнали в моменти переходу напруги та струму через нуль, які подаються на формувач сигналу різниці фаз. З нього подається сигнал на мікроконтролер. Сигнали опорного cosφ, частота та скважність імпульсів, ширина зони нечутливості подаються на мікроконтролер з блоку задання опорних сигналів. Блок індикації дозволяє визначити режим роботи системи: наявність помилки, обмін даними з комп'ютером, формування сигналів на зміну збудження синхронного генератора

4.4.1. Структура системи керування з трипозиційним регулятором

Трипозиційні регулятори забезпечують гарну якість регулювання для інерційних об'єктів з малим запізнюванням.

Структурна схема трипозиційної системи регулювання наведена на рис. 4.11.

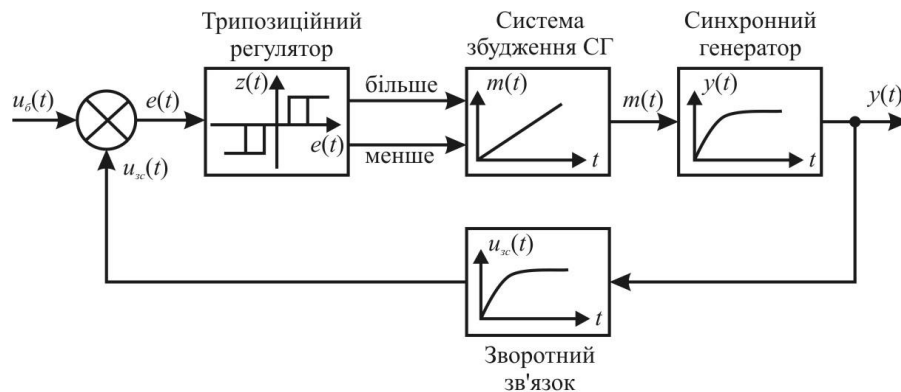


Рис. 4.11. Структурна схема трипозиційної системи регулювання

На рисунку позначено: АР – трипозиційний регулятор, ОУ – об'єкт керування, SP – вузол формування заданої точки (завдання), Е – неузгодженість регулятора, PV=X – регульована величина, сигнали Б (більше) і М (менше) – керуючого впливу, Z – вплив, що збурює.

Для запобігання «тремтіння» керуючого вихідного пристрою (реле) і виконавчого механізму поблизу точки його включення (занадто частого включення), передбачається гістерезис H . Також зона гістерезису призначена для виключення одночасного включення вихідних пристроїв УБ (більше) і УМ (менше). Ширина зони гістерезису в трипозиційних регуляторах є програмованим параметром налаштування.

Процес трипозиційного регулювання є автоколивальним – регульована величина як у перехідному, так і у сталому режимі періодично змінюється відносно заданого значення, тобто регульована величина $PV(X)$ піддана незатухаючим коливанням.

Для дослідження властивостей різних типів регуляторів системи стабілізації cosφ у середовищі MATLAB побудована функціональна модель, яка дозволяє вирішувати наступні завдання:

- аналіз процесів в електроенергетичній системі;
- отримання статичних та динамічних показників;
- оцінка параметрів, що характеризують вплив системи стабілізації на мережу;
- оцінка впливу параметрів регулятора на характер процесів;
- аналіз стійкості системи;
- синтез параметрів елементів і вузлів системи стабілізації коефіцієнту потужності.

Модель автономної електростанції з двома дизель-генераторами потужністю по 300 кВт кожний. Потужність навантаження $P=100$ кВт, $Q=50$ кВт, потужність асинхронного двигуна 100 кВт.

Досліджується робота системи стабілізації коефіцієнту потужності з трьохпозиційним регулятором. Період імпульсів керування 1 с. Скважність дорівнює 0,5.

Matlab-модель представлена на рис. 4.12. Силова частина виконана з використанням блоків бібліотеки PowerSystem, а керуюча частина з використанням математичних функцій бібліотеки Simulink.

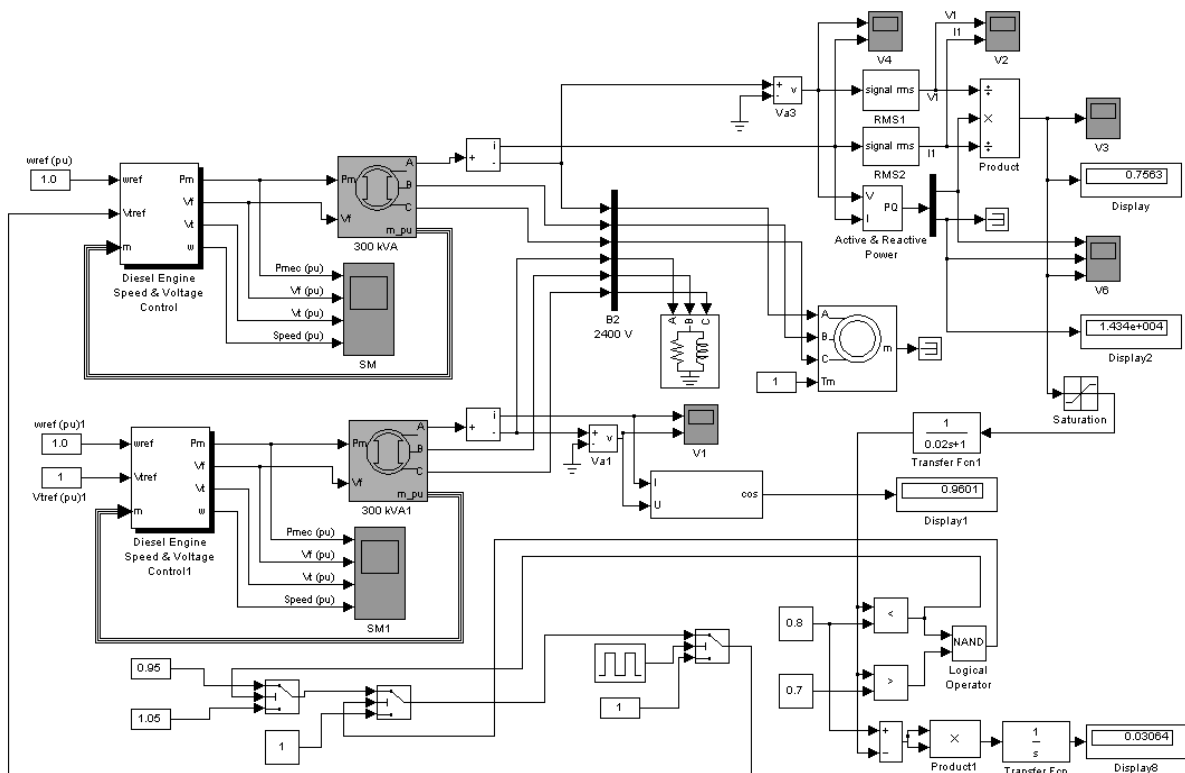


Рис. 4.12. Matlab-модель АЕЕС (двопозиційний регулятор $\cos\phi$)

Коефіцієнт потужності моделі пропонується вимірювати за допомогою спеціальної схеми. Він визначається як відношення активної потужності до повної потужності:

$$K = \frac{P}{S}.$$

Повна потужність розраховується як добуток діючих (середньоквадратичних) значень струму і напруги на вході коректора:

$$S = U_{\text{д.вх}} \cdot I_{\text{д.вх}}$$

На вхід вимірювача подаються сигнали, що відповідають вхідній напрузі і споживаному струму. Ватметр вимірює активні та реактивну складові потужності, з яких використовується тільки активна частина. Блоки RMS1 і RMS2 забезпечують обчислення середньоквадратичних значень напруги та струму відповідно. Значення коефіцієнта потужності обчислюється арифметично і виводиться на індикатор *Display*.

Таблиця 4.2. Значення інтегрального критерію

$T, \text{с}$	$I_{25\%}$	$I_{50\%}$	$I_{75\%}$
0,3	0,0585	0,0417	0,0512
0,6	0,05791	0,03534	0,05035
0,9	0,03327	0,02319	0,02627
1,2	0,04324	0,02799	0,02373
1,5	0,0463	0,0323	0,0293
1,8	0,0487	0,0342	0,0366
2,1	0,05229	0,0379	0,04442
2,4	0,05852	0,04375	0,0471
2,7	0,0596	0,0467	0,0495
3	0,06295	0,05279	0,054

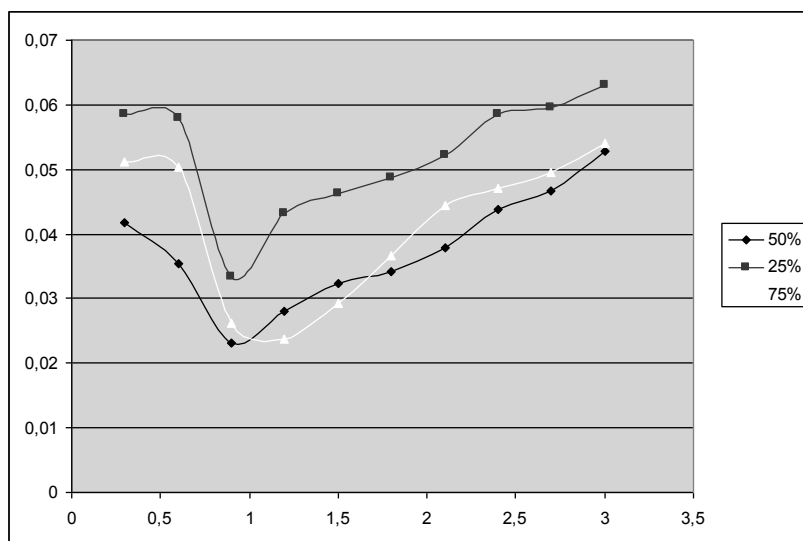


Рис. 4.13. Залежність критерію якості керування від періоду та скважності імпульсів

4.4.2. Синтез системи керування з ПІД-регулятором

Структурна схема безперервного регулятора з імпульсним виходом приведена на рис. 4.14. Вихідні керуючі сигнали регулятора – сигнали Більше і Менше (реле) через контактні або безконтактні керуючі пристрої (П)

впливають на виконавчий елемент Γ (система збудження синхронного генератора).

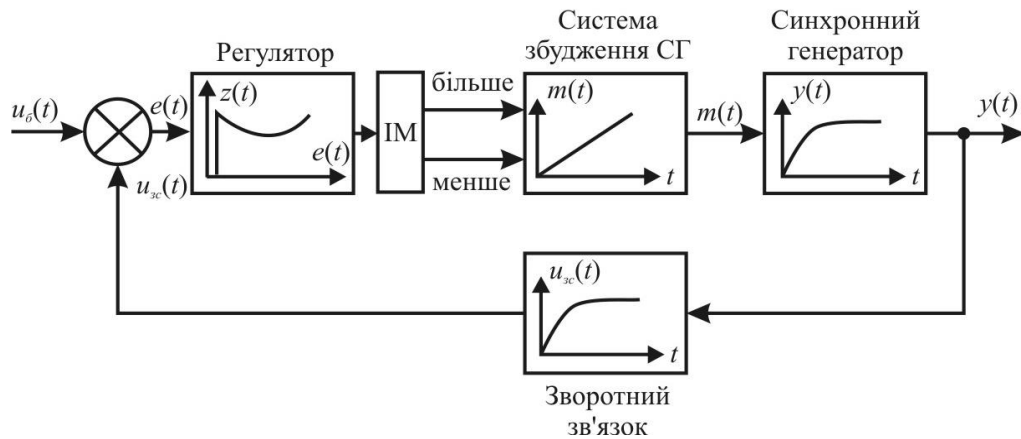


Рис. 4.14. Структурна схема регулятора з імпульсним виходом

де АР – безперервний ПІД-регулятор з імпульсним виходом; SP – вузол формування заданої точки; PV = X – регульований технологічний параметр ($\cos\phi$); E – неузгодженість регулятора; НП – нормуючий перетворювач; ІМП – імпульсний модулятор, що перетворює вихідний сигнал Y в послідовність імпульсів зі скважністю, пропорційною вихідному сигналу: $Q=|Y|/100$. Сигнали Більше і Менше – управляючі дії, Γ – система збудження синхронного генератора.

Регулятор, що входить в САР, може мати кілька установок, кожна з яких може змінюватися в досить широких межах. При цьому, при певних значеннях налаштувань, система буде керувати об'єктом згідно з технологічними вимогами, при інших може призвести до нестійкого стану. Тому стоїть завдання визначити налаштування, що відповідають стійкому стану системи, і вибрати з них оптимальні.

Оптимальними налаштуваннями регулятора називаються налаштування, які відповідають мінімуму (або максимуму) якого-небудь показника якості.

Спосіб налаштування ПІД-регулятора полягає в наступних діях:

1. $I=D=0$, збільшуємо P до $P_{кр}$, доки в системі не почнуться автоколивання.

2. $P=P_{кр}/2$, $D=0$, збільшуємо I до $I_{кр}$, доки в системі не почнуться автоколивання.

3. $P=P_{кр}/2$, $I=I_{кр}/2$, збільшуємо D до $D_{кр}$, доки в системі не почнуться автоколивання.

4. $P=P_{кр}/2$, $I=I_{кр}/2$, $D = D_{кр}/2$.

У роботі оптимізація виконується з використанням програми Matlab Response optimization Toolbox. На рис. 4.15 представлений вигляд вікна програми в процесі оптимізації. Для оптимізації використаний метод найшвидшого спуску. Мінімізується інтеграл середньоквадратичної помилки.

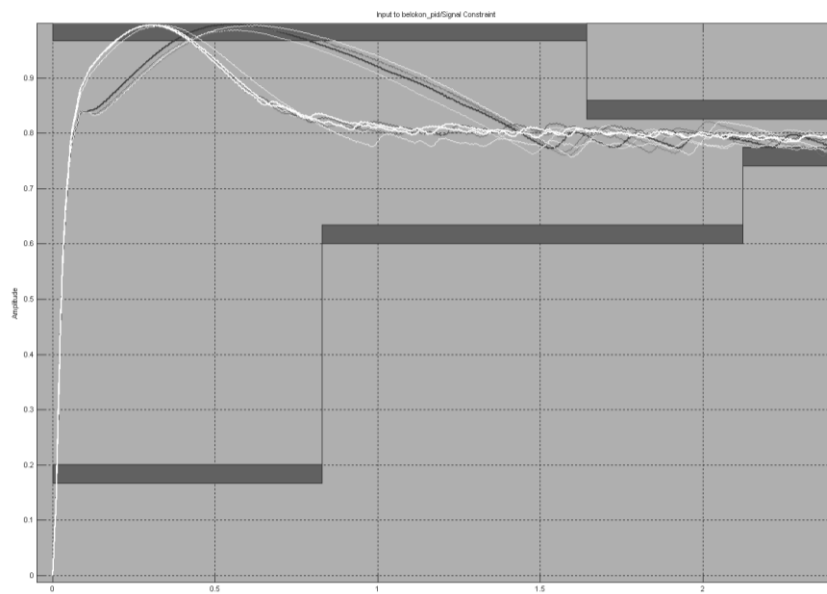


Рис. 4.15. Процес оптимізації параметрів ПІД-регулятора

При використанні методу найшвидшого спуску на кожній ітерації величина кроку a_k вибирається з умови мінімуму функції $f(x)$ у напрямку спуску:

$$f(x[k] - a_k f'(x[k])) = f(x[k] - a f'(x[k])).$$

Ця умова означає, що рух вздовж антиградієнта відбувається до тих пір, поки значення функції $f(x)$ зменшується. З математичної точки зору на кожній ітерації необхідно вирішувати завдання одновимірної мінімізації по функції:

$$j(a) = f(x[k] - a f'(x[k])) .$$

4.4.3. Розробка системи керування з Fuzzy-регулятором

ПІД-регулятор достатньо просто налаштовується для роботи з конкретним об'єктом і забезпечує задовільну стабілізацію регульованого параметру при незначних його змінах від заданої величини. Але при різких змінах режиму роботи об'єкта, яким керують, чи переході на інший режим роботи, якість перехідного процесу в системі з ПІД-регулятором может стати незадовільною. Виникає необхідність у використанні додаткових пристроїв, які корегують роботу ПІД-регулятора. В регулюванні обертми ГДГА може використовуватися технологія нечіткої логіки.

Функціональна схема системи автоматичного керування на базі нечіткої логіки (системи керування з нечітким регулятором (НР)) представлена на рис. 4.16.

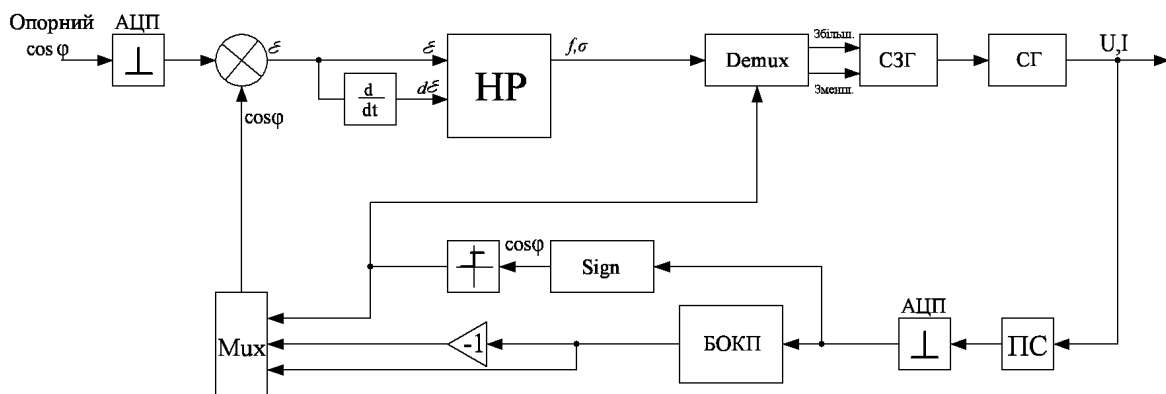


Рис. 4.16. Функціональна схема системи керування з НР

В якості вхідних змінних використовується поточне значення похибки $\cos \phi \ \epsilon$, яка дорівнює опорний $\cos \phi$ відняти поточний $\cos \phi$, а також швидкість зміни похибки ϵ ($d\epsilon$).

Для кожної змінної задані лінгвістичні терми, відповідні деяким діапазонам чітких значень. Щоб визначити граничні значення похибки ϵ розглянемо ймовірні значення опорного $\cos \phi$ та поточного $\cos \phi$. Опорний $\cos \phi$ задається, тому оптимальне значення, яке можна задати $\cos \phi = 0,3..1$. Поточний $\cos \phi$ може приймати значення від 0 до 1, але навантаження може мати різний характер: індуктивний та ємкісний. Для правильної роботи треба

розрізняти значення характеру навантаження, тому приймаємо значення $\cos\varphi$ при ємкісному характеру умовно негативними, тоді поточне значення $\cos\varphi$ можуть приймати значення від -1 до 1. Виходячи з того, що $\varepsilon = \cos\varphi_{(оп.)} - \cos\varphi_{(пот.)}$, похибка ε має такі границі [-0,7..2]. Для вхідної змінної «error» (ε) використовується шість термів: NH – від’ємне велике, NL – від’ємне мале, Z – близьке до нуля, PL – позитивне мале, PM – позитивне середнє, PH – позитивне велике.

Для вхідної змінної «derror» ($d\varepsilon$) визначаємо такі границі [-0,2..0,2] так як швидкість зміни похибки може зростати та спадати, тоді приймаємо збільшення швидкості за позитивне а зменшення за негативне. Визначаємо такі терми: QD – швидко спадає, SD – повільно спадає, C – постійне, SI – повільно зростає, QI – швидко зростає. На рис. 4.17 зображено вигляд функцій належності змінної «похибка» та «швидкість зміни похибки» відповідно.

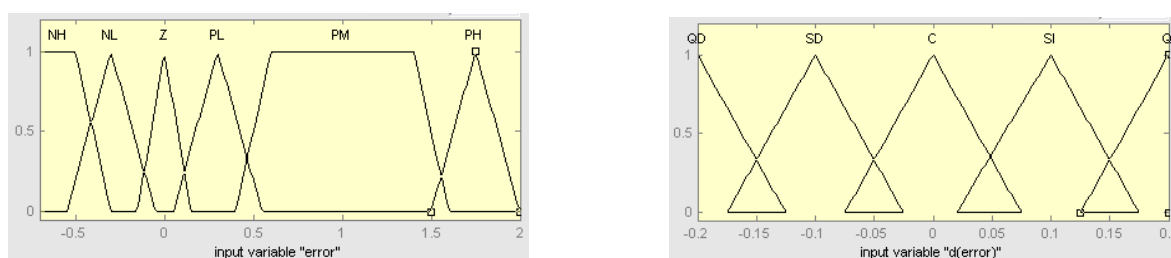


Рис. 4.17. Функції приналежності вхідних змінних «error» та «d(error)»

В якості вихідних лінгвістичних змінних приймаємо частоту та сквапність вихідного сигналу. Лінгвістична змінна «частота» має границі [0...4] Гц та п'ять термів: Z – нульове значення, L – низьке значення, M1 – перше середнє значення, M2 – друге середнє значення, H – високе значення частоти. Лінгвістична змінна «скважність» має границі [0...100]% та чотири терми: Z – нульове значення, L – низьке значення, M – середнє значення, H – високе значення скважності. На рис. 4.18 зображено вигляд функцій належності змінної «частота» та «скважність» відповідно.

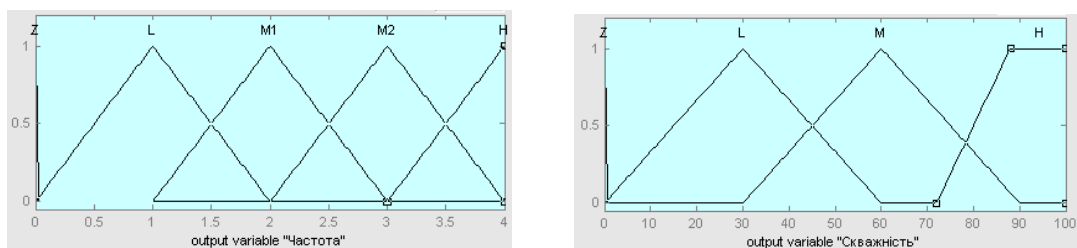


Рис. 4.18. Функції приналежності вихідних змінних «частота» та «скважність»

Аналітична формула трикутної функції має вигляд:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases},$$

де a, b, c – параметри функцій належності.

База правил для «частоти» та «скважності» має такий вигляд:

ЯКЩО $\varepsilon = PH$ та $d\varepsilon = QD$ ТО «частота» = L, «скважність» = M
ЯКЩО $\varepsilon = PH$ та $d\varepsilon = SD$ ТО «частота» = L, «скважність» = H
ЯКЩО $\varepsilon = PH$ та $d\varepsilon = C$ ТО «частота» = M1, «скважність» = M
ЯКЩО $\varepsilon = PH$ та $d\varepsilon = SI$ ТО «частота» = M1, «скважність» = H
ЯКЩО $\varepsilon = PH$ та $d\varepsilon = QI$ ТО «частота» = M2, «скважність» = M
ЯКЩО $\varepsilon = PM$ та $d\varepsilon = QD$ ТО «частота» = M1, «скважність» = H
ЯКЩО $\varepsilon = PM$ та $d\varepsilon = SD$ ТО «частота» = M2, «скважність» = M
ЯКЩО $\varepsilon = PM$ та $d\varepsilon = C$ ТО «частота» = M2, «скважність» = H
ЯКЩО $\varepsilon = PM$ та $d\varepsilon = SI$ ТО «частота» = H, «скважність» = M
ЯКЩО $\varepsilon = PM$ та $d\varepsilon = QI$ ТО «частота» = H, «скважність» = H
ЯКЩО $\varepsilon = PL$ та $d\varepsilon = QD$ ТО «частота» = L, «скважність» = L
ЯКЩО $\varepsilon = PL$ та $d\varepsilon = SD$ ТО «частота» = L, «скважність» = M
ЯКЩО $\varepsilon = PL$ та $d\varepsilon = C$ ТО «частота» = L, «скважність» = H
ЯКЩО $\varepsilon = PL$ та $d\varepsilon = SI$ ТО «частота» = M1, «скважність» = M
ЯКЩО $\varepsilon = PL$ та $d\varepsilon = QI$ ТО «частота» = M1, «скважність» = H
ЯКЩО $\varepsilon = Z$ та $d\varepsilon = QD$ ТО «частота» = L, «скважність» = M
ЯКЩО $\varepsilon = Z$ та $d\varepsilon = SD$ ТО «частота» = L, «скважність» = L
ЯКЩО $\varepsilon = Z$ та $d\varepsilon = C$ ТО «частота» = Z, «скважність» = Z
ЯКЩО $\varepsilon = Z$ та $d\varepsilon = SI$ ТО «частота» = L, «скважність» = L
ЯКЩО $\varepsilon = Z$ та $d\varepsilon = QI$ ТО «частота» = L, «скважність» = M
ЯКЩО $\varepsilon = NL$ та $d\varepsilon = QD$ ТО «частота» = M1, «скважність» = H
ЯКЩО $\varepsilon = NL$ та $d\varepsilon = SD$ ТО «частота» = M1, «скважність» = M
ЯКЩО $\varepsilon = NL$ та $d\varepsilon = C$ ТО «частота» = L, «скважність» = H
ЯКЩО $\varepsilon = NL$ та $d\varepsilon = SI$ ТО «частота» = L, «скважність» = M
ЯКЩО $\varepsilon = NL$ та $d\varepsilon = QI$ ТО «частота» = L, «скважність» = L
ЯКЩО $\varepsilon = NH$ та $d\varepsilon = QD$ ТО «частота» = H, «скважність» = H
ЯКЩО $\varepsilon = NH$ та $d\varepsilon = SD$ ТО «частота» = H, «скважність» = M
ЯКЩО $\varepsilon = NH$ та $d\varepsilon = C$ ТО «частота» = M2, «скважність» = H

ЯКЩО $\varepsilon = \text{NH}$ **та** $d\varepsilon = \text{SI}$ **ТО** «частота» = M2, «скважність» = M
ЯКЩО $\varepsilon = \text{NH}$ **та** $d\varepsilon = \text{QI}$ **ТО** «частота» = M1, «скважність» = H

В результаті були отримані дві поверхні залежності «частоти» та «скважності» від «похибки» та «швидкості зміни похибки». На рис. 4.19 представлена поверхня залежності «частоти» від ε та $d\varepsilon$.

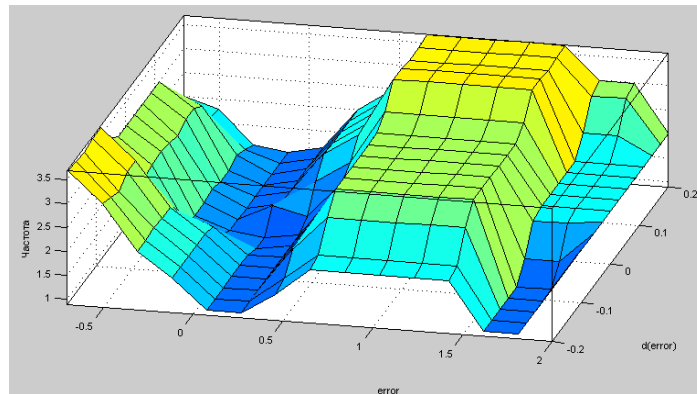


Рис. 4.19. Поверхня залежності частоти від ε та $d\varepsilon$

З рисунку видно, що поверхня дзеркально відображена відносно початку координат. Область максимуму «частоти» знаходиться в області максимальних від'ємних значень ε та максимальних від'ємних значень $d\varepsilon$. В області позитивних значень приблизно від 0,5 до 1,5 лежить область максимуму, в якій частота повільно спадає при зміні $d\varepsilon$ від 0,2 до -0,2. В області значень ε від 1,5 до 2 спостерігається область мінімумів, тому що помилка близька до того, щоб змінити свій характер (з ємкісного на індуктивний). На рис. 4.20 представлена залежність скважності імпульсів від ε та $d\varepsilon$.

