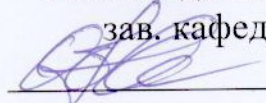


НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
(назва інституту, факультету)

Кафедра суднових електроенергетичних систем
(назва кафедри)

Рекомендовано до захисту
зав. кафедри СЕЕС

 Брудов А.В.
« » 2024 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до магістерської роботи

на тему Розробка енергоефективного

напівпровідникового двоканального компенсатора

неактивних складових повної потужності

Виконав: студент VI курсу, групи 6365м
Спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

освітньо-професійної програми
«Системи генерування електроенергії та
електропостачання»

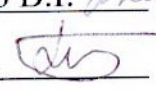
(шифр і назва ОПП)

Болячевець М.О. 

(прізвище та ініціали)

керівник к.т.н., доц. Костюченко В.І. 

(прізвище та ініціали)

Рецензент к.т.н., доц. Білюк І.С. 

(прізвище та ініціали)

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Інститут, факультет Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра суднових електроенергетичних систем

Рівень вищої освіти магістр

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

(шифр і назва)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма «Системи генерування електроенергії та електропостачання»

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри СЕЕС

Обрубов А.В.

« » 2024 року

ЗАВДАННЯ на магістерську роботу

Студенту Болячевець Михайлу Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1. Тема кваліфікаційної роботи Розробка енергоефективного напівпровідникового двоканального компенсатора неактивних складових повної потужності

Науковий керівник роботи Костюченко В.І., к.т.н., доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «14» 10 2024 року № 1075-уз

2. Строк подання студентом роботи 12 грудня 2024 р.

3. Об'єкт дослідження процес компенсації неактивних складових повної потужності трифазної мережі електроживлення

4. Предмет дослідження: методи керування енергоефективними напівпровідниковими компенсаторами неактивних складових повної потужності трифазної мережі електроживлення

5. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): аналіз впливу неактивних складових повної потужності на якість електроенергії мережі живлення; оптимізації системи керування двоканальним компенсатором; охорона праці; охорона навколишнього середовища

6. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Електронна презентація

7. Дата видачі завдання на кваліфікаційну роботу «11» вересня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Аналіз неактивних складових повної потужності і керовані багатофункціональні пристрої для їх компенсації	27.09.2024 р.	
2	Розробка системи керування двоканальним напівпровідниковим компенсатором	27.10.2024 р.	
3	Оптимізація системи керування двоканальним компенсатором	27.11.2024 р.	
4	Підготовка розділів з охорони праці та охорони навколишнього середовища	05.12.2024 р.	
5	Оформлення магістерської роботи.	12.12.2024 р.	

Студент


(підпис)

Болячевець М.О.
(прізвище та ініціали)

Науковий керівник


(підпис)

Костюченко В.І.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота присвячена дослідженню і розробці методик поліпшення електромагнітної сумісності споживачів електричної енергії з мережею живлення, шляхом застосування енергоефективних багатофункціональних компенсаторів неактивних складових повної потужності, розробки структури та алгоритмів роботи цифрових багатоконтурних систем керування такими компенсаторами із застосуванням сучасних теорій потужності, методів керування за прогнозом і нечіткої логіки.

Розроблено fuzzy-регулятор у складі системи керування компенсатором, застосування якого дає змогу в процесі компенсації реактивної потужності зменшити генерування в мережу вищих гармонік струму, не перевищуючи при цьому встановлений рівень комутаційних перенапруг. Розроблено методику вибору параметрів налаштування fuzzy-регулятора на основі методів багатовимірної оптимізації.

Розроблено мікропроцесорну систему керування двоканалним компенсатором на основі процесора загального призначення серії TMS та показано реалізацію контуру регулювання гармонік струму мережі живлення на основі процесора спеціального призначення 68HC12 фірми Motorola.

Ключові слова: компенсаційні випрямлячі, тиристорні компенсатори реактивної потужності, транзисторний інвертор, керований випрямляч, ємнісний накопичувач, система керування, якість електроенергії.

ABSTRACT

The master's thesis is devoted to the research and development of methods for improving the electromagnetic compatibility of consumers of electric energy with the power supply network, through the use of energy-efficient multifunctional compensators of inactive components of full power, the development of the structure and algorithms of digital multi-loop control systems for such compensators using modern power theories, predictive control methods and fuzzy logic.

A fuzzy regulator has been developed as part of the compensator control system, the use of which allows reducing the generation of higher current harmonics in the network during reactive power compensation, without exceeding the established level of switching overvoltages. A method for selecting the parameters for setting the fuzzy regulator based on multidimensional optimization methods has been developed.