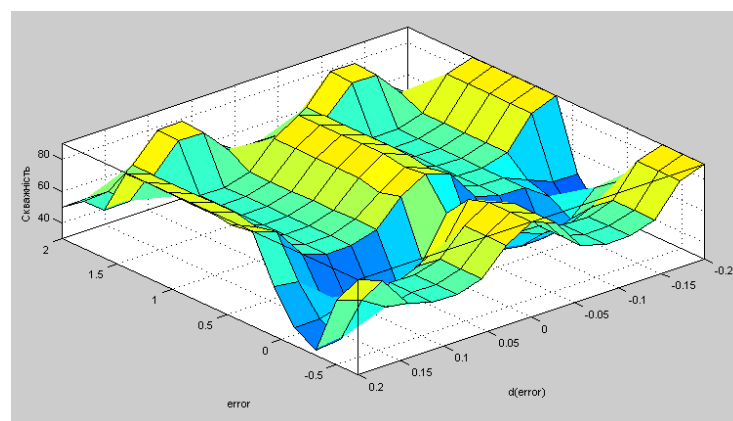


Рис. 4.20. Поверхня залежності скважності від ε та $d\varepsilon$

Бачимо, що поверхня залежності дзеркальна відносно початку координат. Область мінімумів спостерігається при $\varepsilon=0$. При значенні похідної похибки $d\varepsilon=0$ спостерігається область максимумів тому, що в цих умовах подаються імпульси низької частоти, щоб забезпечити кращу якість керування.

На рис. 4.21, для порівняння, представлені графіки зміни коефіцієнту потужності з різними типами регуляторів в системі стабілізації.

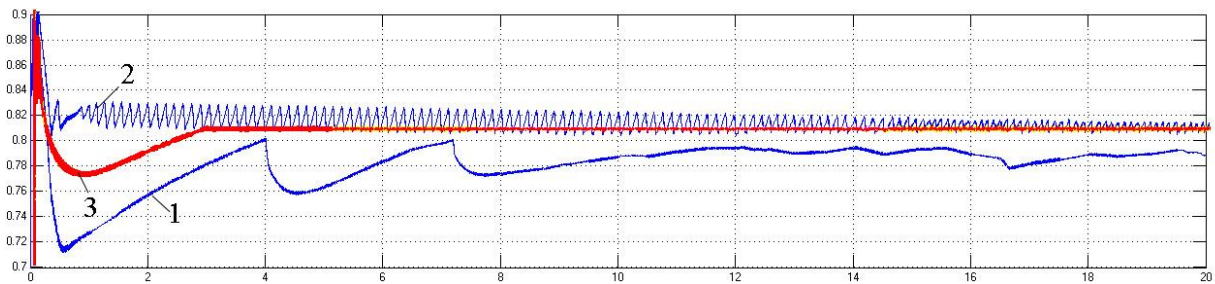


Рис. 4.21. Графіки зміни $\cos\varphi$ для різних регуляторів

На рисунку позначено: 1 – трьохпозиційний регулятор, 2 – ПІД-регулятор, 3 – Fuzzy-регулятор.

Найефективнішим типом регулятора є регулятор на основі нечіткої логіки та ПІД-регулятор з оптимальними значеннями параметрів, що забезпечує найбільш швидкий перехідний процес з найменшим відхиленням від заданого значення.

4.5. Дослідження систем упереджуючого керування

В другому розділі була представлена спрощена математична модель синхронного генератора, яка є адекватною реальній математичній моделі, і дозволяє вирішувати задачі оптимізації керування виходячі з мінімізації провалів напруги в перехідних процесах при комутації навантаження. Розроблені моделі використані при синтезі системи упереджуючого керування та моделюванні процесів комутації навантаження. Використання спрощених моделей дозволило значно скоротити час розрахунку перехідного процесу, що в свою чергу робить можливим на основі результатів

моделювання визначати час та величину форсування збудження в реальній системі.

4.5.1. Синтез структури системи упереджуючого керування

На рис. 4.22 представлена структурна схема систему упереджуючого керування.

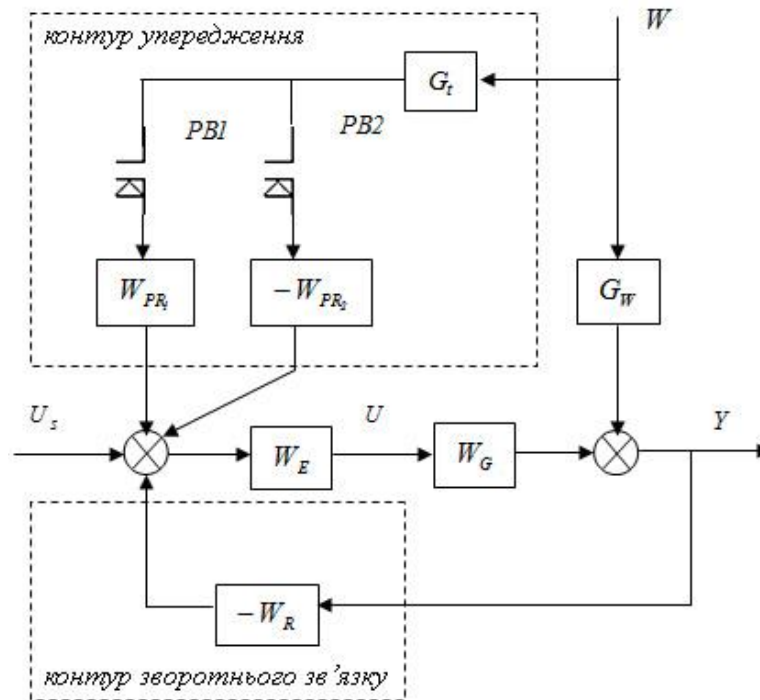


Рис. 4.22. Блок-схема системи упереджуючого керування синхронного генератора

На рисунку позначено: U_s – опорне значення напруги; W_E – система збудження генератора; U – скоригований сигнал на обмотку збудження генератора; W_G – синхронний генератор; Y – вихідний сигнал; $-W_R$ – ПД-регулятор напруги і струму; $-U_R$ – сигнал з регулятора.

Контур упередження складається з наступних блоків: $PB1$ і $PB2$ – реле часу, що спрацьовує при надходженні сигналу від датчика збурення; G_t , W_{PR1} і $-W_{PR2}$ – упереджуючі регулятори; G_W – асинхронний двигун (є ініціатором збурення W в момент включення).

Збурення $W(s)$ впливає на процес відповідно до передатної функції $G_w(s)$, тобто існує динамічний зв'язок між збуренням і виходом:

$$Y(s) = G_w(s) \cdot W(s). \quad (4.5)$$

Ідея упередження складається в коригуванні керуючого сигналу на основі показань датчика $G_t(s)$ й регуляторів W_{PR_1} та $-W_{PR_2}$. Вплив збурення на процес нейтралізується у вихідному параметрі Y за допомогою цих регуляторів, які генерують сигнал як функцію самого збурення:

$$-G_t(s) \cdot (W_{PR_1}(s) - W_{PR_2}(s)) \cdot W_E(s) \cdot W_G(s) \cdot W(s) + G_w(s) \cdot W(s) = 0. \quad (4.6)$$

Зробимо заміну, з метою спрощення: $W_{PR}(s) = (W_{PR_1}(s) - W_{PR_2}(s))$.

Вирішуючи рівняння відносно $W_{PR}(s)$ одержимо рівняння ідеального упереджуючого регулятора:

$$W_{PR}(s) = \frac{G_w(s)}{G_t(s) \cdot W_E(s) \cdot W_G(s)}. \quad (4.7)$$

Виходячи із блок-схеми на рис. 4.22 керуючий сигнал U на обмотку збудження буде складатися із трьох складових частин: сигналу опорного значення напруги, сигналу по вимірюванню збурення й сигналу зворотного зв'язку.

$$U(s) = U_c(s) - W_R(s) \cdot Y(s) - W_{PR}(s) \cdot G_t(s) \cdot W(s). \quad (4.8)$$

Запишемо рівняння передатної функції системи, для зручності опустимо аргумент s :

$$(U_c - W_R \cdot Y - W_{PR} \cdot G_t \cdot W) \cdot W_E \cdot W_G + G_w \cdot W = Y, \quad ,$$

зробивши групування членів, одержуємо:

$$W_E \cdot W_G \cdot U_c + (-W_{PR} \cdot G_t \cdot W_E \cdot W_G + G_w) \cdot W = (1 + W_E \cdot W_G \cdot W_R) \cdot Y. \quad (4.9)$$

Для спрощення перетворень здійснимо деякі заміни:

$$W_B = (-W_{PR} \cdot G_t \cdot W_E \cdot W_G + G_w) \cdot W;$$

$$k1 = W_E \cdot W_G;$$

$$k2 = (1 + W_E \cdot W_G \cdot W_R).$$

Провівши підстановку коефіцієнтів і виконавши необхідні перетворення одержуємо:

$$\frac{Y}{U_c} = \frac{k1}{k2} \cdot \left(1 - \frac{W_B}{k1 \cdot U_c} \right) .$$

Передатна функція всієї системи упереджую чого керування має вигляд:

$$W_c(s) = \frac{Y(s)}{U_c(s)} = \frac{W_E(s) \cdot W_G(s)}{1 + W_E(s) \cdot W_G(s) \cdot W_R(s)} \cdot \left(1 - \frac{(-W_{PR}(s) \cdot G_t(s) \cdot W_E(s) \cdot W_G(s) + G_W(s)) \cdot W(s)}{W_E(s) \cdot W_G(s) \cdot U_c(s)} \right) \quad (4.10)$$

У випадку ідеального упередження, що повністю компенсує збурення, система зворотного зв'язку прийме вигляд:

$$W_c(s) = \frac{Y(s)}{U_c(s)} = \frac{W_E(s) \cdot W_G(s)}{1 + W_E(s) \cdot W_G(s) \cdot W_R(s)} \quad (4.11)$$

Сигнал $w(s)$ скорочується й більше не входить у передатну функцію. Тому збурення не буде робити ніякого впливу на вихідну величину.

4.5.2. Моделювання системи упереджуючого керування

Технічні дані синхронного генератора наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3. Технічні дані синхронного генератора

Тип	Напруга, В	Активний опір, Ом		Постійні часу, с			
		фази статора	фази ротора	T'_{d0}	T'_d	T_a	T''_d
МСК102-4	400	0,02	0,0972	1,69	0,158	0,014	0,0076
	Потужність, кВт		Частота обертання, об/хв		ККД, %		
	150		1500		90,2		
	Індуктивний опір, о. е.						
	x_σ	x_d	x_q	x'_d	x''_d	x_2	x_0
	0,0763	1,92	0,98	0,186	0,124	0,131	0,0215

На рис. 4.23 представлена розроблена Matlab-модель для дослідження принципів упереджуючого керування.

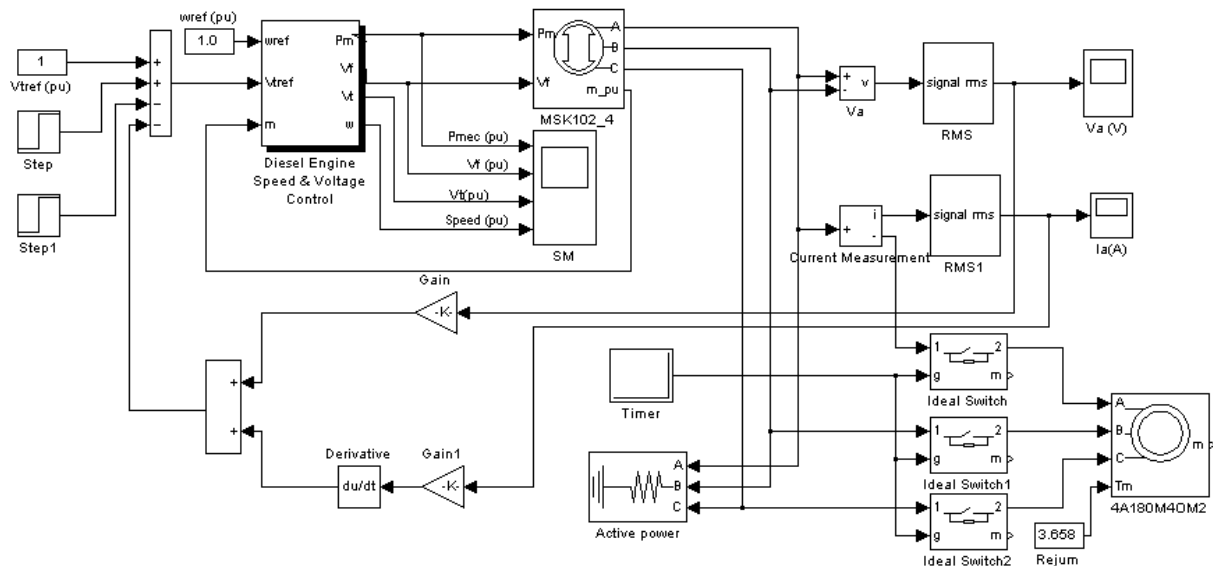


Рис. 4.23. Модель дизель-генераторної установки з упереджувачим керуванням синхронного генератора по напрузі

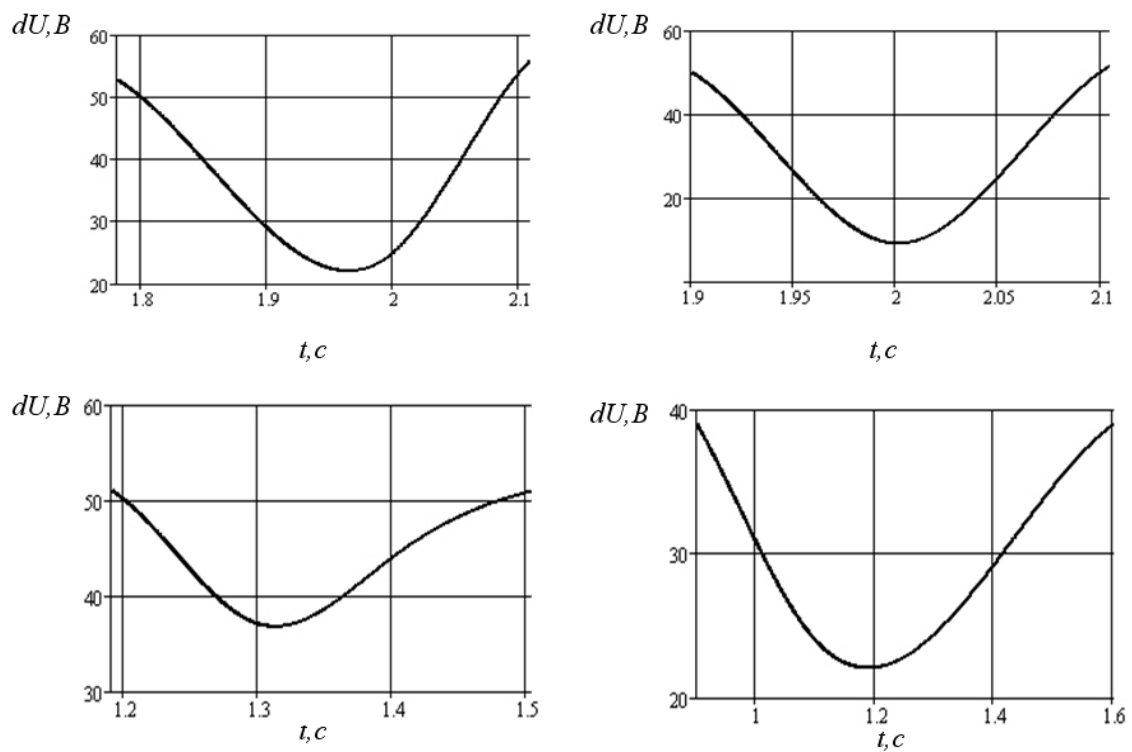


Рис. 4.24. Залежності провалів напруги від часу упередження при потужності асинхронного двигуна 30 кВт

На рис. 4.24 перший графік – величина форсування 5В, другий графік – 10В, третій графік – 15В, четвертий графік – 20В.

Згідно [21] перехідний процес в обмотці збудження, після спрацювання регулятора, характеризується рівнянням:

$$U_{\epsilon} = i_{\epsilon} \cdot r_{\epsilon} + L_{\epsilon} \cdot \frac{\partial i_{\epsilon}}{\partial t} \quad (4.12)$$

Визначимо струм в обмотці збудження, для цього спочатку виконаємо поділ змінних:

$$\partial t = \frac{L_{\epsilon} \cdot \partial i_{\epsilon}}{U_{\epsilon} - r_{\epsilon} \cdot i_{\epsilon}} \quad (4.13)$$

Оскільки взяття інтеграла від правої частини рівняння (4.12) досить скрутне, то скористаємося заміною:

$$U_{\epsilon} - r_{\epsilon} \cdot i_{\epsilon} = y \quad (4.14)$$

У результаті одержуємо цілком розв'язне рівняння:

$$\partial t = -\frac{L_{\epsilon}}{r_{\epsilon}} \cdot \frac{\partial y}{y} \quad (4.15)$$

Такий вираз в правій частині рівняння (4.15) легко піддається інтегруванню, а первісна функція всім відома, після інтегрування лівої й правої частини маємо:

$$\ln(y) = -\frac{r_{\epsilon}}{L_{\epsilon}} \cdot t \quad (4.16)$$

Після підстановки (4.15) у вираз (4.16) і, виконавши необхідні перетворення, одержуємо залежність струму збудження від часу:

$$i_{\epsilon} = \frac{U_{\epsilon} - e^{-\frac{r_{\epsilon}}{L_{\epsilon}} \cdot t}}{r_{\epsilon}} \quad (4.17)$$

З рівняння (4.17) видно, що струм збудження є функцією часу й прямо пропорційний зміні напруги збудження.

4.6. Оптимізація параметрів регулятора системи збудження

Робота синхронного генератора (СГ) в енергосистемі забезпечується системою збудження, яка гарантує стійкість роботи і забезпечує необхідну якість підтримки напруги, інваріантність налаштувань до зміни режиму

роботи генератора і мережі [11]. Тому проблема побудови та оптимізації регулятора системи збудження є актуальною, особливо у зв'язку з постійно зростаючими вимогами до якості електроенергії.

При пошуках оптимальних параметрів зазвичай вибирається один з наступних критеріїв оптимізації:

- аперіодичне регулювання;
- регулювання з заданим перерегулюванням;
- мінімізація середньоквадратичної похибки.

Для розглянутого випадку використання СГ в автономних електроенергетичних системах в якості критерію оптимальності обирається критерій, відповідно до якого повинно бути забезпечено максимально швидке відновлення номінальних вихідних напруг з допустимим перерегулюванням, яке, відповідно до стандартів на якість напруги автономних електроенергетичних систем, не повинно перевищувати 5%.

На рис. 4.25 наведена динамічна модель СГ, реалізована в Matlab-Simulink з встановленими параметрами, близькими до фізичних для розглянутих машин. По відношенню до ПД-регулятора, СГ є об'єктом регулювання.

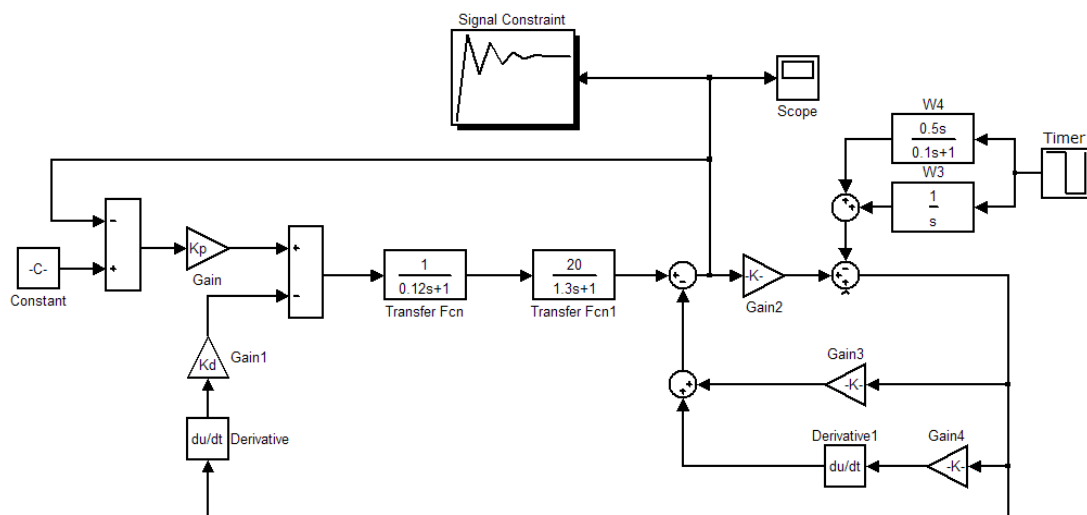


Рис. 4.25. Модель синхронного генератора для рішення задачі оптимізації

Для рішення задачі оптимізації параметрів ПД-регулятора використаний метод динамічної оптимізації з використанням пакета прикладних програм побудови нелінійних систем управління Simulink Design Optimization, що входить до складу інструментальних засобів MatLab Simulink 7.

На основі проведеного експерименту були отримані значення коефіцієнтів регулятора, які при заданій потужності навантаження забезпечують найкращий перехідний процес після провалу напруги. Значення коефіцієнтів регулятора при $\Delta P = 30\%$ представлені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4. Оптимальні значення коефіцієнтів регулятора

P_d	K_p	K_d
0,1	1,676	0,1004
0,2	1,074	0,0177
0,3	1,0984	0,0103
0,4	1,106	0,0064
0,5	1,1051	0,011
0,6	1,13	0,0064

Для перевірки реакції ПД-регулятора з отриманих залежностей коефіцієнтів від величини потужності навантаження, що підключається (відключається), була побудована Matlab-модель синхронного генератора з автоналаштуванням оптимізованих параметрів ПД-регулятора щодо зміни потужності навантаження.

На рис. 4.26 показаний перехідний процес після підключення навантаження, що дорівнює $0,7 P_n$, і провалу напруги (рис. 4.26, б) з оптимізованими параметрами K_p і K_d і без оптимізації (рис. 4.26, а).

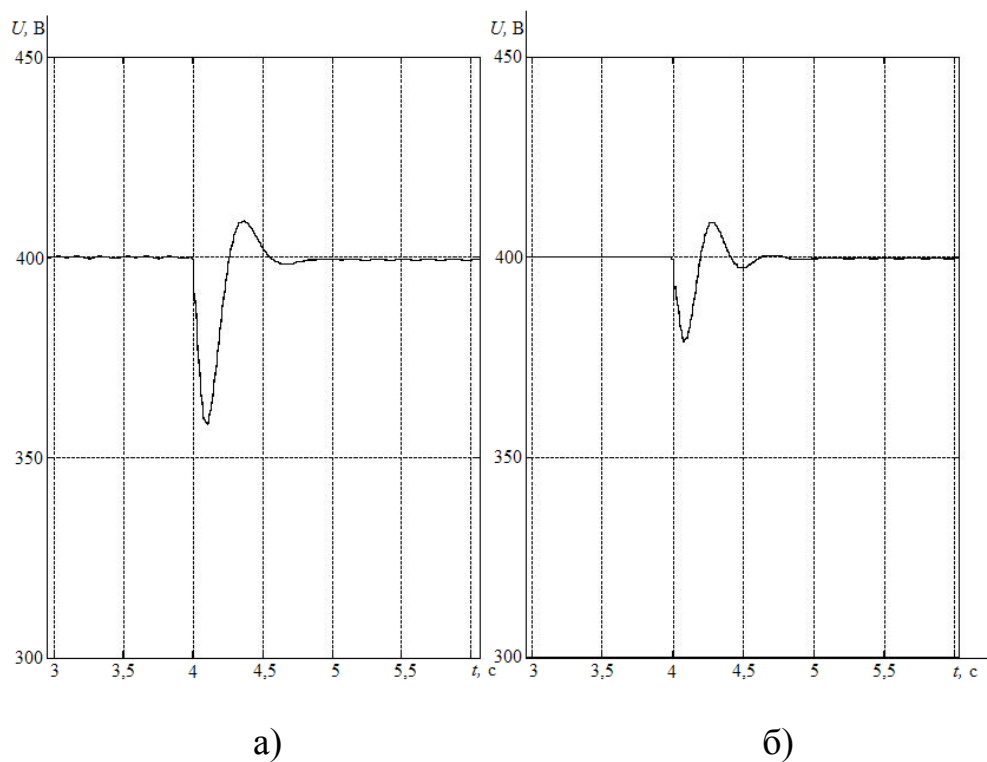


Рис. 4.26. Перехідні процеси без оптимальних налаштувань регулятора (а) і після оптимізації (б)

На рис. 4.27 представлені осцилограми напруг синхронного генератора, отримані експериментально. Крива 1 – огибающая напруги синхронного генератора з оптимальними параметрами регулятора системи збудження, крива 2 – без оптимального налаштування регулятора.

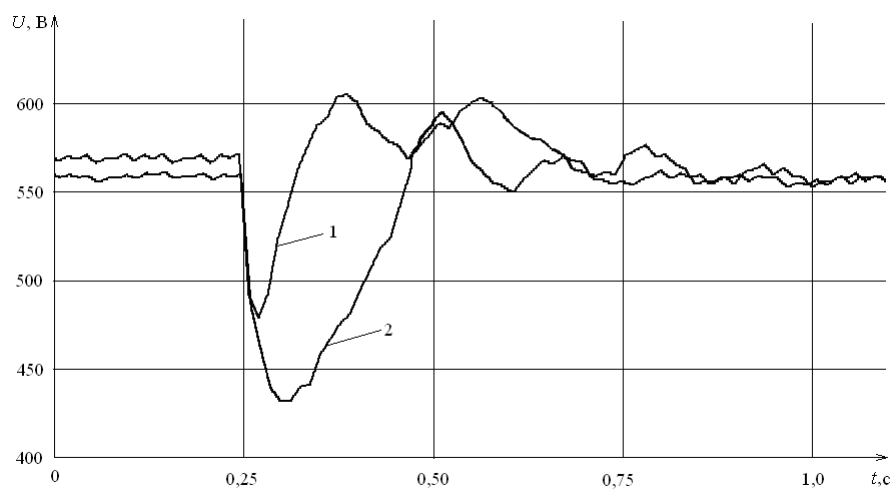


Рис. 4.27. Осцилограми напруг, отримані експериментально

Висновки

1. На основі аналізу моментів паралельно працюючих ДГ встановлена умова ідеально рівномірного розподілу активної потужності між генераторами, яка полягає в забезпеченні в кожен момент часу рівності крутних моментів і кутових положень валів двигунів, що дозволило розробити оригінальні структури і алгоритми управління паралельною роботою ГДГА, що дозволяють з високою точністю забезпечувати рівномірний (пропорційний) розподіл активної потужності.

2. Розроблені ефективні структури регуляторів коефіцієнту потужності генератора та Matlab-модель АЕЕС для дослідження якості роботи регуляторів. Вперше розроблені структури регуляторів з використанням апарату теорії нечіткої логіки для керування коефіцієнтом потужності в АЕЕС.

3. Розроблена структура системи упереджуючого керування збудженням синхронного генератора при підключенні потужного споживача з метою зменшення провалу напруги. Отримані залежності провалу напруги генератора від величини форсування збудження та часу упередження. Аналіз результатів показав, що існує яскраво виражений мінімум величини провалу напруги, який є функцією часу упередження та величини форсування збудження.

4. Розроблена спрощена динамічна модель синхронного генератора в перехідних процесах, обумовлених комутацією навантаження, є адекватною реальній математичній моделі та дозволяє вирішувати задачі оптимізації керування, виходячи з мінімізації сплесків та провалів напруги при комутації навантаження.

РОЗДІЛ 5

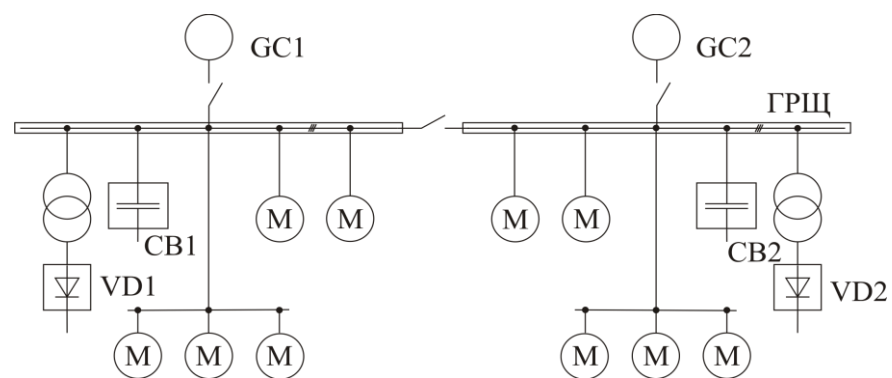
ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

5.1. Загальна характеристика АЕЕС з напівпровідниковими перетворювачами та основні задачі підвищення якості електроенергії

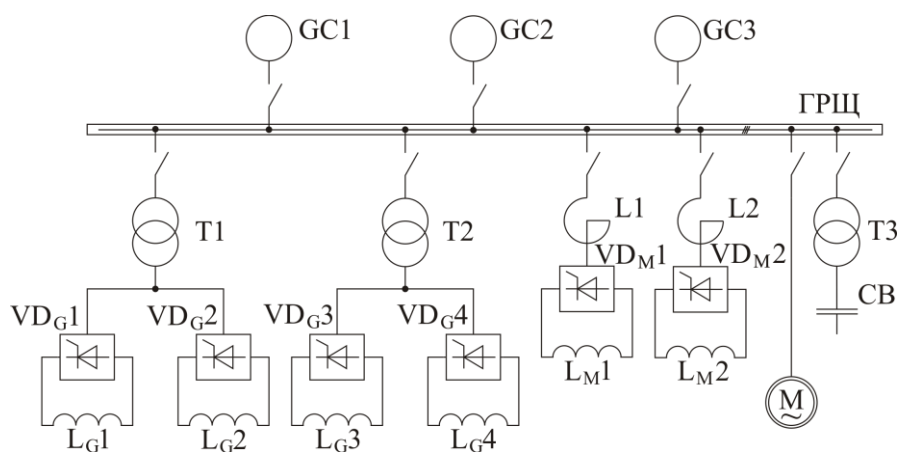
Напівпровідникові перетворювачі автономних, зокрема і суднових електроенергетичних систем, поділяються на дві групи за діапазонами потужностей. Перша група – це перетворювачі, які працюють в силових колах електроенергетичної установки. До них належать валогенераторні, гребні установки та установки головних суднових механізмів (шпилів, брашпилів і електроприводи технологічних механізмів, а також зарядно-силові перетворювачі). Це зазвичай перетворювачі, потужності яких сумірні, принаймні, з потужностями окремих генераторних агрегатів. Вони характеризуються значним впливом на якість електроенергії [6].

До другої групи належать перетворювачі, потужності яких незрівнянно менше потужностей окремих генеруючих агрегатів. До них належать електроприводи допоміжних механізмів, рульових пристроїв, зарядні пристрої, пристрої живлення систем суднової автоматики, перетворювачі систем збудження генераторів та інші.

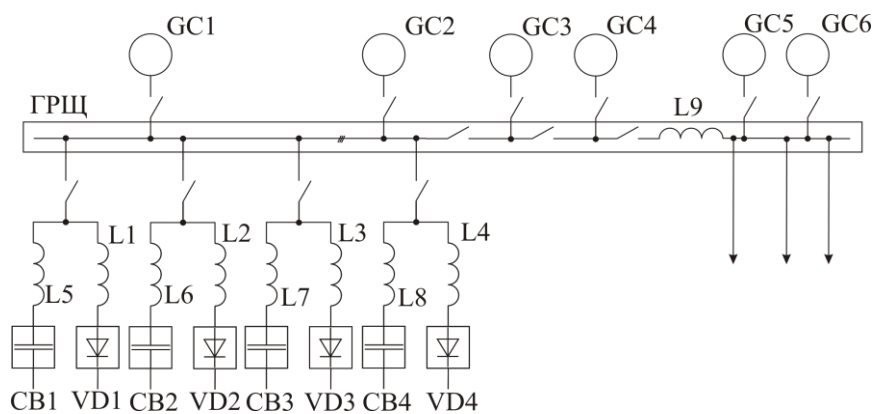
На рис. 5.1 представлені основні схеми СЕЕС. Фідерна система (рис. 5.1, а) характерна для суден, на яких використовують перетворювачі відносно малої потужності в порівнянні з потужністю електростанції. Однак при великому числі перетворювачів їх сумарна встановлена потужність стає сумірною з потужністю генераторів електростанції. У таких системах використовують перетворювачі різних типів і призначення, причому, кількість і сполучення одночасно працюючих напівпровідникових перетворювачів змінюється випадковим чином. Досить широко поширені схеми СЕЕС із струмообмежуючими реакторами (рис. 5.1, в).



а)



б)



в)

Рис. 5.1. Поширені схеми СЕЕС

В теперішній час збільшення видобутку нафти і газу досягається за рахунок промислової розробки родовищ на континентальному шельфі за

допомогою стаціонарних бурових платформ, самопідйомних бурових установок, напівзаглибних бурових установок і бурових суден.

Бурові судна з системами динамічної стабілізації, які дозволяють проводити бурові роботи на глибинах 300 метрів і більше, мають велику маневреність за рахунок самохідності та відсутності якірної системи стабілізації, а також велику автономність, оскільки широко поширені в світовій практиці. На бурових судах застосовують єдині електроенергетичні системи, джерела електроенергії яких забезпечують одночасне живлення загальносуднових споживачів, технологічного комплексу, підрулюючих пристроїв, гребних електродвигунів (ГЕД). При цьому в приводах технологічного комплексу (бурові лебідки та насоси, ротор, цементувальні насоси) використовують тиристорні системи управління. В підрулюючих пристроях здебільшого застосовують асинхронні двигуни, керовані перетворювачами частоти.

На буровому судні "Наука" російського виробництва (рис. 5.2) встановлено шість головних дизель-генераторів GS типу 12/953 ($S_{\text{ном}} = 3215$ кВА; $U_{\text{ном}} = 6300$ В; $\cos\varphi = 0,7$). Генератор забезпечує живленням дві системи шин, які при нормальному режимі експлуатації постійно з'єднані між собою. Два з шести генераторів (GC1 і GC6) можуть перемикатися з однієї системи шин на іншу. В ходовому режимі, в режимах постановки на точку буріння, зняття з точки буріння і при випробуванні свердловини працюють чотири дизель-генератори, при спуско-підйомних операціях, бурінні й цементуванні – п'ять.

Від шин високовольтного ГРЩ1 отримують живлення два гребних синхронних електродвигуни ГЕД1, ГЕД2 типу СДСГ-18-6У-360М5 ($P_{\text{ном}}=2500$ кВт) і п'ять синхронних електродвигунів ПУ1...ПУ5 підрулюючих пристроїв ($P_{\text{ном}}=1400$ кВт). Коефіцієнт завантаження ГЕД в режимі штормового відстою становить 0,67, в інших режимах – 0,34; двигунів підрулюючих пристроїв (ПП) в штормовому відстої – 0,5, в інших режимах – 0,4.

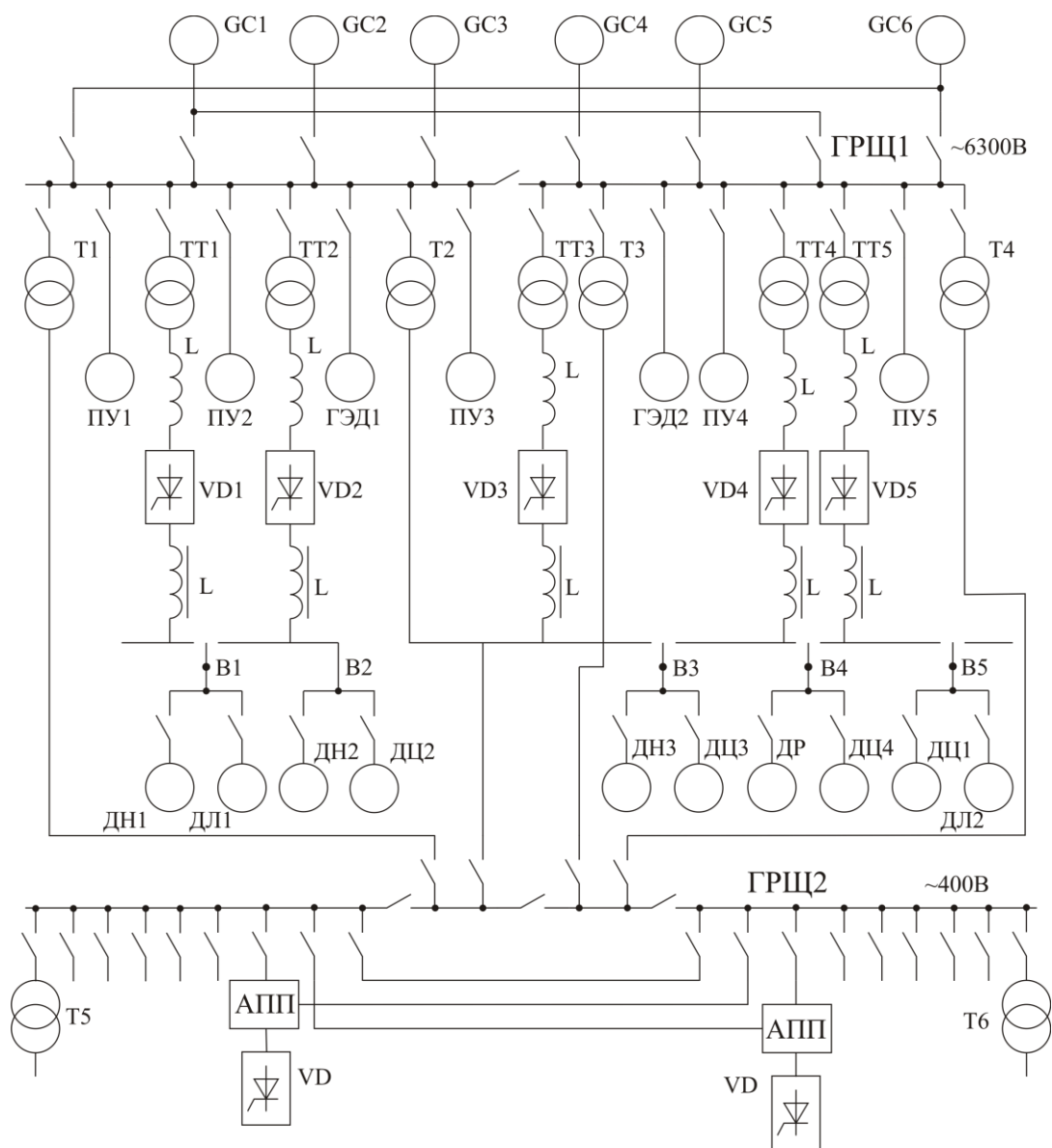


Рис. 5.2. Схема електростанції бурового судна «Наука»

Технологічний комплекс містить 10 електродвигунів постійного струму головних електроприводів: ДЛ1, ДЛ2 – електродвигуни бурової лебідки ($P_{\text{ном}}=800$ кВт); ДН1...ДН2 – бурові насоси ($P_{\text{ном}}=1000$ кВт); ДЦ1...ДЦ2 – цементувальні насоси; ДР – електродвигун ротора ($P_{\text{ном}}=500$ кВт). Всі електродвигуни поділені на п'ять груп, причому в кожній групі може одночасно працювати лише один двигун. При розподілі двигунів по групах враховуються технологічні вимоги одночасності роботи механізмів. Силкові перемикачі В1...В5 використовують лише для набору схеми, тобто для вибору сполучення агрегатів, які передбачається використовувати

протягом більш-менш тривалого періоду часу. Основні режими роботи головних електроприводів наступні: буріння – VD1...VD3 працюють на ДН1...ДН3, VD4 на ДР або ДЦ4; спуско-підйомні операції – випрямлячі VD1 і VD5 працюють на ДЛ1 і ДЛ2, або один VD5 на ДР; в режимі цементування – VD2...VD5 працюють на ДЦ1...ДЦ4, а VD1 – на ДН1.

На судах, як і в промислових установках, найбільш поширені випрямлячі. Їх використовують для живлення силового навантаження загального призначення, в зарядних і зварювальних агрегатах, в системах катодного захисту корпусу судна, в системах збудження електричних машин, в валогенераторних установках. Все більший розвиток отримує тиристорний електропривід в різних областях суднового електрообладнання.

Залежно від призначення виділяють наступні типи суднових напівпровідникових перетворювачів.

- Випрямлячі загального призначення для живлення суднового силового навантаження постійним струмом, що виконуються здебільшого із стабілізацією випрямленої напруги.

- Зарядні випрямні агрегати, призначені для зарядки акумуляторних батарей. У перетворювачах даного типу стабілізується випрямлений струм. Виготовляють також зарядно-силові агрегати, що застосовуються як для зарядки акумуляторних батарей, так і для живлення силового навантаження, в результаті чого підвищується ефективність їх використання.

- Випрямні агрегати для електрозварювання, що забезпечують регулювання зварювального струму в широких межах.

- Перетворювачі для живлення систем катодного захисту корпусу судна, які усувають електрохімічну корозію частини корпусу судна, що знаходиться в морській воді.

- Випрямлячі для систем збудження суднових електричних машин, що використовуються в системах самозбудження і компаундування суднових синхронних генераторів, і для живлення обмоток збудження двигунів постійного струму.

У більшості суднових перетворюючих пристроях використовують 3-фазну мостову схему, що пояснюється високим середнім значенням випрямленої напруги і відносно малим коефіцієнтом пульсацій, високим ступенем використання трансформатора та вентилів в цій схемі.

Як вже відмічалось раніше, відмінною особливістю газодизель-генераторних агрегатів є те, що в якості приводних двигунів в них використовуються газові двигуни, тобто двигуни, в яких у якості палива використовується природний газ. Усталений режим роботи двигуна може порушуватися в результаті зміни кількості енергії на підведенні або відведенні, коли порушується рівність ефективного моменту і моменту опору. При цьому фактори, що послужили причинами зміни моментів можуть діяти короткочасно (пропуск спалаху в циліндрі) і тривалий час. Якщо після припинення дії факторів зміни ефективної потужності або потужності опору рівність моментів не виконується, то усталений режим не відновлюється і двигун працює нестійко.

Забезпечення високої якості електроенергії на вході та виході напівпровідникових перетворювачів набуває все більшого значення з огляду на те, що на сучасному етапі технічного розвитку майже половина генерованої в світі електроенергії перед кінцевим використанням піддається перетворенню своїх параметрів [89]. Значний внесок у вирішення проблеми підвищення якості електроенергії на вході та виході напівпровідникових перетворювачів частоти і напруги внесли вітчизняні вчені: А.К. Шидловський, М.М. Юрченко, Є.І. Сокол, Г.Г. Півняк, В.Г. Кузнецов, О.В. Новосельцев, В.Ю. Тонкаль, А.А. Щерба, П.Д. Андрієнко, В.Я. Жуйков, Г.С. Зінов'єв, К.О. Липківський, В.І., А.В. Переверзєв, В.С. Руденко, В.І. Сенько, М.С. Комаров, І.А. Баховцев, В.М. Берестов, Д.Б. Ізосімов і багато інших.

В сучасних електроенергетичних установках, де потрібна велика точність підтримки якості електроенергії, повинні застосовуватися спеціальні системи керування і регулювання напівпровідниковими перетворювачами. На сучасному судні використовується багато

електричного обладнання, що має потужності сумірні з потужністю самого генератора. При пуску і відключенні асинхронних двигунів виникають проблеми з якістю електроенергії. Провали і сплески напруги й частоти в судновій електромережі під час пуску/відключення двигунів перевищують в окремих випадках норми Морського Регістру в два рази [1]. Крім того, коливання частоти обертів газодизелів призводять до нестабільності вихідної напруги напівпровідникових перетворювачів електроенергії. Тому актуальним є розробка ефективних структур і алгоритмів керування напівпровідниковими перетворювачами електроенергії для компенсації частоти коливань напруги. Основними шляхами підвищення якості електроенергії є пасивна фільтрація вихідної напруги і вхідного струму, збільшення числа рівнів вхідного джерела живлення (еквівалентного числа фаз), застосування активних фільтрів та модифікація існуючих і створення нових методів широтно-імпульсної модуляції [89].

5.2. Модельні дослідження впливу процесу комутації навантаження на якість електроенергії

Однією з причин появи провалів і сплесків напруги і частоти є зміна навантаження суднової електростанції, особливо при пуску потужних асинхронних двигунів. Принциповим аспектом роботи електроенергетичної системи є випадковий характер вхідного потоку заявок на комутацію навантаження. Тому актуальним завданням є побудова адекватної моделі газодизель-генераторного агрегату в складі моделі електроенергетичної установки для дослідження впливу процесів комутації навантаження на якість електроенергії, яка в подальшому може бути використана для вирішення завдань підвищення ефективності подавлення перешкод в замкнутих системах з напівпровідниковими перетворювачами.

Для оцінки ступеня впливу коливань частоти на якість вихідної напруги керованих випрямлячів розроблений ряд моделей в пакеті Matlab-Simulink. Для забезпечення режиму випадкових коливань частоти оберти

генератора керуються від генератора випадкових значень, який включає в себе генератор білого шуму (Noise generator), і фільтр низьких частот (TFN_O), який задає характер спектральної щільності керуючого сигналу відповідно до відомого виразу:

$$S_{\text{бел}}(\omega) = N|W(j\omega)|^2,$$

де N – інтенсивність (дисперсія) білого шуму; $W(j\omega)$ – комплексний коефіцієнт передачі фільтра.

При застосуванні фільтра першого порядку з аперіодичною ланкою вигляду:

$$W(j\omega) = \frac{1}{Tj\omega + 1},$$

отримаємо спектральну щільність:

$$S(\omega) = \frac{\alpha}{\omega^2 + \alpha^2},$$

де $\alpha = \frac{1}{T}$.

При застосуванні фільтрів другого порядку вигляду:

$$W(j\omega) = \frac{1}{1 - \omega^2 T_1^2 + j\omega T_2},$$

отримаємо спектральну щільність:

$$S(\omega) = \frac{\alpha}{(\omega^2 - \beta^2) + \alpha^2}.$$

Для генерації комутаційних (динамічних) сплесків/провалів частоти і напруги генератора використовується генератор випадкових чисел Random number, фільтр нижніх частот TFN_0, перемикач switch1, який підключає навантаження до мережі.

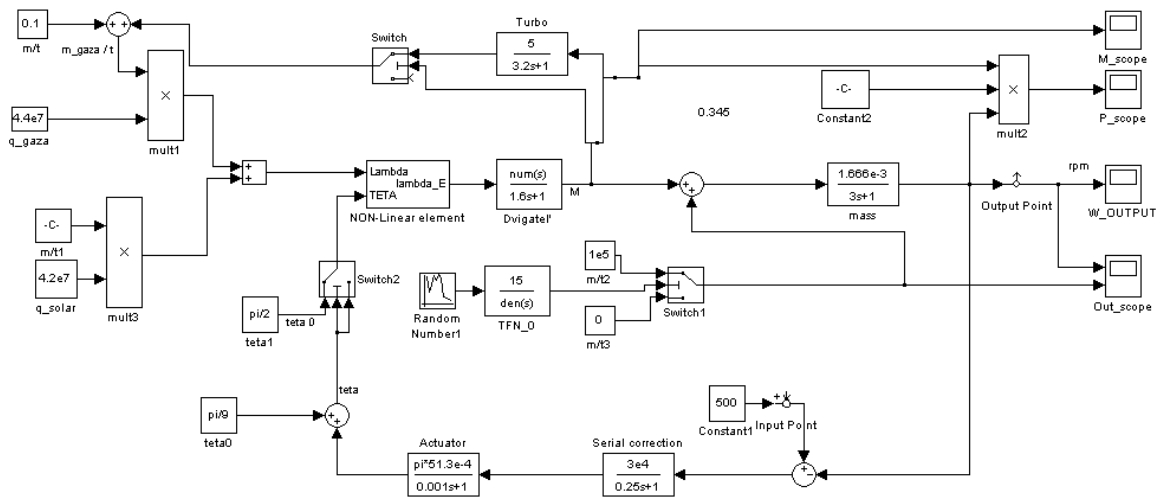


Рис. 5.3. Модель дизель-генератора для дослідження процесів комутації навантаження

Параметри сплесків і провалів з точки зору теорії випадкових процесів в такому випадку можуть розглядатися як викиди випадкового процесу за заданий рівень A_3 протягом певного інтервалу часу. З діаграми комутації навантажень [5] можемо скористатися такими даними, як частота викидів f_B за рівень A_3 протягом певного часового інтервалу, середня кількість викидів N_B за обраний часовий інтервал T_B , середня тривалість викидів t_B на рівні 0,5 амплітуди сплеску або провалу; ймовірність перевищення випадковим процесом рівня A_3 ($P(x > A_3)$), ймовірність появи викиду в інтервалі Δt .

На рис. 5.4 представлений результат моделювання процесу комутації навантаження і його вплив на оберти приводного двигуна.

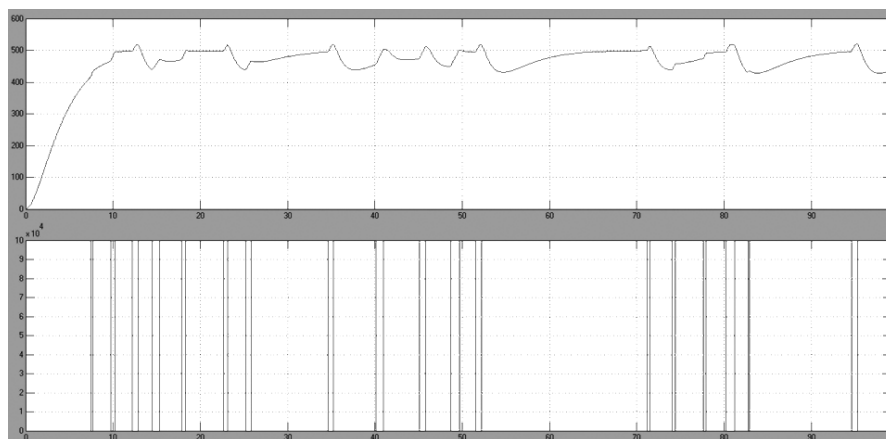


Рис. 5.4. Вихідна частота обертання вала газодизеля при комутації навантаження

Таким чином, знаючи величину f_b , яка може бути визначена з діаграм комутації навантаження, можна за допомогою залежності $\phi(A_n)$ розрахувати значення кореляційної функції при заданому параметрі A_n . Однак цей параметр не визначений. Визначити його можна використовуючи параметр середньої тривалості викідів τ_c :

$$\tau_c = P(x > A_3) / f_b,$$

звідки

$$P(x > A_3) = \tau_c \cdot f_b.$$

Тут ймовірність перевищення випадковим процесом рівня A_3 визначається за відомою формулою:

$$P(x > A_3) = \int_{-\infty}^{A_3} \omega(x) dx = 1 - \Phi(A_3).$$

З цієї формули, якщо відома ймовірна величина кількості імпульсів за певний інтервал часу, знаходиться σ_x , після чого можна обчислити a_x^2 .

5.3. Дослідження впливу коливань частоти на якість випрямленої напруги

Коливання частоти являють собою перешкоду, яка безпосередньо впливає на кут регулювання випрямляча. При коливаннях частоти напруги газодизель-генераторних агрегатів кут управління випрямлячем може змінюватися до 10-15% від встановленого в бік збільшення або зменшення, що призведе до значних коливань вихідної напруги випрямляча. У першому наближенні ці коливання можна оцінити виходячи з відомої формули:

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \cos \alpha,$$

для якої приймемо, що $\alpha_1 = \alpha_0 + \Delta\alpha$. Тоді

$$U_{d\alpha} = U_{d0} (\cos \alpha_0 + \Delta\alpha \sin \alpha_0),$$

звідки виходить, що коливання частоти в першому наближенні можна розглядати як адитивну перешкоду. З урахунком цих формул можемо визначити вираз для оцінювання випадкового характеру коливань напруги при коливаннях частоти:

$$Ud(\tau) = U_{d0}^2 e^{-\sigma_a^2 |\tau|} \cos^2 \alpha_0 + \sigma_a^2 U_{d0}^2 e^{-\sigma_a^2 |\tau|} \sin^2 \alpha_0.$$

Виконаємо оцінку впливу коливань частоти на середнє значення випрямленої напруги. Проінтегруємо випрямлену напругу m -імпульсного випрямляча на періоді (напівперіоді) мережевої напруги:

$$\dot{U}_{d\alpha} = \frac{jm}{T} \left[\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} u_{ce}(t) dt + \int_{\alpha_2}^{\alpha_3} u_{ce}(t) dt + \int_{\alpha_3}^{T/2+\alpha_1} u_{ec}(t) dt \right],$$

де

$$U_{AB}(t) = U_{AB} \sin \omega t = U \sin \omega t,$$

$$U_{BC}(t) = U_{BC} \sin \omega(t + T_1) = U \sin \omega(t + T_1),$$

$$U_{CA}(t) = U_{CA} \sin \omega(t + T_3) = U \sin \omega(t + T_3).$$

Після перетворень знаходимо:

$$U_{d\alpha} = \frac{U}{\pi} [\cos \omega \alpha_1 + \cos \omega(\alpha_3 + T_1) + \cos \omega(\alpha_2 + T_3)]. \quad (5.1)$$

Рівноінтервальні системи управління характеризуються тим, що кути включення α для кожного випрямляча зсуваються на однакову величину, що дорівнює T/m . Тому

$$\left. \begin{aligned} \alpha_2 &= \alpha_1 + \frac{T}{m} \\ \alpha_3 &= \alpha_1 + \frac{2T}{m} \end{aligned} \right\}. \quad (5.2)$$

Вираз (5.1) з урахуванням (5.2) набуде вигляду:

$$U_{d\alpha} = \frac{U}{A} \left\{ \left[\cos \frac{\omega}{\omega_0} \alpha + \cos \left[\frac{\omega}{\omega_0} \left(\alpha + \frac{2T}{m} \right) + T_1 \right] + \cos \left[\frac{\omega}{\omega_0} \left(\alpha + \frac{T}{m} \right) + T_3 \right] \right] \right\}. \quad (5.3)$$

Прийнявши $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$, а також враховуючи те, що при наведених коливаннях частоти значення T_1, T_2, T_3 можна прийняти приблизно рівними

$$T_1 = T_2 = T_3 = T_2 / 3,$$

вираз (5.3) представимо у вигляді:

$$\Delta U = \frac{3 \cdot \Delta\omega}{\omega_0} U \left(1 + \frac{\alpha_0}{\pi} \right) \sin \alpha_0. \quad (5.4)$$

Для синхронних систем керування з накопичуючим лічильником вираз розрахунку відхилення напруги має вигляд:

$$\Delta U_{d\alpha} = \frac{3}{\pi} U \cos \frac{\Delta \omega}{\omega_0} \alpha_0. \quad (5.5)$$

Формули (5.4) і (5.5) можемо представити у відносних одиницях, прийнявши за базову напругу некерowanego випрямляча:

$$U_{d0} = \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} U = \frac{3}{\pi} U, \quad (5.6)$$

або середнє значення випрямленої напруги при куті α_0 і частоті ω_0 :

$$U_{d\alpha} = \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} U \cos \alpha_0 = \frac{3}{\pi} U \cos \alpha_0.$$

В цьому випадку формули (5.4) і (5.5) перетворюються до вигляду:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U^* &= \pi \frac{\Delta \omega}{\omega_0} \left(1 + \frac{\alpha}{\pi}\right) \sin \alpha_0 \\ \Delta U^* &= \cos \frac{\Delta \omega}{\omega_0} \alpha_0 \end{aligned} \right\},$$

при базовій напрузі (5.6):

$$\left. \begin{aligned} \Delta U^* &= \pi \frac{\Delta \omega}{\omega_0} \left(1 + \frac{\alpha_0}{\pi}\right) \operatorname{tg} \alpha \\ \Delta U^* &= \frac{\cos \frac{\Delta \omega}{\omega_0} \alpha_0}{\cos \alpha_0} \end{aligned} \right\}.$$

За отриманими формулами можна визначити величини відхилень напруги для різних значень α_0 і $\Delta \omega_0$.

Коливання вихідної напруги випрямляча при випадкових коливаннях частоти, викликаних як комутацією навантаження, так і нестабільністю обертів газодизельного агрегату, наведені на рис. 5.5. Збільшення періоду коливань (тобто зниження частоти через підключення потужного споживача електроенергії) призводить до зменшення кута управління та підвищення випрямленої напруги.