A microprocessor control system for a two-channel compensator based on a general-purpose processor of the TMS series has been developed and the implementation of a power supply network harmonics control circuit based on a special-purpose processor 68HC12 from Motorola has been shown.

Keywords: compensation rectifiers, thyristor reactive power compensators, transistor inverter, controlled rectifier, capacitive storage, control system, power quality.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. НЕАКТИВНІ СКЛАДНІ ПОВНОЇ ПОТУЖНОСТІ І.....	12
КЕРОВАНІ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ ЇЇ КОМПЕНСАЦІЇ ...	12
1.1. Неактивні складові повної потужності та вплив їх на якість електроенергії мережі живлення.....	12
1.2. Регулювання якості електроенергії мережі живлення.....	22
1.2.1. Використання складових повної потужності в САУ напівпровідниковими компенсаторами	22
1.2.2. Визначення миттєвих активної та реактивної потужностей у сучасних теоріях потужності	26
1.3. Керування багатофункціональними пристроями компенсації неактивних складових повної потужності	33
1.3.1. Особливості побудови багатофункціональних пристроїв компенсації неактивних складових повної потужності.....	33
1.3.2. Використання прогностичних обчислень у системах керування.....	37
1.3.3. Особливості проектування нечітких регуляторів у складі САК напівпровідниковими компенсаторами	42
Висновки до розділу 1	50
РОЗДІЛ 2. КЕРУВАННЯ ДВОКАНАЛЬНИМ НАПІВПРОВІДНИКОВИМ КОМПЕНСАТОРОМ	51
2.1. Двоконтурна система керування двоканальним компенсатором неактивних складових повної потужності	51
2.2. Fuzzy-регулятор у складі двоконтурної цифрової системи керування компенсатором	65
2.3. Керування низькочастотним каналом напівпровідникового двоканального компенсатора.....	74
Висновки до розділу 2	84

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ І РЕЗУЛЬТАТИ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДВУХКАНАЛЬНИМ КОМПЕНСАТОРОМ.....	85
3.1. Дослідження роботи цифрової системи керування низькочастотним каналом компенсатора.....	85
3.2. Дослідження роботи двоконтурної системи керування компенсатором	97
3.3. Методика вибору параметрів цифрового fuzzy-регулятора.....	102
3.4. Поліпшення енергетичних характеристик компенсатора неактивних складових повної потужності	107
3.5. Мікропроцесорна реалізація fuzzy-регулятора системи керування двоканальним компенсатором.....	112
Висновки до розділу 3	120
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	122
4.1. Загальні положення	122
4.2. Аналіз умов праці вахтового електромеханіка в приміщенні ЦПУ	123
4.2.1. Електробезпека при експлуатації електростанції	124
4.2.2. Заходи щодо захисту рідких і газоподібних речовин від статичної електрики.....	125
4.2.3. Небезпеки механічного та теплового травматизму	127
4.2.4. Пожежна безпека	127
4.2.5. Мікроклімат і шкідливі домішки в приміщенні ЦПУ	129
4.2.6. Вібрація і шум.....	129
4.2.7. Освітлення.....	130
4.2.8. Шкідливі випромінювання.....	131
4.3. Розрахунок освітлення в ЦПУ	132
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	134
5.1. Джерела забруднення навколишнього середовища	134
5.2. Заходи з охорони навколишнього середовища.....	139
ВИСНОВКИ.....	146
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	148

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АКВ – активний керований випрямляч;

АСК ТП – автоматизована система керування технологічним процесом;

БЦО – блок цифрової обробки;

ЕЕ – електроенергія;

ЕОМ – електронна обчислювальна машина;

ЕП – електроприймач;

КВ – керований випрямляч;

ККВ – компенсований керований випрямляч;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

НР – нечіткий регулятор;

ПЯЕ – показник якості електроенергії;

САФ – силовий активний фільтр;

СІФК – система імпульсно-фазового керування;

СК – система керування;

ФКП – фільтрокомпенсуючий пристрій;

ФП – функція приналежності;

ЯЕ – якість електроенергії.

ВСТУП

Проблема забезпечення якості електроенергії висувається на перший план при вирішенні питань виробництва, передачі й використання електроенергії. Її важливість зростає зі зростаючим впровадженням в енергосистему нелінійних навантажень, робота яких спричиняє появу неактивних складових повної потужності. Існуючі на сьогодні міжнародні та державні стандарти жорстко обмежують вимоги до якості електроенергії та забезпечення електромагнітної сумісності мережевих перетворювачів з мережею живлення змінного струму.

На даний час запропоновані різні варіанти побудови пристроїв компенсації неактивної потужності мережі живлення, однак, вузька спеціалізація та орієнтація на конкретний вид спотворення мережі живлення вказують на доцільність комплексного підходу до вирішення задачі підвищення якості електроенергії та відповідності її стандартам. Перспективним напрямком є створення багатофункціональних пристроїв, що виконують функції компенсатора несиметрії мережі живлення, стабілізатора, активного фільтру та компенсатора реактивної потужності.

Існують розробки структур силових пристроїв, які вирішують ідею багатофункціональності. Силу схему багатофункціонального пристрою, що виконує функції компенсатора несиметрії струмів фаз мережі живлення, фільтра вищих гармонік і компенсатора реактивної потужності доцільно будувати з поділом виконуваних функцій по окремих каналах, які відрізняються за частотою комутації силових ключів, швидкодією для мінімізації втрат потужності. Забезпечення оптимальних умов роботи силового обладнання можливо за рахунок поліпшення електромагнітної сумісності навантаження з мережею живлення та підтримки на заданому рівні параметрів електричної енергії. Потребує вирішенню питання роботи подібних компенсаторів в умовах зміни характеру навантаження, а також адаптивності подібних пристроїв до вимог конкретного замовника, що обумовлює удосконалення та розробку універсального напівпровідникового компенсатора з ефективною цифровою швидкодіючою системою керування та

регулювання.

Таким чином, актуальною є науково-практична задача створення структур систем керування та алгоритмів керування енергоефективними багатофункціональними напівпровідниковими компенсаторами неактивних складових повної потужності; математичних моделей таких компенсаторів для аналізу їх статичних та динамічних характеристик, показників якості електроенергії мережі живлення, енергетичних характеристик компенсаторів.

Об'єктом дослідження магістерської роботи є процес компенсації неактивних складових повної потужності трифазної мережі електроживлення.

Предметом досліджень є методи керування енергоефективними напівпровідниковими компенсаторами неактивних складових повної потужності трифазної мережі електроживлення.

Цілі та задачі дослідження:

- аналіз засобів і пристроїв компенсації неактивної потужності в трифазних мережах електроживлення з нелінійним навантаженням, способів керування компенсаторами неактивних складових повної потужності;
- розробка теоретичних положень побудови багатофункціонального двоканального компенсатора неактивних складових повної потужності, критеріїв розрахунку параметрів силової схеми пристрою;
- розробка нових принципів та методик керування напівпровідниковим двоканальним компенсатором неактивних складових повної потужності;
- синтез fuzzy-регулятора, що входить до складу системи керування двоканальним напівпровідниковим компенсатором, розробка методик вибору параметрів налаштування регулятора;
- розробка та дослідження комп'ютерної моделі напівпровідникового компенсатора з цифровою системою керування і регулювання.

Методи дослідження: положення сучасних теорій потужності, методи обчислення з прогнозуванням, методи регулювання на основі нечіткої логіки; методи рішення диференціальних та алгебричних рівнянь; методи цифрового

моделювання на основі пакету програми Matlab, методи оптимізації багатовимірних задач.

Наукова новизна отриманих результатів:

- запропоновано новий принцип комплексного підходу до вирішення завдання підвищення якості електроенергії мережі живлення і поліпшення електромагнітної сумісності навантаження з мережею живлення;
- вперше запропоновано нові методики керування двоканальним компенсатором, що дозволяють забезпечити високі динамічні характеристики перетворювача в умовах зміни характеру навантаження;
- отримали подальший розвиток теоретичні положення побудови мікропроцесорних систем керування двоканальним напівпровідниковим компенсатором на основі fuzzy-логіки і прогнозних обчислень, запропоновано перспективні структури систем керування і регулювання такими перетворювачами;
- удосконалено методики вибору параметрів налаштування fuzzy-регуляторів з використанням методів багатовимірної оптимізації, визначені варіативні параметри і показники якості, обрані функції обмежень та цільова функція.

РОЗДІЛ 1. НЕАКТИВНІ СКЛАДНІ ПОВНОЇ ПОТУЖНОСТІ І КЕРОВАНІ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ ЇЇ КОМПЕНСАЦІЇ

1.1. Неактивні складові повної потужності та вплив їх на якість електроенергії мережі живлення

Якість електричної енергії (ЯЕ) визначається сукупністю її характеристик, за яких електроприймачі (ЕП) можуть нормально працювати і виконувати закладені в них функції.