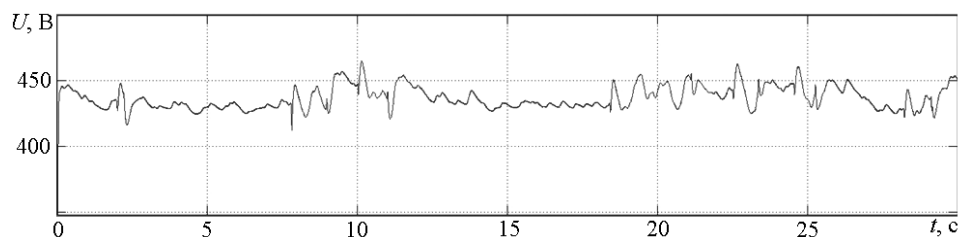


Рис. 5.5. Осцилограма вихідної напруги випрямляча

5.3.1. Дослідження статичних характеристик випрямляча

На рис. 5.6 представлена MATLAB-модель перетворювача, що складається з тиристорного мостового керованого випрямляча, вихідного LC -фільтра і навантаження.

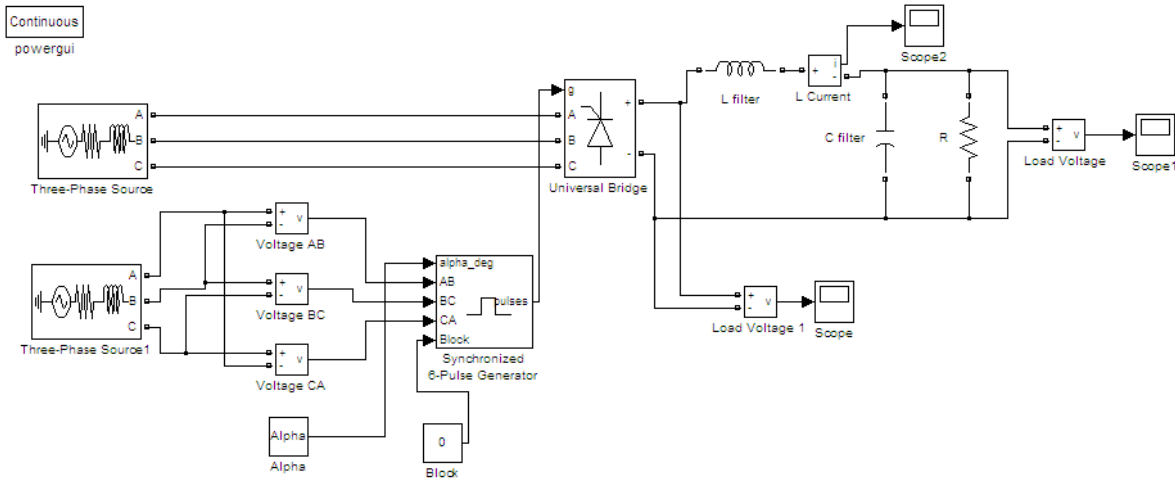


Рис. 5.6. MATLAB-модель для дослідження джерела живлення

На рис. 5.7 представлені статичні характеристики випрямляча, по яким визначається вплив зміни напруги мережі живлення на середнє значення випрямленої напруги при різних кутах керування.

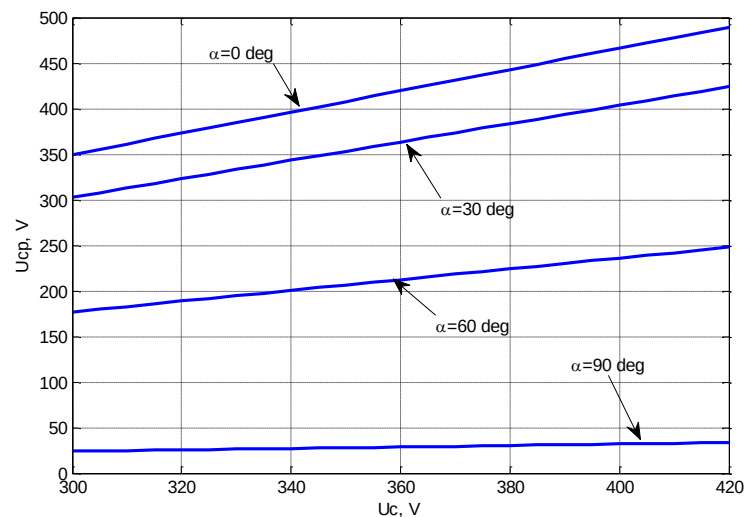


Рис. 5.7. Залежність вихідного середнього значення випрямленої напруги U_{cp} від напруги мережі живлення $U_{c \text{ ном}}$ при різних кутах α

На рис. 5.8 представлені залежності зміни середнього значення випрямленої напруги від зміни частоти мережі живлення при різних кутах керування.

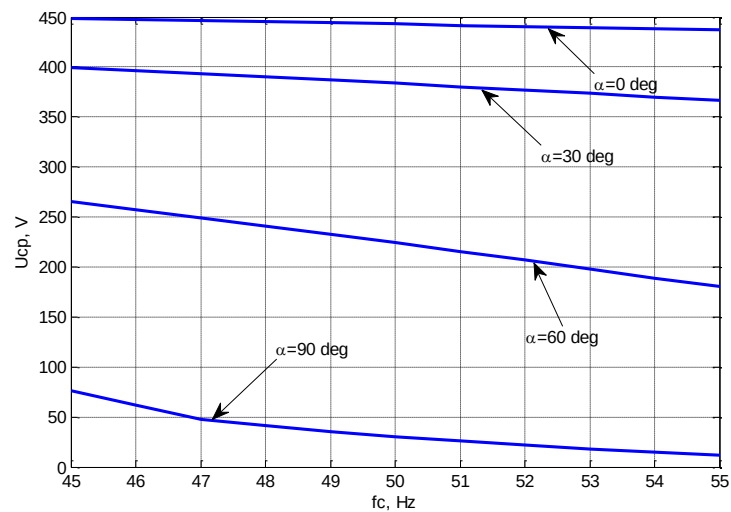


Рис. 5.8. Залежність середнього значення випрямленої напруги U_{cp} від частоти мережі живлення f_c при різних кутах α

5.3.2. Робота синхронної системи фазового керування в умовах коливань частоти

Вплив коливань частоти на роботу керованих випрямлячів здійснюється через систему фазового управління випрямлячем, алгоритм роботи якої представлений на рис. 5.9, а. На рис. 5.9, б, представлений алгоритм підпрограми формування керуючих імпульсів.

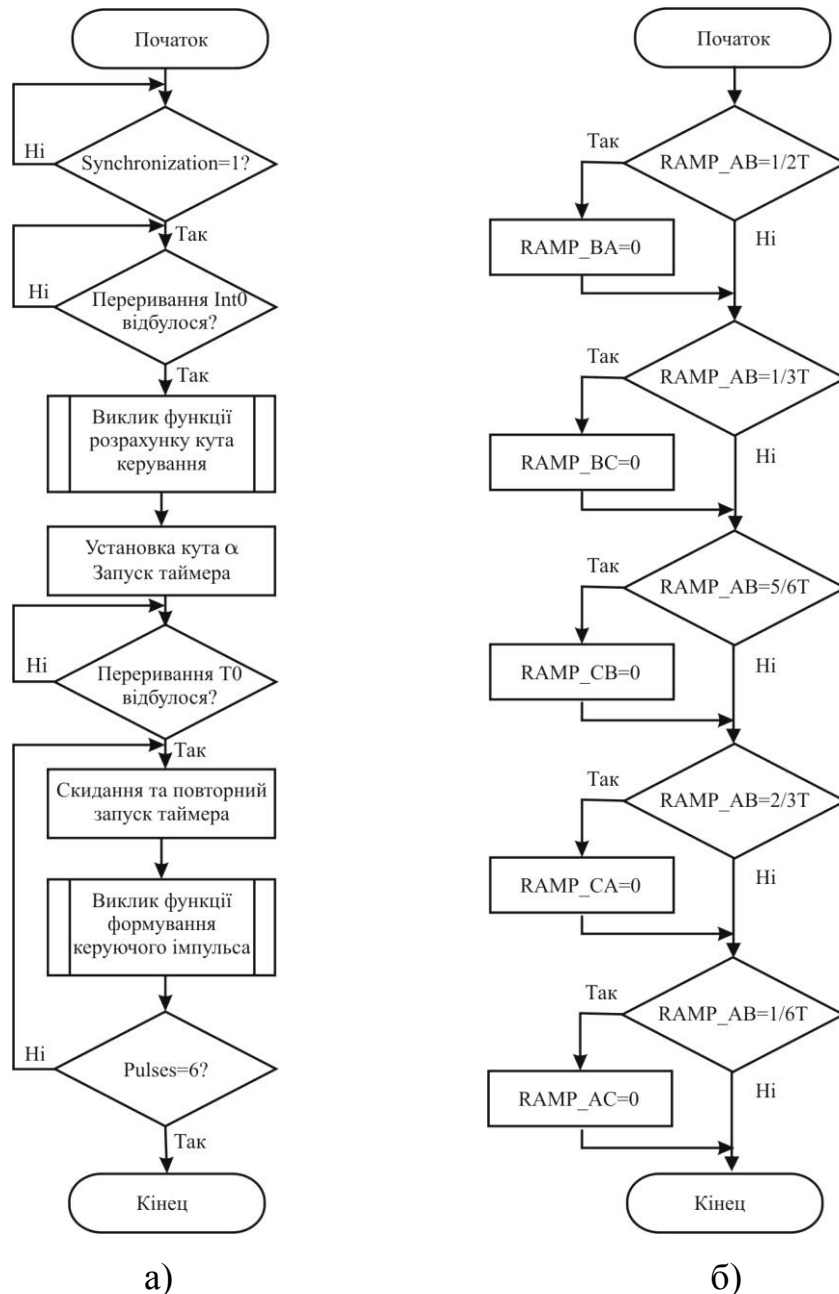


Рис. 5.9. Блок – схеми алгоритмів:

а – формування імпульсів; б – функція формування імпульсів

Схемотехнічно пристрій отримує синхронізуючі імпульси для фази АВ, оскільки синхронізацію інших фаз слід проводити програмно, аналізуючи часові інтервали. Як лічильники виступають змінні RAMP_AB, RAMP_BC, RAMP_CB, RAMP_BA, RAMP_AC, RAMP_CA. Формування кута регулювання здійснюється інкрементуванням коду таймера з постійною тактовою частотою T_K , що не залежить від частоти мережі. За інтервал

частоти мережі T_0 в таймері буде встановлений код, значення якого визначається за допомогою виразу:

$$N = \frac{T_0}{T_K}.$$

Якщо період мережі зміниться, наприклад, зросте до величини T_1 , то й значення коду таймера також зміниться до значення:

$$N_1 = \frac{T_1}{T_K},$$

причому для розглянутого випадку $N_1 > N$. Оскільки для визначення кута регулювання α від таймера порівнюється з кодом, пропорційним напрузі управління, то

$$\alpha = \frac{N_\alpha}{N} = N_\alpha \frac{T_K}{T_0}$$

При збільшеному періоді, отримаємо:

$$\alpha_1 = \frac{N_\alpha}{N_1} = N_\alpha \frac{T_K}{T_1} = \alpha \frac{T_0}{T_1} = \alpha \frac{f_1}{f_0}.$$

Значення кореляційної функції коливань частоти має вигляд:

$$\beta_j(\varepsilon) = U_{d0}^2 e^{-\sigma_a^2} \cos^2 \alpha_0 + \sigma_a^2 U_{d0}^2 e^{\sigma_a^2} \sin^2 \alpha_0 e^{-\beta|\varepsilon|}.$$

Порівнюючи отриманий вираз з кореляційною характеристикою випрямленої напруги бачимо, що з точністю до складових вищого порядку вони збігаються. Таким чином, коливання частоти безпосередньо впливають на величину випрямленої напруги, і характер її спектра не змінюється.

Для перевірки отриманих результатів скористаємося моделюванням з використанням пакета Matlab-Simulink. На рис. 5.10 представлена Matlab-модель електроенергетичної установки, яка містить елементи, що дозволяють отримати різкі зміни частоти напруги і аналізувати вплив цього процесу на роботу випрямляча. Модель дозволяє синтезувати випадковий процес, що дозволяє забезпечити генерацію викидів із заданими часовими параметрами.

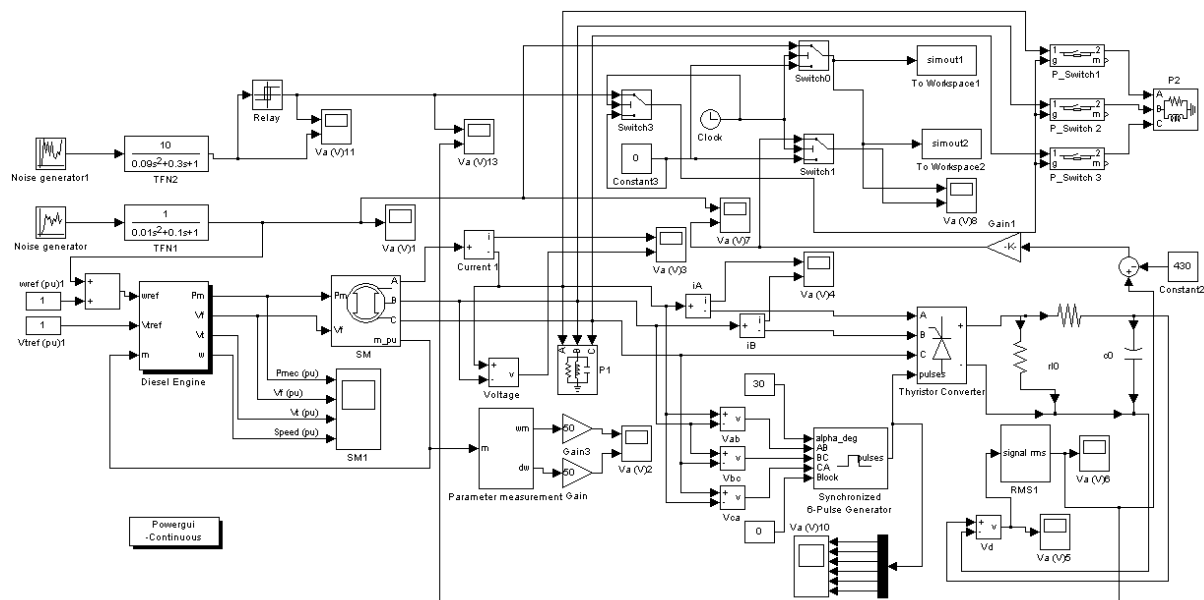


Рис. 5.10. Matlab-модель електроенергетичної установки

Представлена модель складається з моделі дизеля (Diesel engine) і моделі синхронного генератора (SM). До виходу синхронного генератора підключено тиристорний випрямляч (Thyristor Converter), який управляється синхронною системою імпульсно-фазового управління (Synchronized 6-Pulse Generator). До виходу тиристорного випрямляча підключено навантаження (r_{l0}), діюча напруга на якій є вихідним параметром моделі. За допомогою блоків Noise Generator реалізований генератор випадкового сигналу, вихід якого підключений до керуючого входу дизельного двигуна. В результаті на виході дизеля виникають коливання обертів, які носять випадковий характер. Адекватність такого рішення підтверджується результатами, отриманими в [3].

Таким чином, з урахуванням коливань частоти мережі, система фазового управління може бути представлена ланкою, структура якої наведена на рис. 5.11.

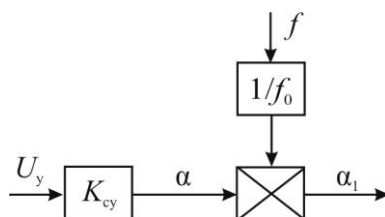


Рис. 5.11. Структура ланки системи фазового управління

Коливання частоти є мультипликативною перешкодою, яка безпосередньо впливає на кут регулювання випрямляча. При коливаннях частоти напруги газодизель-генераторних агрегатів кут управління випрямлячем може змінюватися до 10-15% від встановленого в бік збільшення або зменшення, що призводить до значних коливань вихідної напруги випрямляча.

5.3.3. Вплив коливань частоти на роботу випрямлячів з асинхронними системами фазового керування

Розглянуті у попередніх параграфах особливості роботи випрямлячів з синхронними СКВ показали значну їх «чутливість» до коливань частоти, неприпустиму в багатьох випадках для живлення споживачів. Наприклад, стосовно суднових споживачів це може призвести до неприпустимих коливань баллера керма, коливань моменту вантажопідйомних і швартових механізмів.

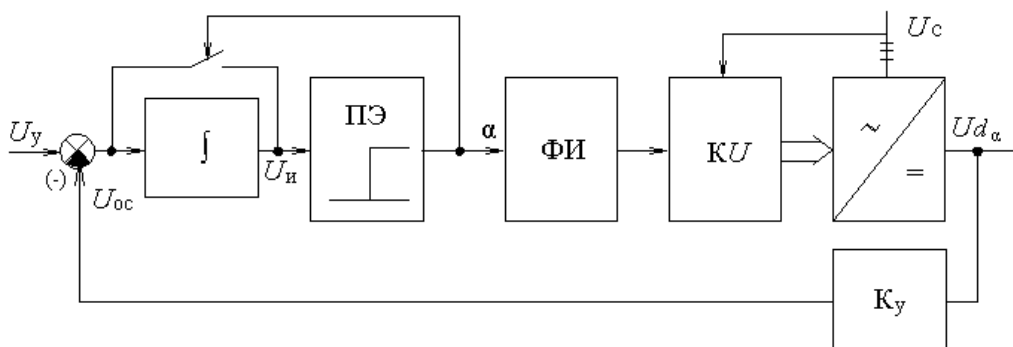


Рис. 5.12. Структурна схема перетворювача з асинхронною СКВ

Виконаємо аналіз одного з найбільш поширених алгоритмів керування випрямлячами, що забезпечує роботу перетворювача у функції інтеграла помилки з нульовими початковими умовами на кожному інтервалі дискретності.

На рис. 5.12 представлена структурна схема перетворювача з асинхронною СКВ, а на рис. 5.13 – часові діаграми, що пояснюють особливості алгоритму управління.

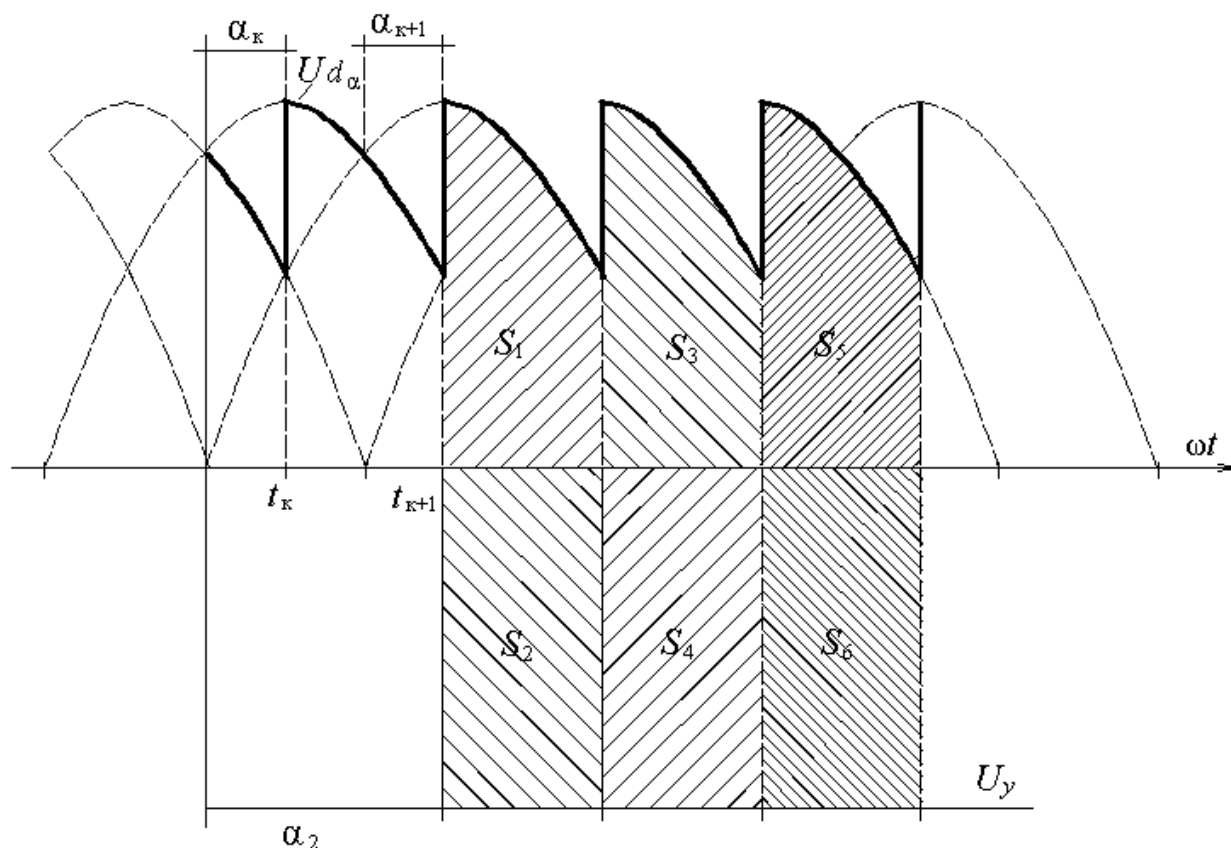


Рис. 5.13. Часові діаграми роботи асинхронної СФК

Робота схеми, зображеної на рис. 5.13, полягає в тому, що різниця напруги $U_y - U_{oe}$ інтегрується інтегратором, результат якого U_u контролюється пороговим елементом ПЕ. При досягненні певного рівня U_u Пороговий елемент спрацьовує і обнуляє інтегратор. Математична форма запису роботи системи управління має вигляд:

$$\int_0^T [U_y - U_{d\alpha}^*(\omega t)] \cdot d\omega t = U_{\Pi},$$

де $U_{d\alpha}^*(\omega t)$ – поточне відносне (по відношенню до $U_{d\alpha}$) значення напруги, U_{Π} – порогове значення напруги комутатора.

Прийmemo, що середнє значення випрямленої напруги визначається відповідною зміною кута регулювання α . Тоді для номінального періоду T_0 і поточного T можемо записати:

$$\left. \begin{aligned} U_{d\alpha n}^* &= \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha \\ U_{d\alpha}^* &= \frac{m}{\pi} \frac{T_0}{T} \sin \frac{\pi}{m} \frac{T_0}{T} \cos \alpha_x \end{aligned} \right\} \quad (5.7)$$

де α_x – значення кута регулювання, величина відхилення якого від α еквівалента зміні випрямленої напруги $U_{d\alpha}^*$ від $U_{d\alpha n}^*$.

Рішення (5.7) відносно α_x дає:

$$\cos \alpha_x = \frac{T}{T_0} \frac{\sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha}{\sin \frac{\pi}{m} \frac{T}{T_0}} \approx \frac{\omega_0}{\omega} \cos \alpha, \quad (5.8)$$

або

$$\alpha_x = \arccos \frac{\omega_0}{\omega} \cos \alpha. \quad (5.9)$$

Таким чином, в асинхронних структурах вплив коливань частоти на випрямлену напругу носить нелінійний характер і суттєво залежить від номінального кута включення. Однак таке визначення ступеня впливу коливань частоти для розглянутого випадку не є достатнім, оскільки ми маємо справу з замкненою динамічною системою. У даному випадку необхідно враховувати також ступінь впливу стабілізуючого зворотного зв'язку на роботу випрямляча.

З цієї позиції замкнену структуру з керованим випрямлячем можна розглядати з двох точок зору:

– як дискретну замкнену систему стабілізації випрямленої напруги. В такому варіанті вона зазвичай використовується для управління електроприводами;

– як систему фазового автоналаштування частоти. У такому розумінні вона ніколи не розглядалася. Ідея такого розглядання частот в тому, що

інтегратор та релейний елемент є автогенератором, що підлаштовується. В якості еталонного генератора використовується частота мережі. Випрямляч виконує функцію нелінійного фазового детектора.

Динамічна модель дискретної замкненої системи стабілізації випрямленої напруги представлена на рис. 5.14.

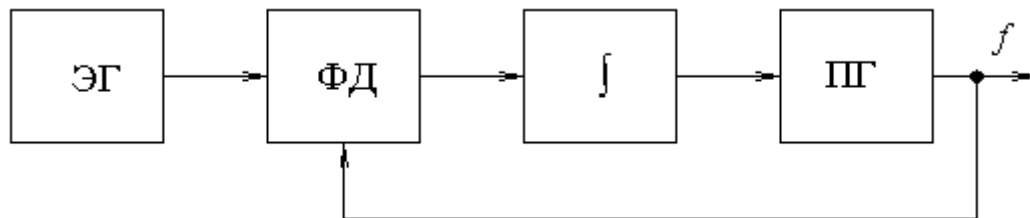


Рис. 5.14. Модель системи стабілізації випрямленої напруги

Ця модель отримана на основі дискретної динамічної моделі випрямляча з урахуванням розглянутого впливу коливань напруги.

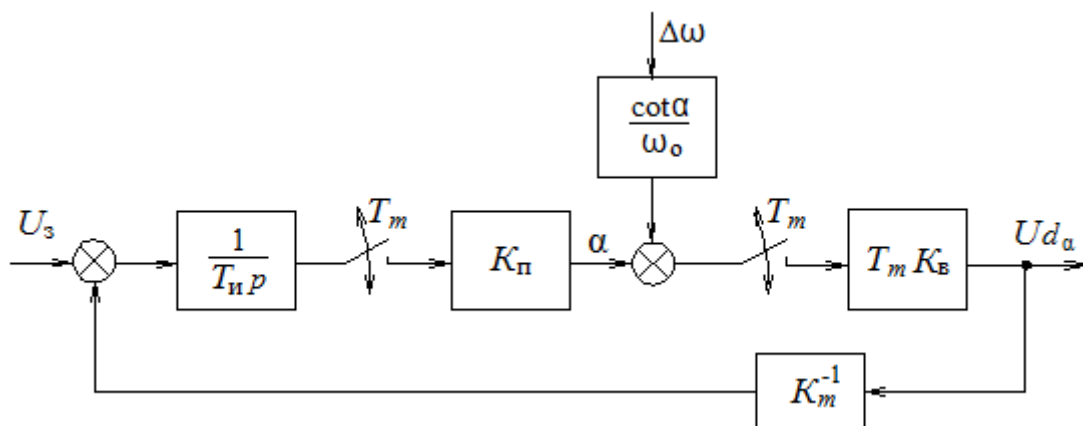


Рис. 5.15. Динамічна модель випрямляча з асинхронною СКВ

Перша ланка – інтегратор, що інтегрує на інтервалі дискретності різницю напруг $U_y - U_{d\alpha}^*$; K_m – коефіцієнт перетворення; K_v – масштабуючий коефіцієнт; K_n – коефіцієнт перетворення сигналу з інтегратора в кут α . У відповідності до [117]

$$K_n = \frac{Z-1}{Z-F},$$

де F – фактор пульсацій.

Оскільки коливання частоти носять випадковий характер, то скористаємося елементами теорії випадкових процесів і визначимо дисперсію коливань випрямленої напруги при коливаннях частоти, виходячи з їх спектральної щільності на виході випрямляча:

$$\sigma_{U_{d\alpha}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_U(\omega) d\omega = R_{U_{d\alpha}}(0). \quad (5.10)$$

Енергетичний спектр $S_U(\omega)$ коливань випрямленої напруги знаходиться з відомого виразу:

$$S_U(\omega) = |\Phi_z(j\omega)|^2 S_f(\omega), \quad (5.11)$$

де $S_f(\omega)$ – спектральна щільність коливань частоти, значення якої отримано на основі аналізу роботи [100], $\hat{O}_z(j\omega)$ – комплексний коефіцієнт передачі замкненої системи, де входом є $\Delta\omega$, а виходом – $U_{d\alpha}$ (рис. 5.15).

Після перетворень з урахуванням (5.10) й (5.11), знаходимо:

$$(\sigma_{ud\alpha}^*)^2 = \frac{2\sigma^2 \text{ctg}^2 \alpha K_B^2 \hat{E}_i^2}{\omega_0^2 (4a_\omega T_{\hat{E}} + F \frac{\hat{E}_{\hat{A}} \hat{E}_{\hat{I}}}{\dot{a}_\omega \dot{O}_{\hat{E}}}) (2 + F \frac{\hat{E}_{\hat{A}} \hat{E}_{\hat{I}}}{\dot{a}_\omega \dot{O}_{\hat{E}}})}. \quad (5.12)$$

Використовуючи чисельні значення для параметрів a_f та σ_f для автокореляційної функцій затухаючого типу, прийнявши $F=1$, $K_m K_B = \cos \alpha$, отримаємо вираз для перешкоди у випрямленій напрузі, задавши вихідну дисперсію коливань частоти σ_f^2 у відносних одиницях σ_f^2 / ω_0^2 :

$$K_c = \text{ctg} \alpha \sqrt{\frac{\cos \alpha}{\frac{T_m}{T_n} + a\omega T_u}}.$$

З отриманого виразу виходить, що значення дисперсії у випрямленій напрузі в діапазоні кутів регулювання $10 \leq \alpha \leq 70^\circ$ може досягати декількох десятків одиниць.

Фізично це пояснюється тим, що випрямляч є елементом, що характеризується високою чутливістю до різниці фаз мережі та інтегратора асинхронної системи керування. Замкнена структура веде себе як

статистична система фазового автоналаштування частоти і практично усуває низькочастотні коливання.

5.4. Дослідження динамічних характеристик тиристорного випрямляча

На рис. 5.16 приведена перехідна характеристика джерела (розімкнена система) при провалі напруги живлення з 380 В до 350 В (крива 1). Динамічні властивості при цьому визначаються параметрами LC -фільтра і навантаженням.

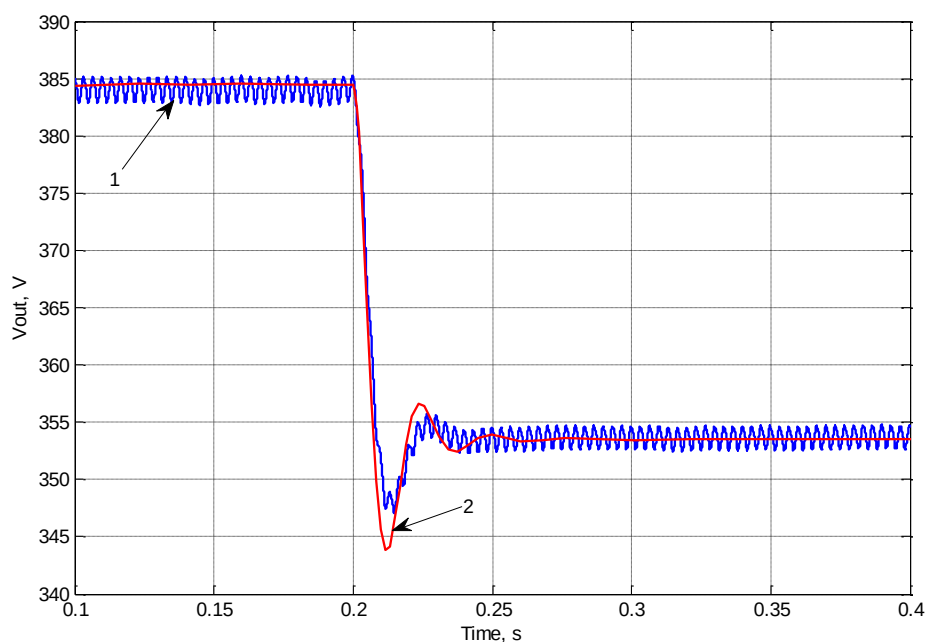


Рис. 5.16. Графік зміни вихідної напруги при провалі напруги живлення з 380 до 350 В

Знайдемо передатну функцію $W_{\phi}(s) = \frac{U_{\text{вих}}(s)}{U_{\text{вх}}(s)}$ для LC -фільтра і навантаження (рис. 5.17).

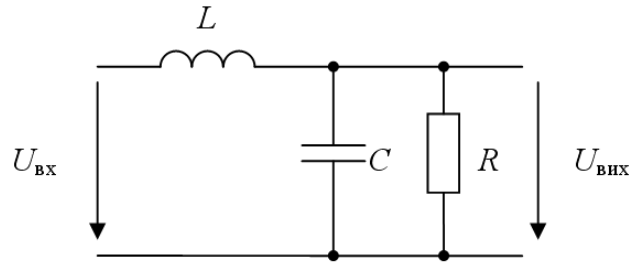


Рис. 5.17. Схема LC -фільтра і навантаження

Передатну функцію W_ϕ найпростіше знайти як:

$$W_\phi = \frac{Z_{\text{вих}}(j\omega)}{Z_{\text{вх}}(j\omega)} \quad (5.13)$$

при заміні оператора $j\omega$ на оператор s . У формулі (5.13) позначені: $Z_{\text{вих}}(j\omega)$ – комплексний вихідний опір, $Z_{\text{вх}}(j\omega)$ – комплексний вхідний опір.

Маємо:

$$Z_{\text{вх}}(j\omega) = j\omega L + \frac{R \cdot \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}}; \quad Z_{\text{вих}}(j\omega) = \frac{R \cdot \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}}. \quad (5.14)$$

Після підстановки (4.14) у (4.13) і заміни $j\omega \rightarrow s$ одержимо:

$$W_\phi(s) = \frac{U_{\text{вих}}(s)}{U_{\text{вх}}(s)} = \frac{1}{LC \cdot s^2 + \frac{L}{R} \cdot s + 1}. \quad (5.15)$$

На рис. 5.16 крива 2 являє собою перехідну характеристику для ланки з передатною функцією W_ϕ . Порівнюючи криві 1 і 2, можна зробити висновок, що перехідні процеси по збуренню (зміні напруги живлення) з достатнім ступенем точності визначаються параметрами LC -фільтра. Отже, смуга пропускання системи визначається частотою зрізу LC -фільтра і складає 400 Гц (рис. 5.18). Високочастотні складові в кривій вихідної напруги 1 обумовлені природою перетворювача.

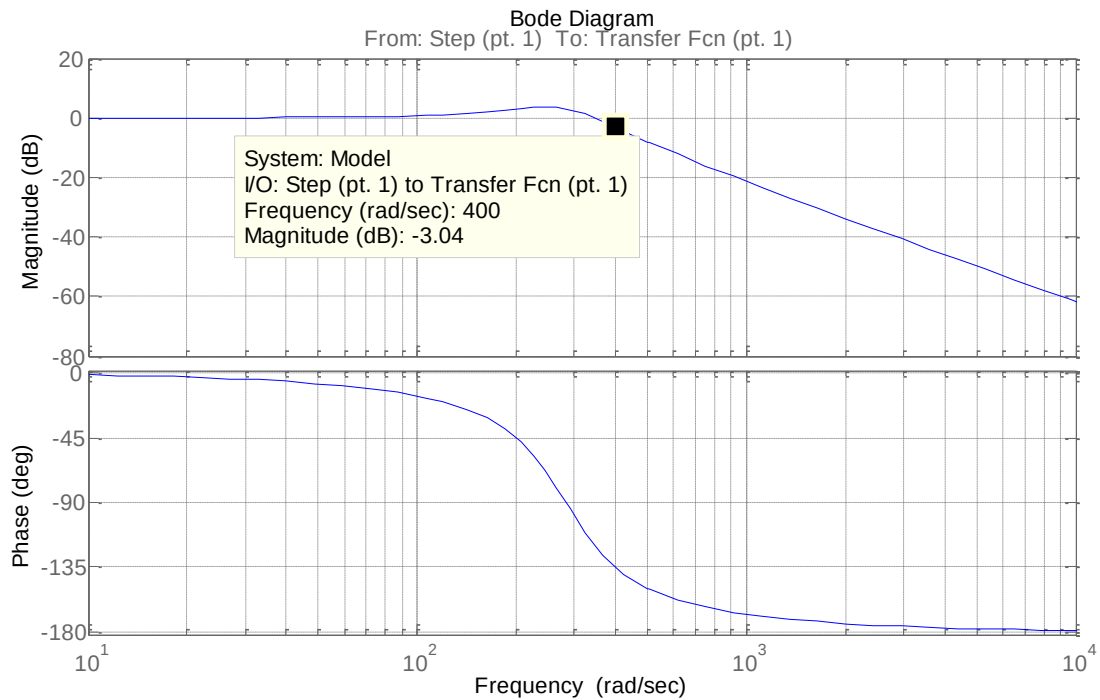


Рис. 5.18. Діаграма Бode для ланки з передатною функцією W_ϕ

Спрощена структура перетворювача представлена на рис. 5.19.

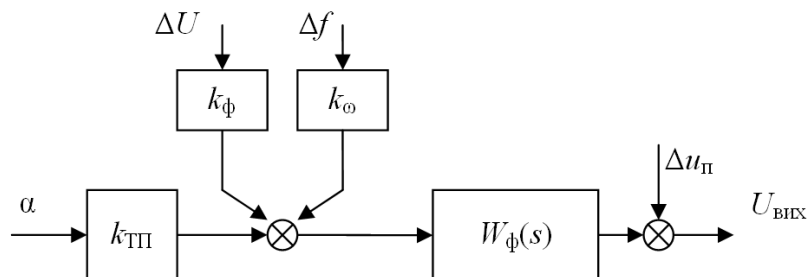


Рис. 5.19. Спрощена структура перетворювача

Як видно з рис. 5.19, зміна діючого значення напруги мережі ΔU і частоти мережі живлення Δf приводить до зміни вихідної напруги $U_{\text{ВЫХ}}$. Пульсації вихідної напруги можна представити як адитивну перешкоду $\Delta u_{\text{П}}$.

5.4.1. Динамічна модель активного фільтра

Для ефективного усунення пульсацій у випрямленій напрузі може бути застосований активний фільтр, загальна схема якого приведена на рис. 5.20.

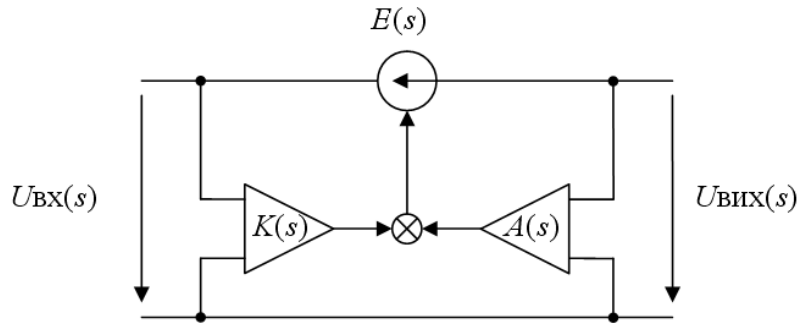


Рис. 5.20. Загальна схема активного фільтра

Знайдемо передатну функцію активного фільтра. По другому закону Кирхгофа маємо:

$$U_{\text{вх}}(s) = E(s) + U_{\text{вих}}(s). \quad (5.16)$$

У свою чергу, ЕРС $E(s)$ дорівнює:

$$E(s) = U_{\text{вих}}(s) \cdot K(s) + U_{\text{вих}} \cdot A(s). \quad (5.17)$$

Підставивши (5.17) у (5.16) знайдемо, що

$$W_{\text{аф}}(s) = \frac{U_{\text{вих}}(s)}{U_{\text{вх}}(s)} = \frac{1 - K(s)}{1 + A(s)}. \quad (5.18)$$

Якщо під вхідною напругою мати на увазі напругу пульсацій $U_{\text{вх}} = U_n$, то для усунення пульсацій у вихідній напрузі $U_{\text{вих}} = 0$, тобто необхідно потребувати, щоб

$$W_{\text{аф}}(s) \rightarrow 0. \quad (5.19)$$

Вираз (5.19) буде виконуватися, якщо

$$K(s) \rightarrow 1, A(s) \rightarrow \infty. \quad (5.20)$$

Розглянемо схему послідовного з'єднання двох фільтрів (рис. 5.21).

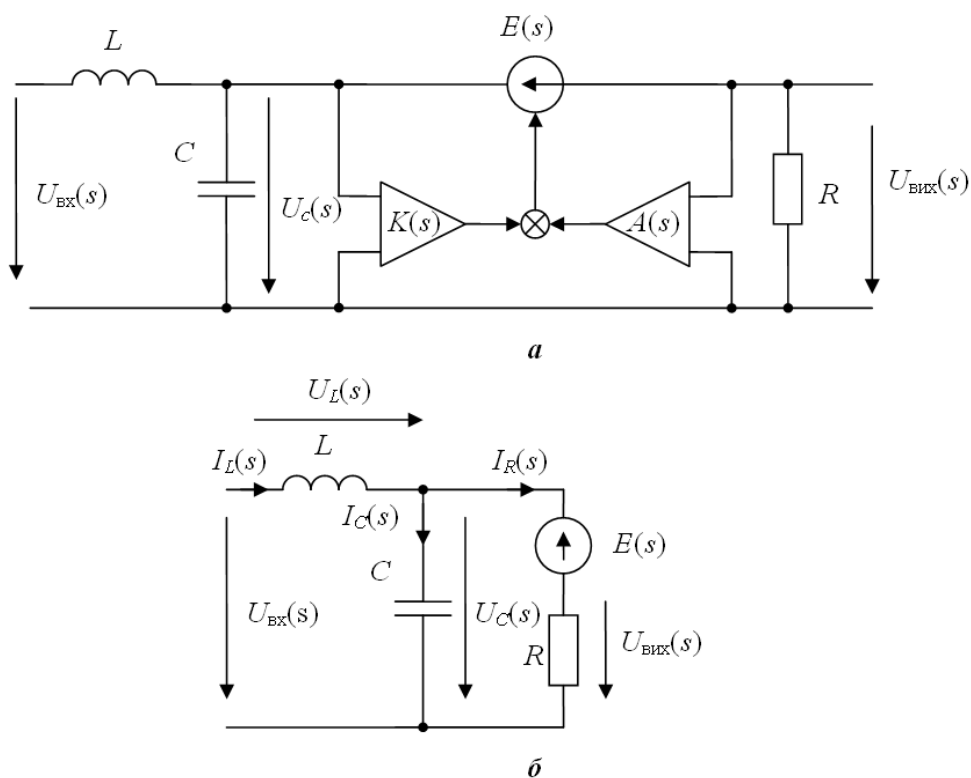


Рис. 5.21. Послідовне з'єднання LC -фільтра, активного фільтра і навантаження: (а) – структурна схема, (б) – розрахункова схема

Для розрахункової схеми (б) можна скласти рівняння за законами Кирхгофа:

$$\begin{cases} U_{\text{вх}}(s) = U_L(s) + U_C(s); \\ U_{\text{вх}}(s) = U_L(s) + E(s) + U_{\text{вих}}(s); \\ i_L(s) = i_C(s) + i_R(s). \end{cases} \quad (5.21)$$

Струми $i_L(s)$, $i_C(s)$, $i_R(s)$ описуються виразами

$$i_L(s) = \frac{U_L(s)}{sL}; \quad (5.22)$$

$$i_C(s) = sC \cdot U_C(s); \quad (5.23)$$

$$i_R(s) = \frac{U_{\text{вих}}(s)}{R}. \quad (5.24)$$

Підставимо в третє рівняння системи (5.21) вираз (5.23) і (5.24).
Одержимо

$$i_L(s) = sC \cdot U_C(s) + \frac{U_{\text{вих}}(s)}{R}. \quad (5.25)$$

Використовуючи (5.25) і (5.22), знайдемо падіння напруги на індуктивності:

$$U_L(s) = sL \cdot \left[sC \cdot U_C(s) + \frac{U_{\text{вих}}(s)}{R} \right]. \quad (5.26)$$

Підставимо в перше рівняння системи (5.21) вираз (5.26), і виразимо $U_C(s)$:

$$U_C(s) = \frac{U_{\text{вих}}(s) - \frac{sL}{R} \cdot U_{\text{вих}}(s)}{1 + s^2 LC}. \quad (5.27)$$

Вхідною напругою для активного фільтра є напруга на конденсаторі $U_C(s)$, тому, використовуючи вираз (5.18), можна записати:

$$U_C(s)[1 - K(s)] = [1 + A(s)] \cdot U_{\text{вих}}(s). \quad (5.28)$$

Підставивши (5.27) у (5.28) одержимо:

$$W(s) = \frac{U_{\text{вих}}(s)}{U_{\text{вих}}(s)} = \frac{1}{\frac{1 + A(s)}{1 - K(s)} \cdot s^2 LC + s \cdot \frac{L}{R} + \frac{1 + A(s)}{1 - K(s)}}. \quad (5.29)$$

Вираз (5.29) перепишемо у виді:

$$W(s) = \frac{W_{\text{аф}}(s)}{\left[LC \cdot s^2 + W_{\text{аф}}(s) \cdot \frac{L}{R} \cdot s + 1 \right]}. \quad (5.30)$$

Розглянемо квадратне рівняння:

$$LC \cdot s^2 + W_{\text{аф}} \cdot \frac{L}{R} \cdot s + 1 = 0. \quad (5.31)$$

Для того, щоб корені рівняння (5.31) не були комплексно-сполученими, необхідно виконати умову:

$$\left(W_{\text{аф}} \frac{L}{R} \right)^2 - 4 \cdot LC > 0. \quad (5.32)$$

Звідки

$$W_{\text{аф}} > 2R \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (5.33)$$

На рис. 5.22 представлена практична схема активного фільтра. Для відсікання постійної складової в схемі присутні RC-ланцюги – фільтри ВЧ.

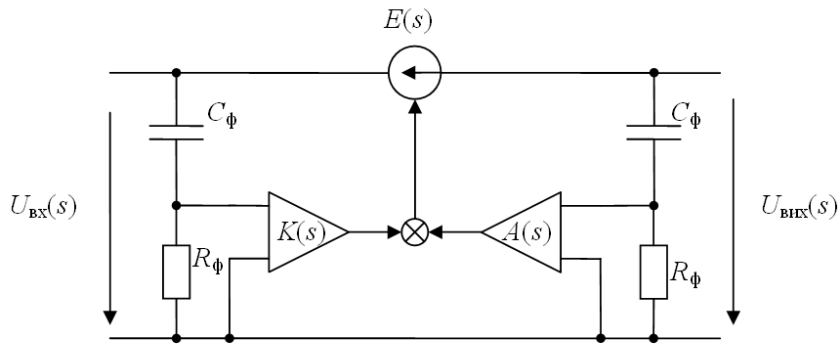


Рис. 5.22. Практична схема активного фільтра

Фільтр ВЧ, що складається з R_ϕ і C_ϕ , має передатну функцію

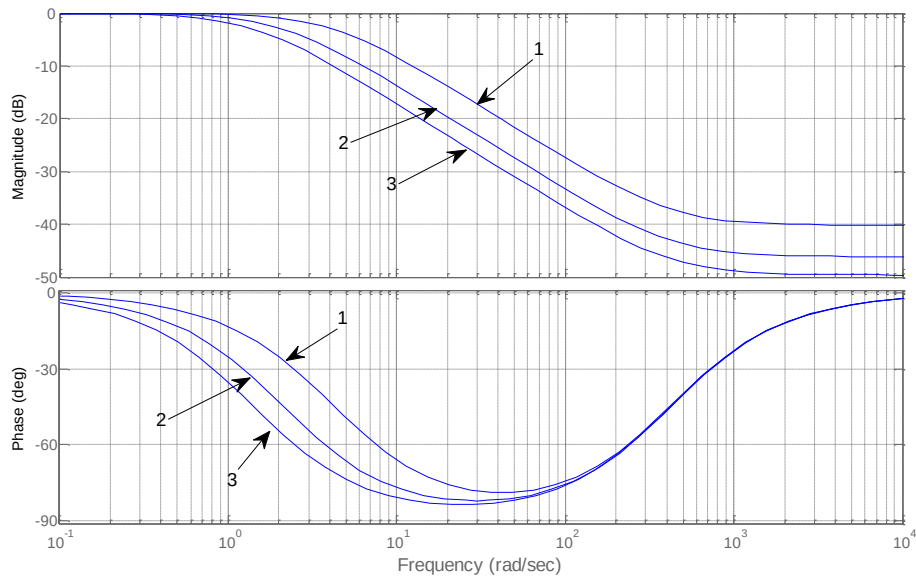
$$W_{RC}(s) = \frac{R_\phi C_\phi \cdot s}{1 + R_\phi C_\phi \cdot s}. \quad (5.34)$$

Тоді передатна функція активного фільтра на рис. 5.22 має вигляд:

$$W_{af}(s) = \frac{U_{вих}(s)}{U_{вх}(s)} = \frac{1 - W_{RC}(s) \cdot K(s)}{1 + W_{RC}(s) \cdot A(s)}. \quad (5.35)$$

5.4.2. Частотні характеристики фільтрів

На рис. 5.23 представлено сімейство частотних характеристик активного фільтра, на рис. 5.24 – для каскаду з LC -фільтра й активного фільтра. Параметри схеми: $R_\phi=100$ Ом, $C_\phi=47$ мкФ, $K(s)=0,5$, $L=1$ мГн, $C=1$ мкФ, $R=20$ Ом.

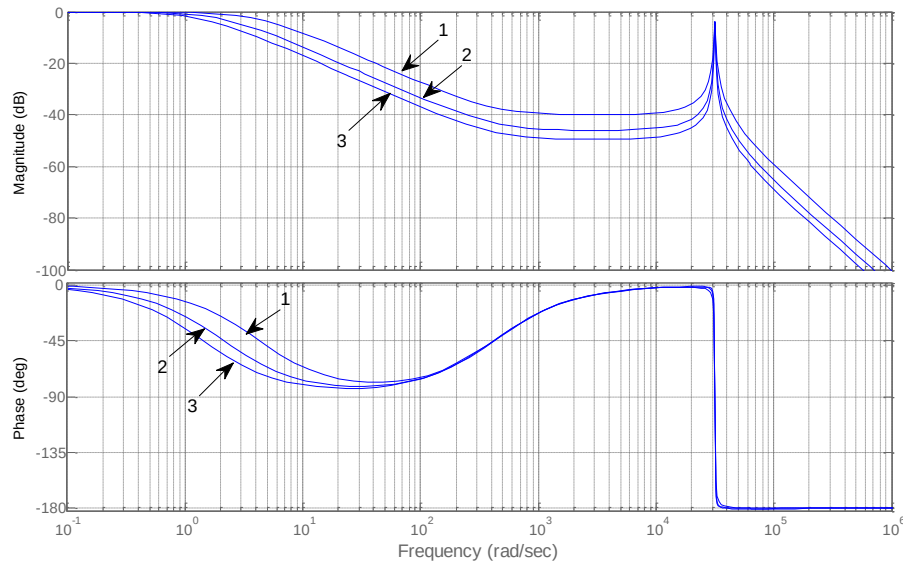


$$(1 - A(s)=50, 2 - A(s)=100, A(s)=150)$$

Рис. 5.23. Частотні характеристики активного фільтра з параметрами

$$R_{\phi}=100 \text{ Ом}, C_{\phi}=47 \text{ мкФ}, K(s)=0,5$$

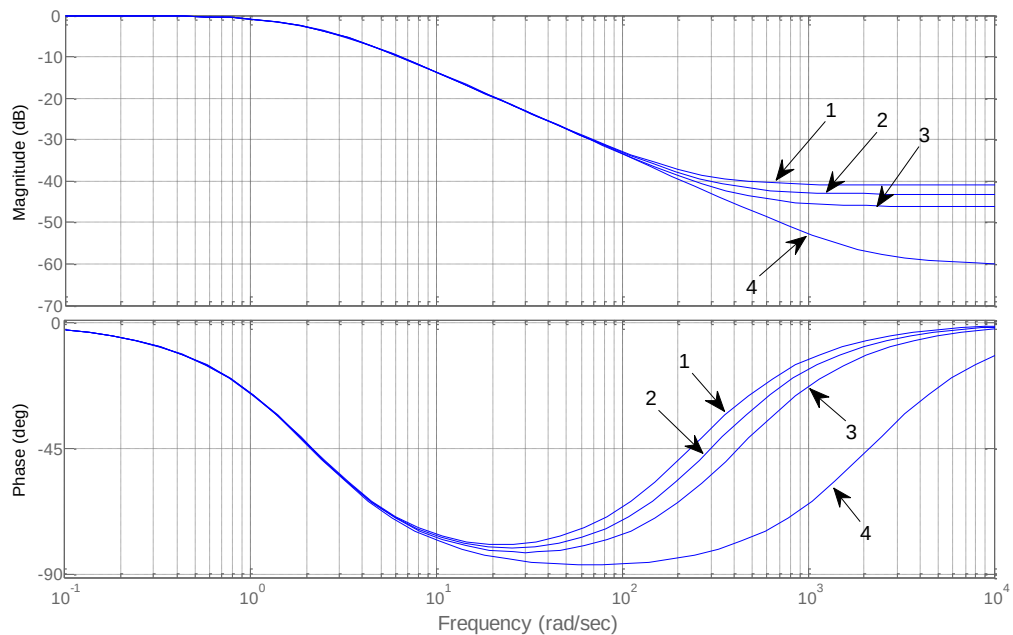
Аналізуючи графіки, можна зробити висновок, що з ростом коефіцієнта підсилення $A(s)$ частота зрізу фільтрів зміщується в область нижніх частот. При цьому ефективна стала часу збільшується, що позначається на перехідній характеристиці.



$$(1 - A(s)=50, 2 - A(s)=100, A(s)=150)$$

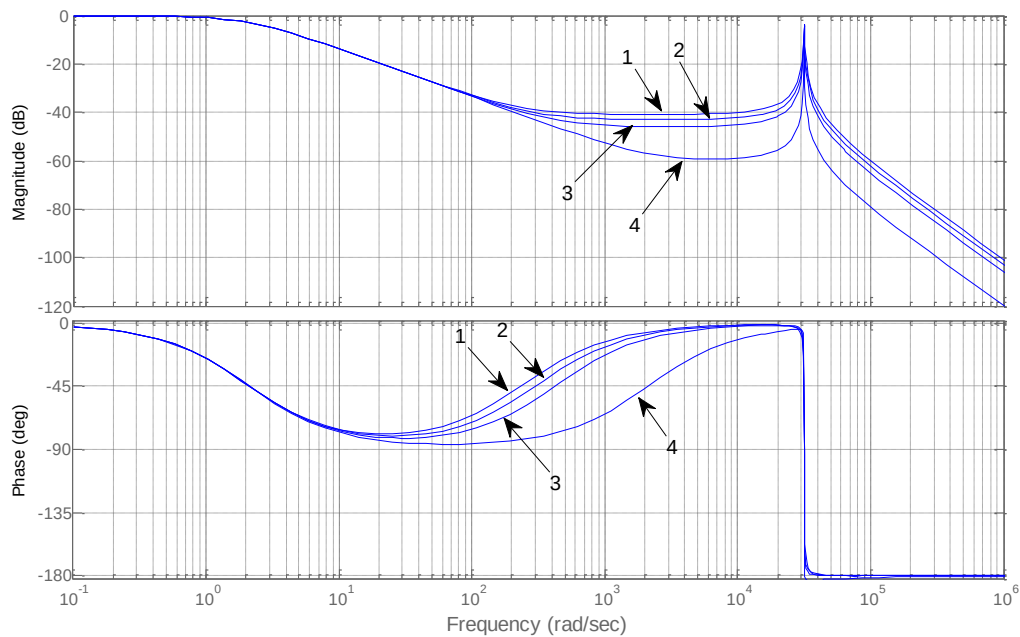
Рис. 5.24. Частотні характеристики каскадного з'єднання LC - і активного фільтрів з параметрами $R_{\phi}=100$ Ом, $C_{\phi}=47$ мкФ, $K(s)=0,5$,
 $L=1$ мГн, $C=1$ мкФ, $R=20$ Ом

Частотні характеристики, що представлені на рис. 5.25 та рис. 5.26, показують вплив коефіцієнта $K(s)$.



$$(1 - K(s)=0,1, 2 - K(s)=0,3, K(s)=0,5, K(s)=0,9)$$

Рис. 5.25. Частотні характеристики активного фільтра



$$(1 - K(s)=0,1, 2 - K(s)=0,3, K(s)=0,5, K(s)=0,9)$$

Рис. 5.26. Частотні характеристики каскадного з'єднання LC - і активного фільтрів

5.4.3. Перетворювач як замкнена система

Для побудови замкненої структури перетворювача (рис. 5.27) скористаємося структурною схемою, що приведена на рис. 5.19. По суті – це незмінна частина системи. Ланка з передатною функцією $W_{\phi}(s)$ описується виразом (5.29). Для усунення пульсацій вихідної напруги частота зрізу $W_{\phi}(s)$ повинна бути мінімальною. Разом з тим зменшення частоти зрізу спричиняє збільшення ефективної сталої часу і як наслідок – зменшення швидкодії системи.

Щоб підвищити швидкодію системи, можна використовувати контур для компенсації зовнішніх збурень ΔU і Δf (на схемі виділений сірим кольором). Цим контуром досягається груба компенсація. На стійкість системи він не впливає.

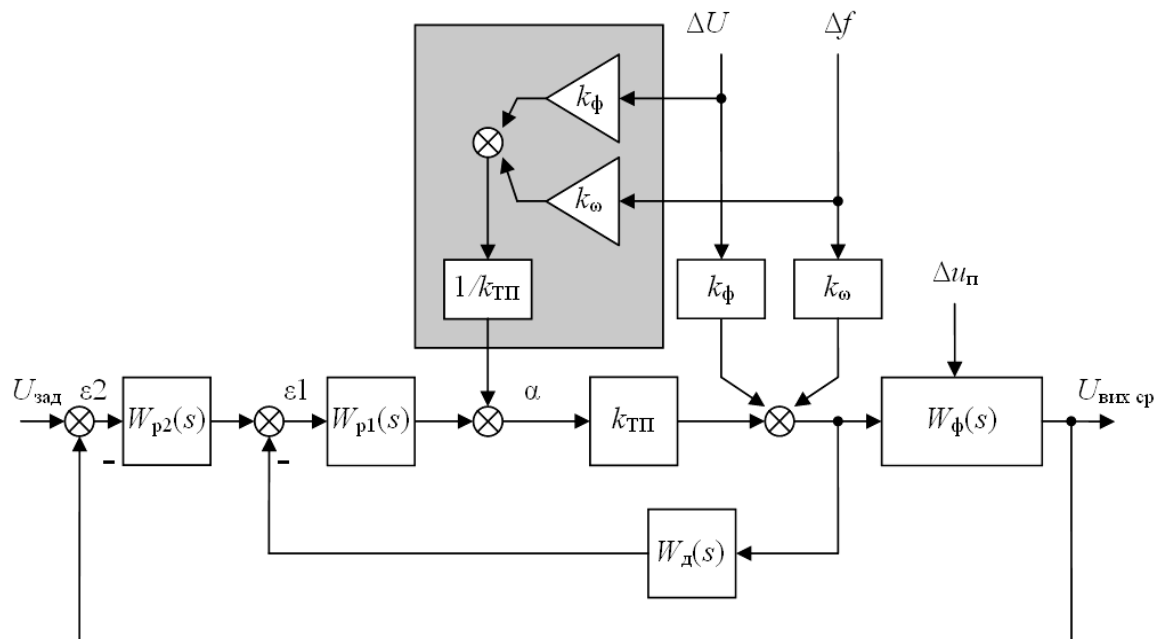


Рис. 5.27. Структурна схема перетворювача як замкнутої системи

Точна компенсація здійснюється двома контурами регулювання за принципом підпорядкованого керування.

Внутрішній контур призначений для регулювання середнього значення випрямленої напруги. Як ланку $W_d(s)$ можна використовувати аперіодичну ланку з передатною функцією

$$W_d(s) = \frac{1}{\tau \cdot s + 1},$$

де τ – стала часу датчика середньої напруги (0,01 – 0,05 с).

Регулятор $W_{p1}(s)$ може бути пропорційним. Зовнішній контур регулювання для усунення статичної похибки по напрузі повинний у своєму складі мати пропорційно-інтегральний регулятор $W_{p2}(s)$.

5.5. Стохастична модель керованого випрямляча

Для вирішення задачі статистичного аналізу та синтезу систем автоматичного регулювання з керованим випрямлячем, оцінки точності лінеаризації регулювальних характеристик при випадкових керуючих впливах, випрямляч можна представити відповідною стохастичною моделлю.

Вирішення цієї задачі необхідно через нелінійне перетворення кута регулювання $\alpha(t)$ в випрямлену напругу. Випадковий характер зміни $\alpha(t)$ відповідно до кореляційної функції керуючого сигналу призводить до випадкового характеру зміни зі своїм математичним очікуванням і кореляційною функцією. Скористаємося методом характеристичних функцій [4].

$$U_{d\alpha} = \frac{U_{d0}}{2} (e^{j\alpha} + e^{-j\alpha}) \quad (5.36)$$

Перетворення (5.36) дозволяє ввести в розгляд два кореляційно-залежних процеси. Тому кореляційна функція

$$B_{ud}(\tau) = B_{u1}(\tau) + B_{u2}(\tau) + B_{u2,1}(\tau)$$

може бути визначена зіставленням загального виразу

$$B(\tau) = M\{f(t) \cdot f(t + \tau)\}$$

з характеристичною функцією вхідного процесу:

$$\theta_{\alpha}(w1, w2) = M\{e^{jw_1x_1} \cdot e^{jw_2x_2}\},$$

$$\theta_{\alpha}(w) = M\{e^{jwx}\},$$

що дає можливість шляхом заміни відповідних коефіцієнтів представити $B_{ud}(\tau)$ через параметри вхідного процесу.

Автокореляційні функції $B_{u1}(\tau)$ та $B_{u2}(\tau)$ з урахуванням (5.36) можуть бути визначені за формулами:

$$\left. \begin{aligned} B_{u1}(\tau) &= \frac{U_{d0}^2}{4} M\{e^{j\alpha_1} \cdot e^{j\alpha_2}\} \\ B_{u2}(\tau) &= \frac{U_{d0}^2}{4} M\{e^{-j\alpha_1} \cdot e^{-j\alpha_2}\} \end{aligned} \right\}, \quad (5.37)$$

де

$$\alpha_1 = \alpha(t),$$

$$\alpha_2 = \alpha(t + \tau).$$

Характеристична функція двовимірного випадкового процесу визначається за формулою:

$$\theta_{\alpha}(w1, w2) = M\{e^{jw_1x_1} \cdot e^{jw_2x_2}\}. \quad (5.38)$$

Зіставлення формул (5.37) і (5.38) дає:

$$B_{u1}(\tau) = B_{u2}(\tau) = \frac{U_{d0}^2}{4} \theta_{\alpha}(jw1, jw2) \quad (5.39)$$

Вираз двовимірної характеристичної функції нормального випадкового процесу

$$\theta_{\alpha}(jw1, jw2) = \exp \left\{ j(M_x w_1 + M_x w_2) - \frac{B_x^2}{2} (w_1^2 + 2R_x w_1 w_2 + w_2^2) \right\}$$

дозволяє отримати вираз:

$$B_{u1}(\tau) + B_{u2}(\tau) = \frac{U_{d0}^2}{2} \cos 2M_{\alpha} \exp(-B_{\alpha}^2(1 + p\alpha(\tau))), \quad (5.40)$$

де B_{α}^2 – дисперсія кута α ; $p\alpha(\tau)$ – нормована кореляційна функція процесу $\alpha(t)$.

Для взаємно-кореляційних складових $B_{u1,2}(\tau), B_{u2,1}(\tau)$ маємо:

$$\left. \begin{aligned} B_{u1,2}(\tau) &= \frac{U_{d0}^2}{4} M \{ e^{-j\alpha_1} \cdot e^{-j\alpha_2} \} \\ B_{u2,1}(\tau) &= \frac{U_{d0}^2}{4} M \{ e^{j\alpha_1} \cdot e^{j\alpha_2} \} \end{aligned} \right\} \quad (5.41)$$

Формула (5.41) дозволяє знайти складові:

$$B_{u1,2}(\tau) + B_{u2,1}(\tau) = \frac{U_{d0}^2}{2} \exp(-B_{\alpha}^2(1 - p\alpha(\tau))). \quad (5.42)$$

Об'єднуючи вирази (5.41) та (5.42), після ряду перетворень знаходимо:

$$\begin{aligned} B_u(\tau) &= U_{d0}^2 e^{B_{\alpha}^2} \cos^2 M_{\alpha} + B_{\alpha}^2 U_{d0}^2 e^{-B_{\alpha}^2} \sin^2 M_{\alpha} p\alpha(\tau) + \\ &+ U_{d0}^2 e^{-B_{\alpha}^2} \cos^2 M_{\alpha} \sum_k \frac{1}{k!} [-B_{\alpha}^2 \alpha(\tau)]^k. \end{aligned} \quad (5.43)$$

З (5.43) виходить, що кореляційна функція випадкового процесу на виході керованого випрямляча в загальному вигляді містить квадрат математичного очікування випрямленої напруги:

$$M_{ud} = U_{d0}^2 e^{-B_{\alpha}^2} \cos^2 M_{\alpha},$$

кореляційну функцію вхідного процесу

$$B_u(\tau) = K_{up}^2 p\alpha(\tau)$$

з урахуванням коефіцієнта статистичної лінеаризації

$$K_{up}^2 = B_\alpha^2 U_{d0}^2 e^{-B_\alpha^2} \sin^2 M_\alpha,$$

й аддитивну складову перешкоди:

$$B_b(\tau) = U_{d0}^2 e^{-B_\alpha^2} \cos^2 M_\alpha \sum_k \frac{1}{k!} \left[-B_\alpha^2 \alpha(\tau) \right]^k,$$

що має кореляційний зв'язок з вхідним процесом і обумовлена нелінійним перетворенням вхідного процесу.

Аналіз нормованої по відношенню до $U_{d0}^2 e^{-A_\alpha^2} \cos^2 M_\alpha$ кореляційної функції перешкоди $B_n(\tau)$ показує, що вона може бути апроксимована функцією вигляду:

$$B_{ПА} = B_A^2 e^{\alpha_A |\tau|} |\cos B_A \tau|,$$

або експоненціальною функцією:

$$B'_{ПА} = B_A^2 e^{-\alpha'_A |\tau|}.$$

Виконаний аналіз показує, що для вхідної кореляційної функції виконується нерівність $\alpha'_A > \alpha_\alpha$, тобто спектр збуджуваної нелінійністю адитивної перешкоди $B_n(\tau)$ зміщується в область більш високих частот. Зміна дисперсії вхідного процесу спричиняє нелінійний вплив на декремент затухання α'_A (рис. 5.28). При зменшенні B_α до нуля, дисперсія перешкоди також наближається до нуля.

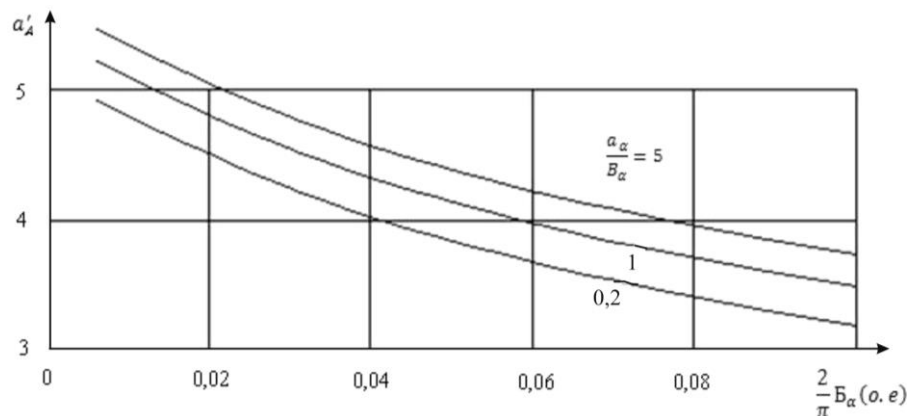


Рис. 5.28. Вплив дисперсії вхідного процесу на декремент затухання

Коефіцієнт, який визначається відношенням дисперсій перешкоди вихідного параметра перетворювача при відсутності та наявності зворотних зв'язків може грати роль коефіцієнту статистичної лінеаризації:

$$K_{cl} = \frac{B_A^2}{B_{A3}^2}.$$

Автором, спільно з Уханем В.Д. і Павловим Г.В. ця задача вирішена іншим методом.

5.6. Компенсація коливань частоти напруги швидкодіючими зворотними зв'язками в системах фазового керування

Сучасні напівпровідникові перетворювачі електроенергії, а також прецизійні джерела струму представляють собою багатоконтурні замкнені вентильні системи, побудовані за принципом систем підпорядкованого регулювання [2, 3].

Відомо [4], що частота зрізу будь-якого зовнішнього контуру в таких системах і його швидкодія значно нижчі, ніж внутрішнього контура. Тому можна стверджувати, що ефективне зменшення перешкод нижче граничної частоти перетворювача можливе лише першим внутрішнім контуром, що представляє собою стабілізуючий зворотний зв'язок по напрузі.

Розглянемо ефективність зазначеного зворотного зв'язку (ЗЗ) в плані зменшення впливу збурення при різних типах регуляторів, що використовуються. Враховуючи, що внутрішній ЗЗ найбільш швидкодіючий і пульсації випрямленої напруги мають досить сильний вплив на коефіцієнт передачі системи фазового управління (СФУ), скористаємося динамічною моделлю керованого випрямляча (КВ) з урахуванням фактора пульсації (рис. 5.29).

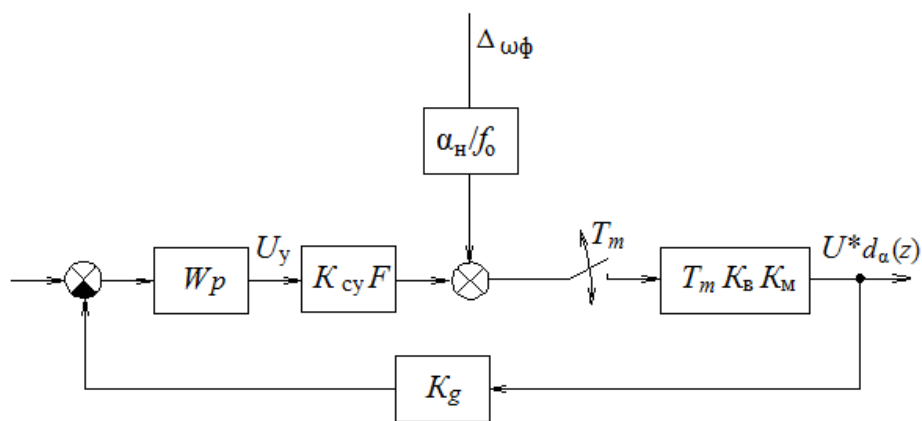


Рис. 5.29. Динамічна модель керованого випрямляча з урахуванням фактора пульсацій

Визначимо дисперсію і коефіцієнт згладжування замкненим контуром збурення $\Delta_{\omega\phi}$, що описує коливання частоти на вході фільтра синхронізації зі спектральною щільністю $G_{\phi}(\omega)$:

$$G_{\phi}(\omega) = \frac{\alpha_{\omega}}{\alpha_{\omega}^2 + \omega^2} R_{\omega\phi}(0), \quad (5.44)$$

де

$$R_{\omega\phi}(0) = \sigma_{\omega}^2 \left(\frac{\alpha_n}{f_0} \right)^2 = D_{\omega}.$$

Враховуючи, що збурення $\Delta_{\omega\phi}$ у вихідний параметр перетворювача передається через імпульсний елемент і квантується в часі, скористаємося дискретним перетворенням формули (5.44).

Спектральна щільність дискретного процесу зазвичай визначається як двостороннє Z-перетворення від кореляційної функції:

$$G^*(z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} R(kT_m) z^{-k}; \quad z = e^{j\omega T_m}. \quad (5.45)$$

Для практичного використання (5.45) зручніше представити його у вигляді:

$$G^*(z) = R^*(z) + R^*(z^{-1}) - R^*(0), \quad (5.46)$$

що дозволить використовувати таблиці Z-перетворення для знаходження дискретної спектральної щільності. Тут $R^*(z)$ – Z-перетворення від кореляційної функції $R(\tau)$.

Для кореляційної функції $R(\tau)$, що відповідає спектральній щільності (5.44), використовуючи (5.46) і таблиці Z-перетворень, знаходимо:

$$G_{\omega}^*(z) = \frac{(1-d_{\omega}^2)D_{\omega}}{(z-d_{\omega})(z^{-1}-d_{\omega})},$$

або

$$G_{\omega}^*(e^{j\omega T_m}) = \frac{(1-d_{\omega}^2)D_{\omega}}{1+d_{\omega}^2-2d_{\omega}\cos\omega T_m},$$

де

$$d_{\omega} = \exp(-a_{\omega}T_m).$$

Дисперсія випрямленої напруги, обумовлена перешкодою, визначаються за формулою:

$$D_{U,\omega} = \frac{T_m}{2\pi} \int_{-\pi/T_m}^{\pi/T_m} G_{\omega}^*(z) |\phi^*(z)|^2 \Big|_{z=e^{j\omega T_m}}, \quad (5.47)$$

де

$$\phi^*(z) = \frac{K_B K_M}{1+z^{-1}K_K T_m FW_p^*(z,1)},$$

$$K_K = K_B K_M K_{CV} K_g K_p,$$

для регуляторів, в яких різниця між поліномами знаменника і чисельника дорівнює одиниці і

$$\phi^*(z) = \frac{K_B K_M}{1+K_K T_m FW_p^*(z)},$$

якщо зазначена різниця більша одиниці.

Підінтегральний вираз (5.47) є трансцендентною функцією змінної ω , що ускладнює інтегрування. Усунення зазначених недоліків досягається заміною змінних [4]:

$$z = e^{j\omega T_m} = \frac{1+jv}{1-jv}; \quad \omega = \frac{2}{T_m} \arctg v; \quad d\omega = \frac{2}{T_m} \frac{dv}{1-v^2}, \quad (5.48)$$

в результаті якої (5.47) перетворюється до наступного вигляду:

$$D_{U,\omega} = \frac{T_m}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{\omega}^*(z) |\Phi^*(z)|^2 \Big|_{z=\frac{1+jv}{1-jv} \frac{2dv}{1-v^2}}. \quad (5.49)$$

Тут v – відносна псевдочастота.

Підінтегральний вираз (5.49) є дробно-раціональною функцією jv , тому розрахунок $D_{U,\omega}$ з використанням цього виразу зводиться до обчислення інтегралу вигляду:

$$I = \frac{1}{2\pi j} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(jv)dv}{b(jv)b(-jv)}, \quad (5.50)$$

де $b(jv) = b_0(jv)^k + b_1(jv)^{k-1} + \dots + b_k$ – поліном, корні якого лежать в верхній напівплощині комплексної площини; $g(jv) = g_0(jv)^{2k-2} + g_1(jv)^{2k-4} + \dots + b_{k-1}$ – поліном, який містить парні ступені v .

Скориставшись виразами (5.44) – (5.50), визначимо характер залежності випрямленої напруги від типів і параметрів регуляторів внутрішнього контура. Розглянемо замкнену структуру з регулятором, передавальна функція якого має вигляд:

$$W_p(p) = \frac{K_p}{T_p p(T_2 p + 1)}.$$

Z-перетворена передавальна функція замкненого контура:

$$\Phi^*(z) = \frac{K_B K_M (z-1)(z-d_2)}{(z-1)(z-d_2) + K_K \frac{T_m}{T_p} F(1-d_2)}, \quad d_2 = e^{-\frac{T_m}{T_2}}. \quad (5.51)$$

Знаходимо передавальну функцію замкненої системи в області відносної псевдочастоти, використовуючи перетворення (5.48):

$$\Phi^*(z) = \frac{2K_B K_M jv[jv(1+d_2)+1-d_2]}{(jv)^2 \left[2(1+d_2) - K_K \frac{T_m}{T_p} F(1-d_2) \right] + 2(1-d_2)jv + K_K \frac{T_m}{T_p} F(1-d_2)}. \quad (5.52)$$

Дисперсія випрямленої напруги, обумовлена коливаннями частоти в мережі, у відповідності з (5.48), (5.49) і з урахуванням (5.52) знаходиться за формулою:

$$D_{U,\omega} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{8(1-d_{\omega}^2)D_{\omega}K_B^2K_M^2[(jv)^4(1+d_2)^2-(jv)^2(1-d_2)^2]dv}{\left[1-d_{\omega}+j\omega(1+d_{\omega})\right]\left\{(jv)^2\left[2(1+d_2)-K_K\frac{T_m}{T_p}F(1-d_2)\right]+2(1-d_2)jv+K_K\frac{T_m}{T_p}F(1-d_2)\right\}}$$

Наводячи чисельник і знаменник до поліномів вигляду (5.52) та вводячи позначення

$$\begin{aligned} b_0 &= (1+d_{\omega})\left[2(1+d_2)-K_K\frac{T_m}{T_p}F(1-d_2)\right], \\ b_1 &= 4(1-d_{\omega}d_2)-K_K\frac{T_m}{T_p}F(1-d_2)(1-d_{\omega}), \\ b_2 &= 2(1-d_2)(1-d_{\omega})+K_K\frac{T_m}{T_p}F(1-d_2)(1+d_{\omega}), \\ b_3 &= K_K\frac{T_m}{T_p}F(1-d_2)(1-d_{\omega}), \\ g_0 &= (1+d_2)^2, \\ g_1 &= (1-d_2)^2, \\ g_2 &= 0, \end{aligned} \tag{5.53}$$

знаходимо:

$$D_{U,\omega} = 8(1-d_{\omega}^2)D_{\omega}K_B^2K_M^2I_3; \quad I_3 = \frac{b_0g_1-b_2g_0+b_0b_1g_2b_3^{-1}}{2b_0(b_0b_3-b_1b_2)} \tag{5.54}$$

де I_3 – значення табличного інтегралу (5.50).

Загальний вираз (5.54) з урахуванням коефіцієнтів (5.53) громіздкий і не дозволяє встановити фізичний взаємозв'язок між дисперсією, параметром енергетичного спектру та параметрами регулятора.

Скориставшись тим, що період квантування значно менший постійних часу регулятора та енергетичного спектру, приймемо:

$$d_2 \approx 1 - \frac{T_m}{T_2}, \quad d_{\omega} \approx 1 - \alpha_{\omega}T_m. \tag{5.55}$$

Після ряду перетворень виразу (5.54) з урахуванням (5.55), а також використовуючи характеристичне рівняння виразу (5.51), за яким знайдена умова стійкості замкненого контуру, знаходимо:

$$D_{U,\omega} = \frac{D_{\omega} K_B^2 K_M^2 \alpha_{\omega} T_m \left(\alpha_{\omega} T_m + 2 \left(2 \frac{T_2}{T_m} - 1 \right) + \frac{T_m}{T_2} \right)}{\frac{T_m}{T_2} \alpha_{\omega} T_p + \alpha_{\omega}^2 T_m^2 + 2 \frac{T_m}{T_2} \left(2 \frac{T_2}{T_m} - 1 \right)}. \quad (5.56)$$

Вираз (5.56) дає нам мінімально можливе значення дисперсії випрямленої напруги, обумовлене коливаннями частоти мережі. Коефіцієнт згладжування замкненої структури визначається за формулою:

$$K_C = \sqrt{\frac{\alpha_{\omega} T_p + \alpha_{\omega}^2 T_p T_2 + K_K F}{\alpha_{\omega} (\alpha_{\omega} T_p T_2 + T_p + T_2 K_K F)}}.$$

Отриманий вираз (5.56) дозволяє не тільки визначати величину складової дисперсії випрямленої напруги, а й надає можливість здійснювати корекцію замкненої системи з метою забезпечення мінімуму. З урахуванням викладеного визначимо ступінь згладжування складової випрямленої напруги при різних типах регуляторів, що використовуються.

Передавальна функція інтегрального регулятора другого порядку має вигляд:

$$W_p(p) = \frac{K_p}{T_p^2 p^2} (T_2 p + 1).$$

Передавальна функція замкненого контура в області відносної псевдочастоти:

$$\phi^*(j\nu) = \frac{4K_B K_M (j\nu)^2}{2 \left[2 + K_K F \frac{T_m T_2}{T_p^2} \right] (j\nu)^2 + 2K_K F \frac{T_m T_2}{T_p^2} (j\nu) + K_K F \frac{T_m^2}{T_p^2}}.$$

На рис. 5.30 представлена модель керованого випрямляча для дослідження коефіцієнту згладження збурювання:

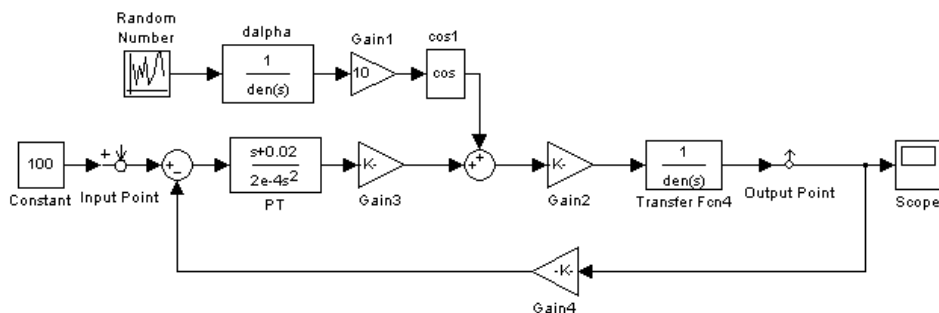


Рис. 5.30. Matlab-модель керованого випрямляча

Дисперсія випрямленої напруги з урахуванням (5.55) після ряду перетворень і несуттєвих спрощень може бути знайдена за виразом:

$$D_{U,\omega} = \frac{D_\omega K_B^2 K_M^2 \alpha_\omega T_p^2}{4(K_K F T_2 - \alpha_\omega T_p^2)}.$$

Коефіцієнт згладжування збурення:

$$K_C = \frac{2}{T_p} \sqrt{\frac{K_K F T_2 - \alpha_\omega T_p^2}{K_B^2 K_M^2 \alpha_\omega}}.$$

ЛАЧХ замкнутого контуру являє собою смуговий фільтр з крутизною низькочастотної ділянки характеристики 40 дБ/дек, що дозволяє навіть при неспівпаданні смуги «прозорості» з частотним діапазоном збурень здійснювати їх ефективне подавлення (рис. 5.31).

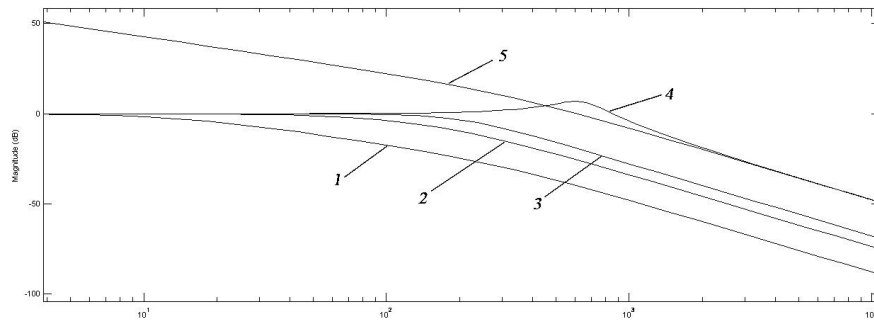


Рис. 5.31. ЛАЧХ замкнутого і розімкнутого контурів при використанні інтегрального регулятора

На рисунку позначені: 1 – ЛАЧХ замкнутого контура при $K_p=1$, $T_p=20 \cdot 10^{-3}$ с; 2 – при $K_p=5$, $T_p=20 \cdot 10^{-3}$ с; 3 – при $K_p=5$, $T_p=20 \cdot 10^{-4}$ с; 4 – $K_p=5$, $T_p=2 \cdot 10^{-4}$ с; 5 – ЛАЧХ розімкнутого контура.

Розглянемо інерційний регулятор з передавальною функцією вигляду:

$$W_p(p) = \frac{K_p}{T_p} \frac{1}{p + 1/T_p}.$$

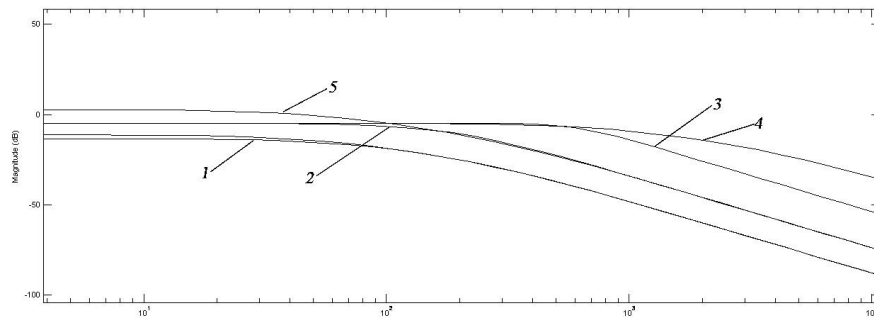


Рис. 5.32. ЛАЧХ замкнутого і розімкненого контурів при використанні інерційного регулятора

Для цього типу регулятора вираз для складової дисперсії випрямленої напруги має вигляд:

$$D_{U,\omega} = \frac{D_{\omega} K_B K_M \left[(1+d_p)(1+d_{\omega}) \left(K_K F \frac{T_m}{T_p} - d_p + 1 \right) + (1-d_p)^2 (1+d_{\omega}) \left(K_K F \frac{T_m}{T_p} + d_p + 1 \right) \right]}{2 \left[\left(K_K F \frac{T_m}{T_p} + 1 \right)^2 - d_p^2 \right] \left(K_K F \frac{T_m}{T_p} + 1 - d_{\omega} d_p \right)}.$$

Враховуючи, що для більшості практичних випадків $T_p > T_m$, вираз для K_C представимо у вигляді:

$$K_C = \sqrt{\frac{\left[2 + \frac{T_m}{T_p} (K_K F - 1) \right] (1 + K_K F) (1 + K_K F + \alpha_{\omega} T_p)}{\alpha_{\omega} T_p \left(2 - \frac{T_m}{T_p} \right) (1 + K_K F) \left[2 + \frac{T_m}{T_p} (K_K F - 1) \right]}}.$$

Рис. 5.35 показує залежність коефіцієнта згладження збурювання від параметрів регулятора та кута α .

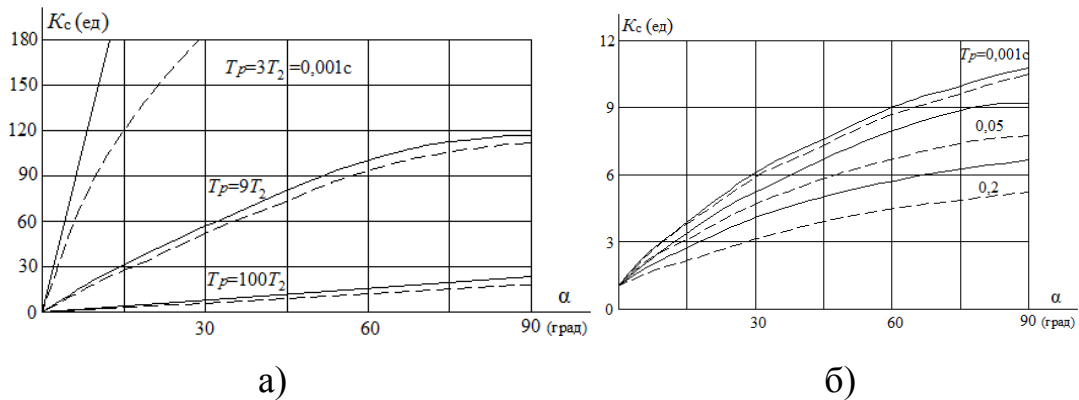


Рис. 5.33. Коефіцієнти згладження замкнених контурів при інтегральному (а) та інерційному (б) регуляторах

Нелінійний характер залежностей обумовлений нелінійністю перетворювача. Зазначимо, що нелінійний характер цієї залежності буде мати місце і при арккосинусній регулювальній характеристиці перетворювача через нелінійне перетворення збурення.

Штрихові лінії, зображені на рис. 5.33, показують ефективність подавлення Λ_{ω} в перетворювачі з рівноінтервальною СФУ. Більш низькі значення коефіцієнта згладжування обумовлені великим рівнем дисперсії перешкод даного типу на вході замкненого контура.

На рис. 5.34 представлена модель системи підпорядкованого управління. Система має два контури зворотного зв'язку – по струму і по напрузі, а також паралельну коригуючу ланку. Частота зрізу аперіодичної ланки TFN_O при розімкненому контурі управління дорівнює 10 Гц, коефіцієнт підсилення 40 дБ. При охопленні цієї ланки одиничним зворотним зв'язком по напрузі, а також додаванні коефіцієнта пропорційності (на рисунку позначено Gain2), рівного $\pi/6$, частотний діапазон розширюється. ЛАЧХ замкненого контуру має частоту зрізу близько 300 Гц. Перешкода у вигляді коливань частоти напруги в моделі формується генератором білого шуму, пропущеного через фільтр. Оскільки регулювальна характеристика напівпровідникового перетворювача електроенергії має нелінійний характер, для урахування цієї нелінійності в модель введений блок cos1. Амплітуда шуму, яка характеризує

ступінь відхилення частоти напруги від номінального значення, визначається значенням коефіцієнта Gain1.

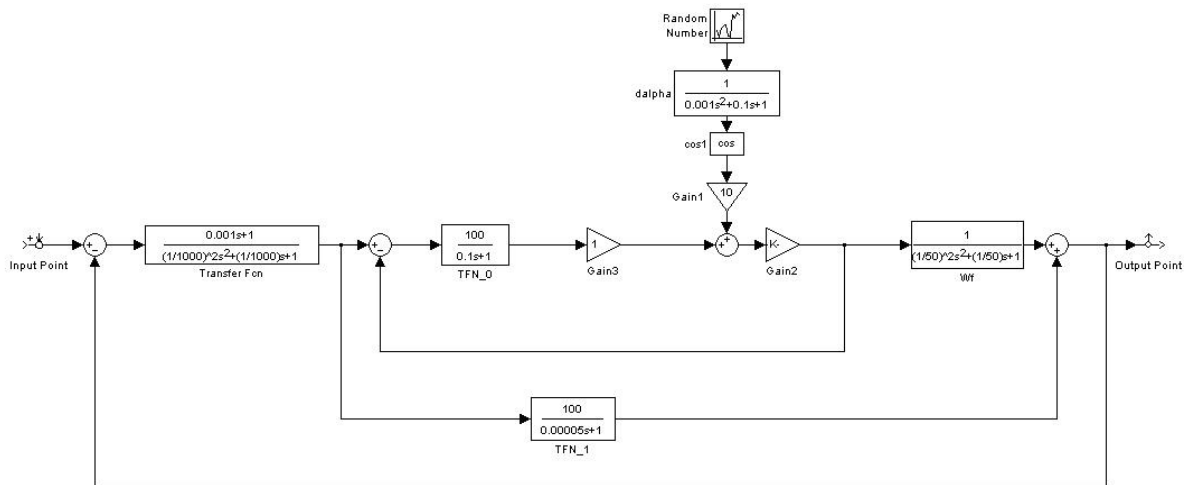
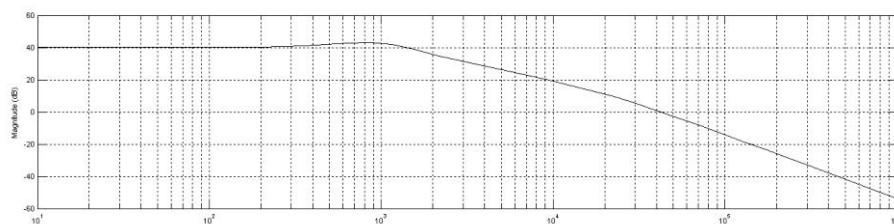
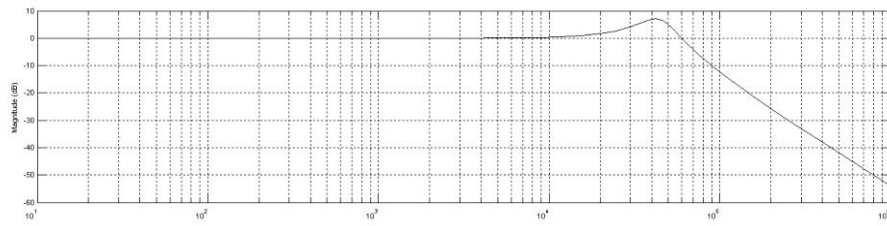


Рис. 5.34. Модель системи підпорядкованого управління

Додавання в модель системи управління фільтра Wf з частотою зрізу 50 Гц (LC-фільтр) та паралельного коригуючого підсилювача TFN_1 з частотою зрізу 20 кГц призвело до зміни характеристик системи. Далі в модель вводиться зовнішній контур регулятора струму. Регулятор струму має передавальну функцію Transfer Fcn – ланка 2 порядку з частотою зрізу 1 кГц. ЛАЧХ замкненої системи представлена на рис. 5.35, а. Після охоплення системи головним зворотним зв'язком частота зрізу дорівнює 40 кГц (рис. 5.35, б). Аналіз частотних характеристик показав, що замкнена система підпорядкованого управління стійка. Введення швидкодіючих зворотних зв'язків дозволило значно зменшити вплив коливачь частоти вхідної напруги на якість випрямленої напруги, що підтвердило моделювання замкненої системи автоматичного керування.



а)



б)

Рис. 5.35. ЛАЧХ системи керування з регулятором струму (а) і з головним зворотним зв'язком (б)

5.7. Зменшення впливу коливань частоти в багатоконтурних структурах силових перетворювачів

Такі структури знаходять широке застосування в тих електроприводах, де двигун використовується в якості джерела моменту. Внутрішній контур зворотного зв'язку за напругою (рис. 5.36) вирішує завдання стабілізації напруги, і є підлеглим об'єктом регулювання відносно зовнішнього контуру, що забезпечує режим стабілізації струму та моменту.

Нескладні перетворення такої структури при умові $I_s = 0$ дають змогу побачити, що відносно зовнішньої перешкоди $\Delta\alpha$ гілка струму шунтується гілкою швидкодіючого зворотного зв'язку за напругою.

Тому зовнішній контур не може вирішувати задачі подавлення коливань частоти, а ефективність системи буде визначатися ефективністю одноконтурної системи зі зворотним зв'язком за напругою.

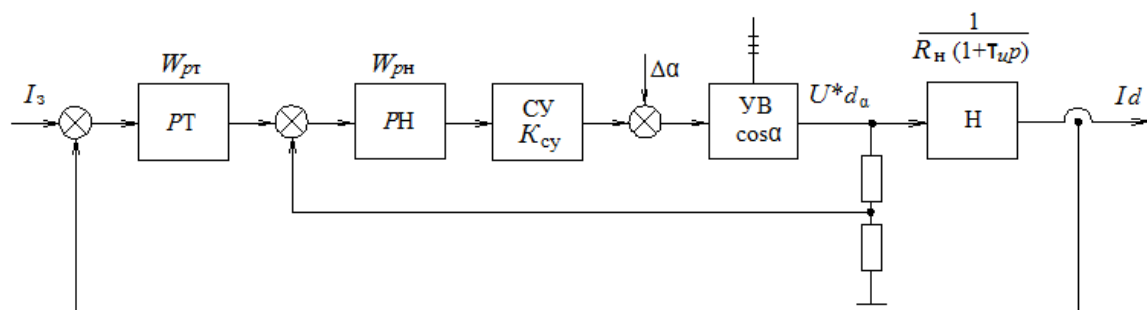


Рис. 5.36. Структура системи з підлеглим регулюванням

Ефективність подавлення перешкоди, зумовленої коливаннями частоти мережі живлення, обмежується величиною контурного коефіцієнту підсилення, який, в свою чергу, не може бути збільшений через низьку частоту дискретності перетворювача. Це ілюструє ЛАЧХ системи керування (рис. 5.37).

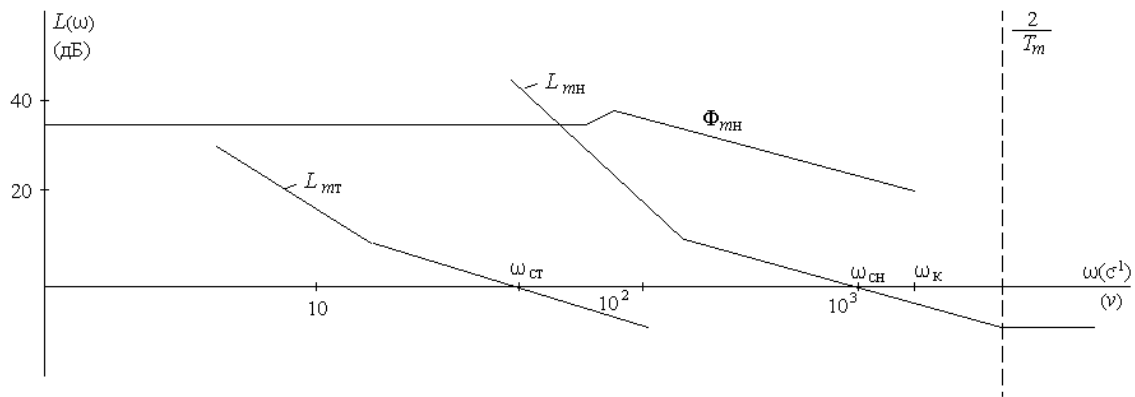


Рис. 5.37. ЛАЧХ системи керування

Частота комутації перетворювача $1/T_m = 300$ Гц обмежує його смугу пропускання реальною частотою 150 Гц. Оскільки частотний діапазон коливань частоти знаходиться на $2/3$ декади нижче, тому й ефективність подавлення буде забезпечуватися, відповідно, величинами 20/40 дБ. Це цілком достатньо для того, щоб зняти проблему коливань частоти по відношенню до перетворювачів. Однак наявність швидкодіючих зворотних зв'язків, що охоплюють імпульсні перетворювачі, має і свої суттєві недоліки, які полягають у тому, що сам перетворювач нелінійний як з точки зору регульовальної характеристики, так і з позиції пульсаційної складової випрямленої напруги.

Ці нелінійності незручні при налаштуванні систем. Тому такі граничні ЛАЧХ намагаються не використовувати і зменшують їх частоти зрізу як мінімум на декаду. Відповідно, як мінімум на 20 дБ буде знижена і величина коефіцієнту подавлення.

Вихід із ситуації полягає у використанні паралельного каналу, який кардинально змінить частотні властивості перетворювача. Використання

паралельних каналів широко використовується з метою формування необхідних амплітудних і фазових частотних характеристик.

У розглянутому на рис. 5.38 випадку таким паралельним каналом є підсилювач ДА, смуга пропускання якого в області високих частот може досягати декілька десятків кілогерц. У цьому випадку дві паралельних ланки – перетворювач, охоплений зворотним зв'язком за напругою, і підсилювач, представляють собою об'єкт регулювання для регулятора струму РС. При узгоджених параметрах по входу і виходу підсилювача й перетворювача отримуємо як об'єкт регулювання ланку, що представляє собою фільтр низьких частот, частота зрізу якого може знаходитися в діапазоні 10-20 кГц. Узгодження паралельних ланок має забезпечуватися по виходу – амплітуда пульсацій випрямляча повинна бути не більше величини, яка визначається динамічним діапазоном підсилювача, а потужність не нижче потужності пульсацій в смузі пропускання підсилювача. Узгодження по входу забезпечується однаковими рівнями вхідних сигналів перетворювача і підсилювача. Узгодження по частотному діапазону визначається частотою зрізу фільтра Φ . Його основна функція – знизити рівень канонічних гармонік, в основному частоти 300 Гц до рівня, що задовольняє динамічному діапазону підсилювача. Оскільки основна канонічна гармоніка 300 Гц досягає в повному діапазоні регулювання величини $34\% U_{d0}$, то при напрузі $U_{d0} = 200$ В амплітуда пульсації може досягати 74 В. F-подібний LC фільтр, який простіше всього використовувати для цієї мети, має коефіцієнт фільтрації на цій частоті, який визначається з виразу:

$$q = 36\omega_0^2 LC .$$

Отже, для зниження зазначеної гармоніки до прийнятного рівня частота зрізу фільтра повинна бути близько 50 Гц, і це має бути нижня частота зрізу підсилювача. Таким чином, бажана ЛАЧХ регулятора струму може бути зміщена праворуч (рис 5.39) настільки, наскільки необхідно забезпечити подавлення коливань частоти.

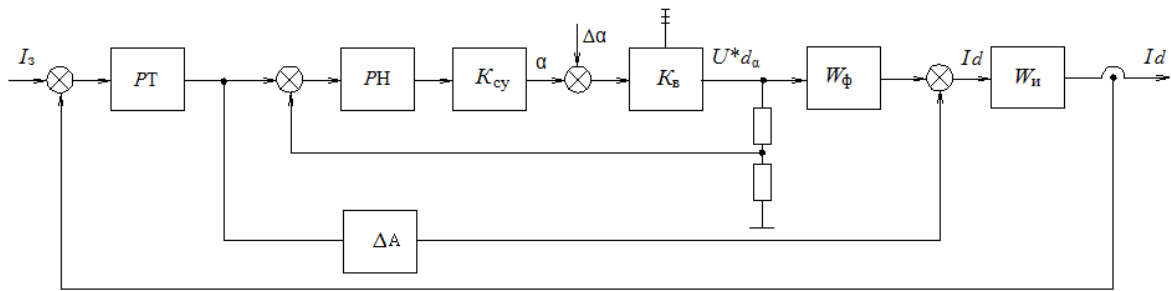


Рис. 5.38. Структурна схема системи з паралельним регулятором

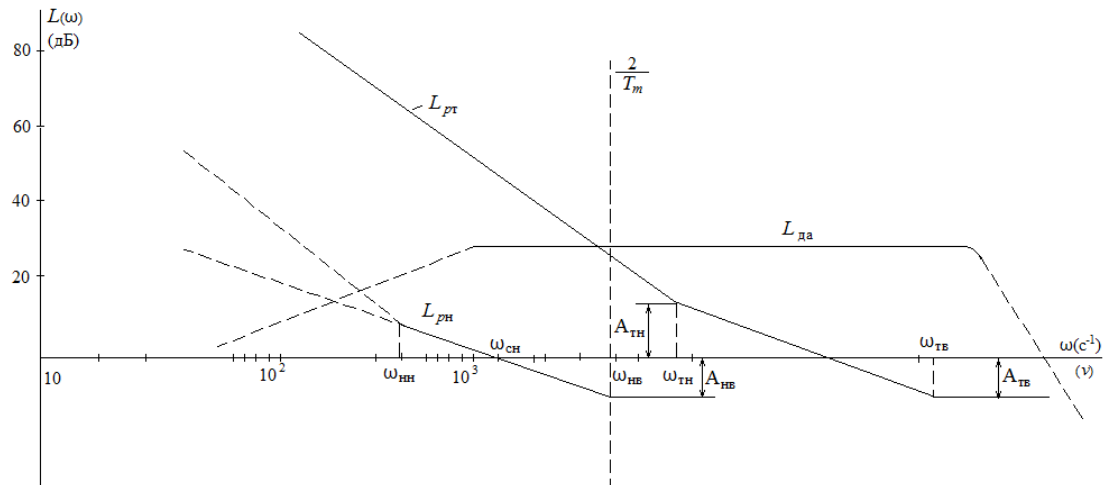


Рис. 5.39. ЛАЧХ системи з урахуванням впливу паралельного регулятора

Висновки

1. В загальному вигляді коливання частоти при впливі на керований випрямляч проявляються як мультиплікативна перешкода, що змінює величину кута регулювання перетворювача. За відомими параметрами імпульсних послідовностей визначаються параметри кореляційної функції, яка може бути використана як характеристика збурюючого впливу в заданих системах стабілізації напруги, а задачі подавлення імпульсних випадкових перешкод можуть бути зведені до типових завдань подавлення збурюючих впливів, що діють в певному спектральному діапазоні.
2. Збільшення амплітуди пульсацій у вихідній напрузі перетворювача спостерігається при збільшенні кута включення α . При збільшенні

частоти мережі живлення f_c і $\alpha = \text{const}$ спостерігається збільшення амплітуди пульсацій.

3. Значно поліпшити динамічні властивості перетворювача дозволяє канал компенсації зовнішніх збурень (сплесків і провалів напруги живлення і зміни частоти мережі живлення).
4. Засобом для ефективного усунення пульсацій випрямленої напруги є каскадне з'єднання LC - і активного фільтрів.
5. Зменшення частоти зрізу активного фільтра спричиняє збільшення ефективної сталої часу, що позначається на зниженні швидкодії всієї системи. Для усунення цього недоліку система керування може бути побудована за принципом підпорядкованого регулювання.
6. Найбільший ефект подавлення завад спостерігається, якщо застосовується астатичний регулятор другого порядку. Зсув частоти зрізу ЛАЧХ регулятора в область високих частот в межах діапазону стійкої роботи перетворювача призводить до зростання коефіцієнта згладжування збурень. Ця властивість є характерною для всіх типів регуляторів, тому стосовно до прецизійних структур, параметри регуляторів та їх тип повинні обиратися виходячи з комплексу вимог, обумовлених як необхідними статичними, так і динамічними показниками.

ЗАКЛЮЧЕННЯ

Підвищення вартості дизельного палива призводить до необхідності переводу дизельних машин на газ. Газодизель-генераторні агрегати (ГДГА) знаходять все більш широке застосування зважаючи на свою економічність. В порівнянні з дизельною електростанцією, газодизельна забезпечує менші витрати на паливо, тривалішу безперервну роботу із стандартним паливним баком, можливість ефективного використання газу з різним хімічним складом, зокрема попутного. Існуючі коливання обертів обумовлені істотною нелінійністю динамічної моделі газодизеля і зміною його параметрів при зміні навантаження. Проте, такі дизель-генератори знаходять достатньо широке застосування в промисловості. Стабілізація частоти і напруги електричної мережі автономної електростанції грає важливу роль в забезпеченні ефективної роботи споживачів електроенергії. Зміна частоти струму призводить до відхилення режимів роботи споживачів від оптимальних і, відповідно, до зниження їх ефективності. В електроенергетичній системі в сталому режимі можуть спостерігатися обмінні коливання активної потужності між генераторами.

На основі експериментальних даних, отриманих на реальних дизель-генераторних агрегатах, визначені статистичні характеристики збурень, можливий діапазон обмінних коливань активної потужності. Розроблена методологія моделювання систем для проведення детальних досліджень, і визначені необхідні кількісні та якісні заходи по зниженню коливань обертів газодизелів та активної потужності в автономних електростанціях при паралельній роботі генераторів. Для вирішення цієї задачі використані методи кореляційного та спектрального аналізу, теорії вірогідності, методів математичного моделювання, адаптивних систем нейро-нечіткої ідентифікації (ANFIS).

Нелінійність об'єктів керування та висока нестабільність обертів газодизелів потребує корегування коефіцієнтів регуляторів системи збудження генератора, систем розподілу активної та реактивної потужності,

системи стабілізації коефіцієнту потужності генератора при різних навантаженнях змушує використовувати більш складні способи керування, використовувати адаптивні регулятори та регулятори, побудовані з використанням нечіткої логіки. З урахуванням вказаних особливостей керування були розроблені ефективні структури засобів автоматизації електроенергетичних систем та алгоритми керування ними. ПІД-регулятор здатний вирішити проблему низькочастотних коливань обертів газового двигуна шляхом когигування коефіцієнтів регулятора в залежності від поточного режиму роботи газодизельного агрегату. В результаті роботи виконана розробка спрощених математичних моделей синхронного генератора та газодизеля для вирішення задач упереджуючого керування. Розроблено апаратно-програмний комплекс моделювання систем керування та процесів в автономних електростанціях з газодизель-генераторами. Розроблена методика статистичного аналізу провалів напруги з урахуванням режимних особливостей електростанції, яка є необхідним інструментом для розробки технічних пропозицій по створенню АЕЕС із захистом від провалів напруги і вибору відповідних критеріїв їхньої оцінки. Розроблено алгоритми автоматизованого статистичного контролю й накопичення інформації про параметри електричного навантаження, узагальненої оцінки впливу змін напруги на режими роботи й параметри електроустаткування, визначення розрахункової потужності змінного навантаження.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Алексеев Н.А. Судовые микропроцессорные управления: проектирование и эксплуатация [Текст] / Н.А. Алексеев. – СПб. : ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2002. – 102 с.
2. Алексеев Н.А. Эксплуатация судовых микропроцессорных систем [Текст] / Н.А. Алексеев. – М. : Транспорт, 1994. – 208 с.
3. Алексеев Н.А. Микропроцессорная система управления судовой электроэнергетической системой «ASA-S» [Текст] / Н.А. Алексеев, А.П. Баранов. – ГМА, 2000. – 130 с.
4. Андрианова Л.П. Идентификация коэффициентов передаточных функций динамических объектов [Текст] / Л.П. Андрианова, Ф.А. Шаймарданов. – Уфа : УГАТУ, 1997. – 195 с.
5. Антонович С.А. Динамические характеристики объектов регулирования судовых дизельных установок [Текст] / С.А. Антонович. – Л. : Судостроение, 1966. – 234 с.
6. Архангельский В.С. Регуляторы частоты вращения судовых дизелей [Текст] / В.С. Архангельский. – Л.: Судостроение, 1989. – 173 с.
7. Автоматизация судовых энергетических установок [Текст] / Под ред. Р.А. Нелепина. – Л. : Судостроение, 1975. – 534 с.
8. Автоматизированные системы управления судовыми энергетическими установками [Текст]. – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2001. – 20 с.
9. Бабков С.П. Моделирование систем [Текст] : уч. пособие / С.П. Бабков, Д.О. Бытев. Иван. гос. хим. – технолог. ун-т. – Иваново, 2008. – 156 с.
10. Баков Ю.В. Проектирование электрической части электростанций с применением ЭВМ [Текст] / Ю.В. Баков. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 272 с.
11. Баранов А.П. Автоматическое управление судовыми электроэнергетическими установками [Текст] / А.П. Баранов. – М. : Транспорт, 1981. – 246 с.

- 12.Баранов А.П. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы [Текст] / А.П. Баранов. – М. : Транспорт, 1988. – 328 с.
- 13.Батыршин И. З. Нечеткие гибридные системы: Теория и практика [Текст] / И.З. Батыршин, А.О. Недосекин, А.А. Стецко и др. Под ред. Н. Г. Ярушкиной. – М. : Физматлит, 2007. –208 с.
- 14.Беляев И.Г. Автоматизация процессов в судовой энергетике [Текст] / И.Г. Беляев, Н.Г. Курзенков, В.И. Седых, В.Н. Слесаренко. – Владивосток, 1999. – 401с.
- 15.Бенькович Е.С. Практическое моделирование динамических систем [Текст] / Е.С. Бенькович, Ю.Б. Колезов, Ю.Б. Сениченков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2002.
- 16.Білоконь О.Л. Порівняльна характеристика регуляторів потужності в АЕЕС [Текст] / О.Л. Білоконь // ІКСК-2010: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів, молодих вчених. – Миколаїв: НУК, 2010. – С. 24-25.
- 17.Бидерман В.Л. Теория механических колебаний [Текст] / В.Л. Бидерман. – М. : Высшая школа, 1980.– 408 с.
- 18.Богомолов В.С. Судовые электроэнергетические установки подчиненного управления [Текст] / В.С. Богомолов. – Калининград: Кн. изд-во, 1996. – 240 с.
- 19.Болотин Б.И. Инженерные методы расчётов устойчивости судовых автоматизированных электростанций [Текст] / Б.И. Болотин, В.Л. Вайнер. – Л. : Судостроение, 1974. – 324 с.
- 20.Болотин Б.И. К вопросу структурного анализа судовых автоматизированных электростанций переменного тока [Текст] / Б.И. Болотин, В.Л. Вайнер // – Сб. НТО Судостроительной промышленности. 1971, вып. 167. – С. 5-13.
- 21.Болотин Б. И., Вайнер В. Л. Исследование устойчивости параллельной работы дизель-генераторов ДГР 150/750 совместно с устройствами

- автоматики на математической модели [Текст] / Б.И. Болотин, В.Л. Вайнер // Труды ЦНИДИ, 1968. Вып. 56. – С. 245-258.
- 22.Боровиков М.А. Расчет быстродействующих систем автоматизированного электропривода и автоматики [Текст] / М.А. Боровиков. – Изд-во Саратовского университета, 1980. – 392 с.
- 23.Бородюк В.П. Дискретные цепи Маркова в задачах оптимизации технических систем [Текст] / В.П. Бородюк, Ю.Е. Голяс // – М.: Моск. энерг. ин-т, 1989. – 76 с.
- 24.Бут Д.А. Синтез автономных электроэнергетических систем [Текст] / Д.А. Бут // Электричество. – 1994. – № 1. – С. 1-17.
- 25.Васильев В.Н. Пуск мощного судового асинхронного двигателя [Текст] / В.Н. Васильев, С.А. Михайлов // Эн.Мор.трансп.сер. техн.экспл. флота. – 1981. – Вып.11(515). – С. 9 – 13.
- 26.Васильев М.В. Определение динамических свойств судовых дизельных установок в условиях нормальной эксплуатации [Текст] / М.В. Васильев // Вестник МГТУ, том 9, №2, 2006. – С. 301-303.
- 27.Василевский, В.И. Автомобильные генераторы [Текст] / В.И. Василевский. – М. : Высшая школа, 1978. – 159 с.
- 28.Вейц В. Л. Динамика машинных агрегатов с двигателями внутреннего сгорания [Текст] / В.Л. Вейц, А.Е. Кочура. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1976. – 383 с.
- 29.Веников В.А. Кибернетические модели электрических систем [Текст] / В.А. Веников. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 328 с.
- 30.Веретенников Л.П. Исследование процессов в судовых электроэнергетических системах. Теория и методы [Текст] / Л.П. Веретенников. – Л. : «Судостроение», 1975. – 376 с.
- 31.Веретенников Л.П. Переходные процессы в электроэнергетических системах кораблей [Текст] / Л.П. Веретенников. – Л. : Ленинград, 1982. – 626 с.

- 32.Виноградова Л.В. Применение газовых топлив в двигателях внутреннего сгорания [Текст] / Л.В. Виноградова, В.В. Горбунова, Н.Н. Патрахальцева и др. – М. : ИРЦ. ГАЗПРОМ, 1996. – 198 с.
- 33.Воскобоев В.И. Совершенствование методологии изменения активной мощности в судовой электроэнергетике [Текст] / В.И. Воскобоев, До Ань Туан // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2007. №2 (413).
- 34.Гайдукевич В.И. Случайные нагрузки силовых электроприводов [Текст] / В.И. Гайдукевич, В.С. Титов // – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 160 с.: ил.
- 35.Галеев В.Л. Исследование характеристик дизеля с турбонаддувом и регулируемым углом определения топлива [Текст] / В.Л. Галеев, И.В. Леонов // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: Основа, № 51, 1990. – С. 15-20.
- 36.Генкин К.И. Газовые двигатели [Текст] / К.И. Генкин. – М. : Машиностроение, 1977. – 196 с.
- 37.Герасимьяк Р.П. Динамика асинхронных электроприводов крановых механизмов [Текст] / Р.П. Герасимьяк. – М. :Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.
- 38.Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 [Текст] : учебное пособие / С.Г. Герман-Галкин. – СПб. : КОРОНА принт, 2001. – 320 с.:ил.
- 39.Горелик Г.Б. Автоматизированные системы управления судовых энергетических установок [Текст] / Г.Б. Горелик. – Хабаровск : Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 1999. – 36 с.
- 40.Горелик Г.Б. Автоматизированные системы управления судовыми энергетическими установками [Текст] / Г.Б. Горелик. – Хабаровск : Изд-во, 2001. – 21 с.
- 41.Грунауэр А.А. Микропроцессорный регулятор частоты вращения транспортного дизель-генератора [Текст] / А.А. Грунауэр, И.Д. Долгих,

- В.М. Никитин, В.А. Семенович // Двигатели внутреннего сгорания – 1983. – Вып. 44. – С. 18-26.
42. Грунауэр А.А., Рыбалченко А.Г. Анализ влияния нелинейностей на динамические качества САР турбонаддува ДВС [Текст] / А.А. Грунауэр, А.Г. Рыбалченко // Двигатели внутреннего сгорания. – 1982. Вып. 35. – С. 66–70.
43. Гуров А. А. Провалы напряжения в системах внутреннего электроснабжения и их влияние на преобразователи и источники электрической энергии [Текст] / А.А. Гуров, Р.Н. Буланов, Ю.А. Сергунов // Вторые Рудловские чтения. – БГТУ «Военмех», 2008. Ч.2. – С. 61–64.
44. Гурский С.К. Адаптивное прогнозирование временных рядов в электроэнергетике [Текст] / С.К. Гурский. – Мн. : Наука и техника, 1983. – 271 с.
45. Долгих И.Д. Исследование микропроцессорной САР частоты вращения транспортного дизеля на основе математического моделирования [Текст] / И.Д. Долгих // Двигатели внутреннего сгорания. – 1986. Вып. 46. – С. 86-91.
46. Долгих И.Д. Микропроцессорный регулятор частоты вращения транспортного дизель-генератора [Текст] / И.Д. Долгих // Двигатели внутреннего сгорания. – 1986. – Вып. 44. – С. 42-45.
47. Долгих И.Д. Принципы согласования параметров при синтезе микропроцессорных САР частоты вращения дизеля [Текст] / И.Д. Долгих, П.П. Петров // Двигатели внутреннего сгорания., 1982. – Вып. 46. – С. 92–97.
48. Дубицкий М.А. Выбор и использование резервов генерирующей мощности в электроэнергетических системах [Текст] / М.А. Дубицкий, Ю.Н. Руденко, М.Б. Чельцов. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 272 с.:ил.

- 49.Дульгер М.В. Газовая динамика и агрегаты наддува [Текст] / М.В. Дульгер, Г.Н. Злотин, Е.А. Федянов, В.А. Треплин. – Волгоград: ВолгПИ, 1989. – 330 с.
- 50.Евдокимов А.Г. Минимизация функции [Текст] / А.Г. Евдокимов. – Харьков, Издательское объединение «Вища школа», 1977. – 160 с.
- 51.Жадобин Н.Е. Элементы и функциональные устройства судовой автоматики [Текст] / Н.Е. Жадобин, А.П. Крылов, В.А. Малышев. – Санкт-Петербург ЭЛМОР, 1998. – 439 с.
- 52.Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. Изд. 2-е, перераб. и доп. [Текст] / И.В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 168с.
- 53.Журенко М.А. Технические средства автоматизации судовых энергетических установок [Текст] / М.А. Журенко, Н.В. Таранчук. – М. : Транспорт, 1990. – 320 с.
- 54.Измерительный преобразователь активной и реактивной мощности Е849/6-М1. [Текст] : Технический паспорт. – Могилев, 2000. – 12 с.
- 55.Карташев И. И. Управление качеством электроэнергии [Текст] / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др. – М. : Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.
- 56.Кильдишев Г.С. Анализ временных рядов и прогнозирование [Текст] / Г.С. Кильдишев, А.А. Френкель. – М. : Статистика, 1973. – 103 с.
- 57.Киричков В.Н. Идентификация объектов систем управления технологическими процессами [Текст] / В.Н. Киричков. – К. : Вища школа, 1990. – 187 с.
- 58.Климанов О.Н. Разработка систем уравнений для нормализации расчетов переходных процессов в СЭС [Текст] / О.Н. Климанов // Труды ЦНИИСЭТ, 1970, вып. 1. – С. 3-9.
- 59.Ключев В.И. Теория электропривода [Текст] : Учеб. для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. / В.И. Ключев. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 704 с., ил.

60. Коллеров Л.К. Газовые двигатели поршневого типа [Текст] / Л.К. Коллеров. – М. : Машиностроение, 1968. – 248 с.
61. Константинов В.Ц. Системы и устройства автоматизации судовых электроэнергетических установок [Текст] / В.Ц. Константинов. – Л. : Судостроение, 1988. – 312 с.
62. Королев Н.И. Регулирование судовых дизелей [Текст] / Н.И. Королев. – М. : 1983. – 144 с.
63. Королева Т.Н. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы [Текст] / Т.Н. Королева, и др. – Л.: Судостроение, 1989. – 64 с.
64. Концерн Ксимекс. Каталог электрооборудования [Текст] / Под ред. В.А. Зуев. – Одесса, 2009. – 500 с.
65. Котриков К.П. Влияние параметров асинхронного электропривода подруливающего устройства на его пусковой режим [Текст] / К.П. Котриков // Одесса, 1987. – Деп. в в/о Мортехинформреклама 9.03.88, № 827–МФ–88. – 25 с.
66. Котриков К.П. Регулирование пускового напряжения асинхронных двигателей подруливающих устройств с винтами регулируемого шага [Текст] / К.П. Котриков // – Одесса, 1988. – Деп. в в/о Мортехинформреклама 15.04.88. № 848–МФ–89. – 30 с.
67. Краснов В.В. Основы теории и расчета судовых электроэнергетических систем [Текст] / В.В. Краснов, П.А. Мещанинов, А.П. Мещанинов. – Л. : Судостроение, 1989. – 328 с.
68. Крутов В.И. Развитие автоматического регулирования двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В.И. Крутов // – М. : Недра, 1980. – С. 83-91.
69. Крутов В. И. Регулирование турбонаддува ДВС [Текст] / В.И. Крутов, А.Г. Рыбальченко. – М. : Высш. шк., 1978. – 213 с.
70. Крутов В.И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В.И. Крутов. – М. : Машиностроение, 1989. – 615 с.

71. Крутов В.И. Автоматическое регулирование и управление двигателях внутреннего сгорания [Текст] / В.И. Крутов. – М. : Машиностроение, 1989. – 415 с.
72. Крутов В.И. Автоматическое регулирование и управление двигателях внутреннего сгорания [Текст] / В.И. Крутов. – М. : Машиностроение, 1989. – 145 с.
73. Крутов В.И. Двигатель внутреннего сгорания как регулируемый объект [Текст] / В.И. Крутов. – М. : Машиностроение, 1978. – 471 с.
74. Крутов В.И. Развитие автоматического регулирования двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В.И. Крутов. – М. : Наука, 1980. – 92 с.
75. Крутов В.И. Равновесная характеристика двух импульсной САР [Текст] / В.И. Крутов, В.А. Горшков, А.Г. Кузнецов, И.В. Леонов, В.И. Шатров // Двигатели внутреннего сгорания. – 1985, Вып. 41. – С. 60-64.
76. Куско А. Качество энергии в электрических сетях [Текст] / А. Куско, М. Томпсон. – М. : Издательский дом «Додека – XXI», 2008. – 336 с.
77. Кутын Л.И. Комплексная автоматизация судовых дизельных и газотурбинных установок [Текст] / Л.И. Кутын, Л.И. Исаков. – Л. : Судостроение, 1984. – 251 с.
78. Ланчуковский В.И. Автоматизированные системы управления судовых дизельных и газотурбинных установок: учебник [Текст] / В.И. Ланчуковский, А.В. Козьминых. – М. : Транспорт, 1983. – 320 с.
79. Ланчуковский В.И. Автоматизированные системы управления судовых дизельных и газотурбинных установок [Текст] / В.И. Ланчуковский, А.В. Козьминых. – М. : Транспорт, 1990. – 335 с.
80. Левин М.И. Автоматизация судовых дизельных установок [Текст] / М.И. Левин. Издательство: Судостроение, 1969. – 465 с.
81. Левинштейн М.Л. Статическая устойчивость электрических систем [Текст] : Учебное пособие – М.Л. Левинштейн, О.В. Щербачев. – СПб. : СПбГТУ, 1994. – 264 с.

- 82.Леонов И.В. Автоколебания двухимпульсной САР комбинированного двигателя [Текст] / И.В. Леонов. – Двигатели внутреннего сгорания, Вып. 40, 1984. – С. 33-37.
- 83.Мелешкин Г.А. Устойчивость энергосистем [Текст] : Монография. Книга 1 / Г.А. Мелешкин, Г.В. Меркурьев. – СПб. : НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. – 369 с.
- 84.Меркурьев Г.В., Шарыгин Ю.М. Устойчивость энергосистем. Расчеты [Текст] : Монография / Г.В. Меркурьев, Ю.М. Шарыгин. – СПб. : НОУ "Центр подготовки кадров энергетики", 2006. – 300 с.
- 85.Мещанинов П.А. Автоматизация судовых электроэнергетических систем [Текст] / П.А. Мещанинов. – Л. : Судостроение, 1970. – 368 с.
- 86.Митин В.И. Применение аналитических преобразований на ЭВМ для кинетостатического динамического исследования двигателей типа Д-70 [Текст] / В.И. Митин, Л.И. Штейнвольф. – Двигатели внутреннего сгорания, Вып. 48, 1988. – С. 41-45.
- 87.Михайлов В.А. Автоматизация судовых электростанций [Текст] / В.А. Михайлов, Б.И. Норневский. – Л. : Судостроение, 1966. – 319 с.
- 88.Михайлов В.С. Судовая электроавтоматика [Текст] / В.С. Михайлов. – Л. : Судостроение, 1970. – 495 с.
- 89.Михальський В.М. Перетворювачі частоти і напруги з широтно-імпульсною модуляцією: аналіз та наукове обґрунтування шляхів підвищення якості електроенергії [Текст] : Автореферат / В.М. Михальський. – К.: Нац. академія Укр. Ін-т електродинаміки, 2010. – 41 с.
- 90.Молотов В.Т. Влияние запаздывания в системе регулирования дизель-генератора на её устойчивости [Текст] / В.Т. Молотов, Л.И. Березовский, А.П. Токин // Двигатели внутреннего сгорания. – 1984. Вып. 40. – С. 41-45.

- 91.Молотов В.Т. Динамика комбинированной системы регулирования дизель-генератора [Текст] / В.Т. Молотов, П.Я. Токин, П.И. Березовкин // Двигателестроение, 1982. – № 11. – С. 40-44.
- 92.Мэтьюз Дж.Г. Численные методы. Использование MATLAB. [Пер. с англ.] [Текст] / Дж.Г. Мэтьюз, К.Д. Финк. – М. : Изд. Дом «Вильямс», 2001. – 720 с.
- 93.Нелепина Р.А. Автоматизация судовых энергетических установок [Текст] / Р.А. Нелепина. – Л. : Судостроение. 1975. – 134 с.
- 94.Овчаренко Н.И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем [Текст] / Н.И. Овчаренко. – Москва : «Издательство НЦ ЭНА», 2001.
- 95.Оре О. Теория графов [Текст] / О. Оре. – М. : Наука, 1980. – 336 с.
- 96.Орлина А.С. Двигатели внутреннего сгорания [Текст] / А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – Москва : Машиностроение, 1985. – 489 с.
- 97.Орнов В.Г. Задачи оперативного и автоматического управления энергосистемами [Текст] / В.Г. Орнов, М.А. Рабинович. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 223 с.:ил.
- 98.Подчукаев В.А. Теория автоматического управления (аналитические методы) [Текст] / В.А. Подчукаев. – М. : Физматлит, 2004. – 392 с.
- 99.Прокопчик В. В. Повышение качества электроснабжения и эффективность работы электрооборудования предприятий с непрерывными технологическими процессами [Текст] / В.В. Прокопчик // – Гомель : Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, 2002. – 210 с.
100. Пронин М.В. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи [Текст] / М.В. Пронин, А.Г. Воронцов. М. : ОАО "Электросила", 2003. – 172 с.
101. Прохоренков А.М. Судовая автоматика [Текст] / А.М. Прохоренков, В.С. Солодов, Ю.Г. Татьянченко. – М. : Колос, 1992. – 448 с.

102. Расчет характеристик комбинированного дизеля. [сб. науч. труд.] [Текст]. – М. : «УДН», 2006. – 68 с.
103. Рідкокаша А.А. Основи систем штучного інтелекту [Текст] : Навчальний посібник / А.А. Рідкокаша, К.К. Голдер // Черкаси, "ВІДЛУННЯ-ПЛЮС", 2002. – 240 с.
104. Ржепецкий К.Л. Судовые двигатели внутреннего сгорания [Текст] / К.Л. Ржепецкий, Е.А. Сухарева. – Л. : Судостроение, 1984. – 168 с.
105. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети [Текст] / А.П. Ротштейн. – Винница : УНИВЕРСУМ, 1999. – 320 с.
106. Ротштейн А.П. Влияние методов деффазификации на скорость настройки нечеткой модели [Текст] / А.П. Ротштейн, С.Д. Штовба // Кибернетика и системный анализ. – 2002. – №1.
107. Рябенский В.М. Исследование провалов и всплесков напряжения в автономных электроэнергетических системах [Текст] / В.М. Рябенский, А.О. Ушкаренко, Нгуен Ван Тхань // Технічна електродинаміка. Тем. випуск. Київ, 2010. Ч.1. – С.182-186.
108. Рябенский В.М. Моделирование микропроцессорных систем управления газодизель-генераторными установками [Текст] / В.М. Рябенский, А.О. Ушкаренко, В.И. Воскобоенко // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2009, №637. – С. 78-82.
109. Рябенский В.М. Оценка неравномерности распределения активной мощности между генераторами при параллельной работе [Текст] / В.М. Рябенский, А.О. Ушкаренко, В.И. Воскобоенко // Технічна електродинаміка. Тем. випуск. Київ, 2009. №3. – С. 76-79.
110. Рябенский В.М. Моделирование газодизель-генераторных агрегатов и оптимизация параметров их ПИД-регуляторов в Matlab/Simulink [Текст] / В.М. Рябенский, В.И. Воскобоенко, Нгуен

Ван Тхань, В.П. Мишустов // Вестник ХНТУ. – Херсон: ХНТУ, 2011, №2 (41). – С. 392-396.

111. Рябенский В.М. Апаратно-програмні засоби моделювання систем керування автономними електроенергетичними установками [Текст] / В.М. Рябенский, А.О. Ушкаренко, Халед Омар Ганнам // Технічна електродинаміка. Тем. випуск. Київ, 2011. Ч.1. – С. 208-212.
112. Рябенский В.М. Оптимизация коэффициентов ПИД-регулятора оборотов газодизель-генераторного агрегата [Текст] / В.М. Рябенский, А.О. Ушкаренко, В.И. Воскобоев, В.П. Мишустов, Нгуен Ван Тхань // Технічна електродинаміка. Тем. випуск. Київ, 2011. Ч.1. – С.172-177.
113. Рябенский В.М.. Оптимизация параметров регулятора системы возбуждения при резкопеременных нагрузках [Текст] / В.М. Рябенский, А.О. Ушкаренко, В.И. Воскобоев, Нгуен Ван Тхань // Матеріали II міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». Миколаїв: НУК, 2011. – С. 533-537.
114. Рябенский В.М. Применение принципов нечеткого управления для оптимизации коэффициентов ПИД-регулятора оборотов ГДГА [Текст] / В.М. Рябенский, В.П. Мишустов // Матеріали II міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». Миколаїв: НУК, 2011. – С. 552-556.
115. Сейдж Э.П. Идентификация систем управления [Текст] / Э.П.Сейдж, Дж. Л. Мелса. – М. : Наука, 1974. – 246 с.
116. Скаженик А.М. Исследование влияния угла определения впрыскивания топлива на параметры работы тепловозного дизеля 10Д-100 [Текст] / А.М. Скаженик, Ф.В. Гринсберг // Двигатели внутреннего сгорания, 1984, Вып. 40. – С. 37–41.
117. Слежановский О.В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями [Текст] / О.В. Слежановский. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

118. Смоловик С.В. Методы математического моделирования переходных процессов высокоиспользованных и нетрадиционных синхронных генераторов электроэнергетической системы [Текст] / С.В.Смоловик. –Л. : Ленингр. пол. ин-т., 1988. – 421 с.
119. Солодов В.С. Преобразование полиномиальных моделей, построенных по экспериментальным данным [Текст] / В.С. Солодов, А.В. Власов // Вестник МГТУ, том 9, №2, 2006. – С. 337–350.
120. Солодов В.С. Применение методов планирования активного эксперимента для идентификации судового комплекса [Текст] / В.С. Солодов, Ю.И. Юдин // Вестник МГТУ, том 9, №2, 2006. – С.187-190.
121. Солодовников В.В. Теория автоматического управления техническими системами [Текст] : учеб. Пособие / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М. : Изд-во МГТУ, 1993. – 492 с.
122. Стефановский Б.С. Испытания двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Б.С. Стефановский. – М. : Машиностроение, 1972. – 385 с.
123. Ткаченко В.Н. Параметрическая идентификация нелинейных систем в условиях бифуркации [Текст] / В.Н. Ткаченко, А.В. Ткаченко // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Сер. обчислювальна техніка та автоматизація, випуск 65. – Донецьк: ДонНТУ. – 2004. – С. 57-62.
124. Ткаченко А.Н. Судовые системы автоматического управления и регулирования [Текст] / А.Н. Ткаченко. – Л. : Судостроение, 1984. – 228 с.
125. Толшин В. И. Экспериментально-расчетный метод исследования обменных колебаний мощности при параллельной работе дизель-генератора с сетью [Текст] / В.И. Толшин, Б.И. Болотин // Энергомашиностроение, 1967, № 9. – С. 38-45.
126. Толшин В.И. Переходные процессы в дизель-генераторах [Текст] / В.И. Толшин, Е.С. Ковалевский. – Л., 1977. – 166 с.

127. Топорков В.П. Повышение запаса устойчивости параллельной работы генераторных агрегатов в корабельной электроэнергетической системе [Текст] / В.П. Топорков, Д.Ю. Копытов // Судостроение. № 4. – 2004. – С. 49-51.
128. Ушкаренко А.О. Исследование путей повышения стабильности оборотов газодизеля [Текст] / А.О. Ушкаренко, В.П. Мишустов // Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів, молодих вчених. – Миколаїв: НУК, 2009. – С. 37-38.
129. Ушкаренко О.О. Реалізація системи керування трифазним тиристорним випрямлячем з використанням автоматного програмування [Текст] / О.О. Ушкаренко, Р.А. Спекторенко, К.В. Світлинський // Електротехніка і електромеханіка: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів, молодих вчених з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2007. – С. 87-91.
130. Филлипс Ч. Системы управления с обратной связью [Текст] / Ч. Филлипс, Р. Харбор. – М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 616 с.
131. Фомин Я.А. Теория выбросов случайных процессов / Фомин Я.А. // – М.: Связь, 1980. – 216 с.: ил.
132. Фрейдзон И. Р. Микропроцессорные системы управления техническими средствами судов [Текст] / И. Р. Фрейдзон, Л. Г. Филиппов, Р. И. Фрейдзон. – Л. : Судостроение, 1985. – 248 с.
133. Хачиян А.С. Двигатели внутреннего сгорания [Текст] / А.С. Хачиян, К.А. Морозов, В.И. Трусов, и др. – М. : Высш. школа, 1978. – 280 с.
134. Черных И. В. Simulink: Среда создания инженерных приложений [Текст] / И. В. Черных. – М. : Изд-во: Диалог-МИФИ, 2004. – 496 с.
135. Щеглов А.А. Регулирование частоты вращения судового двигателя внутреннего сгорания [Текст] / А.А. Щеглов. – М. : Вестник МГТУ, том 9, №2, 2006. – С. 312-317.

136. Экспериментальные исследования неравномерности распределения топлива и воздуха по цилиндрам [Текст] / Двигатели внутреннего сгорания. – 1988. Вып. 48. – С. 41-45.
137. Пат. 42829 Україна, МПК (2009) H02M 1/08. Пристрій підключення основного і додаткового генератора до загального навантаження і розподілу активної потужності між ними. / Рябенський В.М., Ушкаренко О.О., Петренко Л.П., Ключко А.С.; заявник і патентовласник НУК ім. адм. Макарова. – Заяв. № u200900962 від 09.02.2009; Опубл. 27.07.2009. – Бюл. №14.
138. Пат. 42852 Україна, МПК (2009) H02M 1/08. Пристрій для стабілізації частоти вихідної напруги газодизель-генератора. / Рябенський В.М., Ушкаренко О.О., Воскобоєнко В.І., Петренко Л.П., Ключко А.С.; заявник і патентовласник НУК ім. адм. Макарова. – Заяв. № u200901326 від 17.02.2009; Опубл. 27.07.2009. – Бюл. №14.
139. Пат. 42850 Україна, МПК (2009) H02M 1/08. Спосіб стабілізації частоти вихідної напруги газодизель-генератора. / Рябенський В.М., Ушкаренко О.О., Воскобоєнко В.І., Петренко Л.П., Ключко А.С.; заявник і патентовласник НУК ім. адм. Макарова. – Заяв. № u200901319 від 17.02.2009; Опубл. 27.07.2009. – Бюл. №14.
140. Пат. 48883 Україна, МПК (2009) H02M 1/08. Спосіб стабілізації частоти обертів газодизель-генератора. / Рябенський В.М., Ушкаренко О.О., Воскобоєнко В.І., Мішустов В.П., Петренко Л.П.; заявник і патентовласник НУК ім. адм. Макарова. – Заяв. № u200910149 від 06.10.2009; Опубл. 12.04.2010. – Бюл. №7.
141. Пат. 53711 Україна, МПК (2009) H02M 1/08. Спосіб керування збудженням синхронного генератора при зміні частоти вихідної напруги. / Рябенський В.М., Ушкаренко О.О., Білоконь О.Л., Нікішина М.В.; заявник і патентовласник НУК ім. адм. Макарова. – Заяв. № u201006006 від 18.05.2010; Опубл. 11.10.2010. – Бюл. №19.

142. Пат. 56989 Україна, МПК (2010) H02M 1/08. Спосіб стабілізації реактивної потужності синхронного генератора шляхом слідкуючого коригування його напруги збудження. / Рябенський В.М., Ушкаренко О.О., Білоконь О.Л.; заявник і патентовласник НУК ім. адм. Макарова. – Заяв. № U201005973 від 10 лютого 2011 р.
143. Пат. 56988 Україна, МПК (2010) H02M 1/08. Спосіб послідовного коригування струму збудження синхронного генератора для стабілізації його реактивної потужності. / Рябенський В.М., Ушкаренко О.О., Білоконь О.Л.; заявник і патентовласник НУК ім. адм. Макарова. – Заяв. № U201005970 від 10 лютого 2011 р.
144. Пат. 63053 Україна, МПК (2010) H02M 1/08. Спосіб упереджуючого корегування напруги збудження генератора при роботі на асинхронний двигун. / Рябенський В.М., Ушкаренко О.О., Дубовик Я.А.; заявник і патентовласник НУК ім. адм. Макарова. – Заяв. № U201102430 від 26 вересня 2011 р.
145. Пат. 62907 Україна, МПК(2010) H02M 1/08. Пристрій упереджуючого корегування напруги збудження генератора при роботі на асинхронний двигун. / Рябенський В.М., Ушкаренко О.О., Дубовик Я.А.; заявник і патентовласник НУК ім. адм. Макарова. – Заяв. №. U201100497 від 26 вересня 2011 р.
146. Пат. 62906 Україна, МПК(2010) H02M 1/08. Пристрій упереджуючого керування генератором, що працює на асинхронний двигун. / Рябенський В.М., Ушкаренко О.О., Дубовик Я.А., Крилов А.В.; заявник і патентовласник НУК ім. адм. Макарова. – Заяв. №. U201100496 від 26 вересня 2011 р.
147. Пат. 62904 Україна, МПК(2010) H02M 1/08. Спосіб упереджуючого керування генератором, що працює на асинхронний двигун. / Рябенський В.М., Ушкаренко О.О., Дубовик Я.А., Крилов А.В.; заявник і патентовласник НУК ім. адм. Макарова. – Заяв. № U201100491 від 26 вересня 2011 р.

148. Kruse R. Learning methods for fuzzy systems / Kruse R., Nauck D. // Proceedings of Third German GI-Workshop "Neuro-Fuzzy Systeme 95". – Darmstadt (Germany). – 1995
149. Kruse R. NEFCLASS – a neuro-fuzzy approach for the classification of data / Kruse R., Nauck D // Applied computing 1995. Proc. of the 1995 ACM Symposium on Applied Computing. – Nashville. – 1995.
150. Marouf A.A. Computeraided discretization of continuous data control systems / Marouf A.A., Al-Assadi S.A.K. // "Comput. Aided Des.", 1985, N4, p.169-178.
151. Nauck D. Neuro-fuzzy classification initialized by fuzzy clustering / Nauck D., Klawonn F. // Proc. Forth European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing (EUFIT'96), Aachen. – 1996.
152. Nauck D. New learning algorithms for the neuro-fuzzy environment NEFCON-I / Nauck D., Kruse R., Stellmach R. // Proceedings of Third German GI-Workshop "Fuzzy-Neuro-Systeme 95". – Darmstadt (Germany). – 1995.