ЯЕ до і після включення ЕП в точці його приєднання до електричної мережі може бути різною, що обумовлює проблему електромагнітної сумісності промислових ЕП з мережею живлення, що виникає при цьому. Під електромагнітною сумісністю розуміють здатність ЕП функціонувати в його електромагнітному середовищі (в електричній мережі, до якої він приєднаний), не створюючи неприпустимих електромагнітних перешкод для інших ЕП, що функціонують у тому середовищі.

Для можливості імпорту та експорту електро-, радіо- та електронної продукції між різними країнами необхідне зближення галузевих та державних стандартів окремих країн до якихось достатніх єдиних світових стандартів.

Міжнародні стандарти МЕК-868, МЕК 1000-3-2, МЕК 1000-3-3, МЕК 1000-4-1 встановлюють норми якості електричної енергії та методи їх виміру. В Україні електрична енергія підлягає обов'язковій сертифікації за показниками якості електроенергії, встановленими ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності». Це означає, що кожна енергопостачальна організація поряд з ліцензією на виробництво, передачу та розподіл електроенергії повинна отримати сертифікат, що засвідчує, що якість енергії, що поставляється нею, відповідає вимогам ДСТУ EN 50160:2014.

В Україні для визначення показників якості електричної енергії використовується ДСТУ EN 50160:2014 [1].

Стандартом встановлюються такі показники якості електроенергії (ПЯЕ):

- відхилення напруги, що встановилася;
- розмах зміни напруги;
- доза флікера;
- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги;
- коефіцієнт n-ої гармонійної складової напруги;
- коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності;
- коефіцієнт несиметрії напруг по нульовій послідовності;
- відхилення частоти;
- тривалість провалу напруги;
- імпульсна напруга;
- коефіцієнт тимчасової перенапруги.

Частина ПЯЕ характеризує встановлені режими роботи електрообладнання енергопостачальної організації та споживачів електричної енергії (ЕЕ) і дає кількісну оцінку по ЯЕ особливостям технологічного процесу виробництва, передачі, розподілу та споживання ЕЕ. До цих ПЯЕ відносяться: відхилення напруги, коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги, коефіцієнт n-ої гармонійної складової напруги, коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності, коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю, відхилення частоти, розмах зміни напруги.

Крім перерахованих стандартів на якість електричної енергії в мережах загального користування, стандартизовано вимоги до якості електричної енергії власне на вентильні перетворювачі [7]:

1. Коефіцієнт амплітудної модуляції напруги

$$k_{\text{мод}} = \frac{u_{\text{мод}}}{\sqrt{2}u_{\text{ном}}}, \quad (1.1)$$

де $u_{\text{мод}}$ – половинна різниця між максимальним і мінімальним значенням амплітуд напруги, що огинає;

$\sqrt{2}u_{\text{ном}}$ – амплітуда номінального значення синусоїдальної напруги.

2. Відношення напруги до частоти: u/f , що визначається чинним значенням напруги у вольтах та частоти в герцах;

3. Коефіцієнт пульсацій

$$k_{\text{пул}} = \frac{u_{\text{пул}}}{u_{\text{ном}}} \cdot 100\%, \quad (1.2)$$

де $u_{\text{пул}}$ – найбільше (амплітудне) значення змінної складової напруги;

$u_{\text{ном}}$ – номінальне значення постійної напруги;

4. Коефіцієнт корисної дії

$$\eta = \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}}, \quad (1.3)$$

5. Коефіцієнт потужності

$$\chi = \frac{P}{S} \quad (1.4)$$

де P – активна потужність; S – повна потужність.

Огляд літератури в галузі проблем якості електроенергії показав, що наявного в даному стандарті набору показників якості електроенергії недостатньо для обліку всіх спотворень в мережі живлення, що визначають шкоду споживача, насамперед це стосується несинусоїдності напруги.

У зарубіжній літературі під якістю електроенергії часто розуміють не тільки збереження параметрів напруги мережі живлення в допустимих нормах, але і показники струму, що споживається з мережі. Міжнародні стандарти якості електроенергії (наприклад IEEE 519-1992) обмежують не тільки гармонійний склад напруги живлення, але і струму, що споживається. Деякі міжнародні та національні стандарти розвинених європейських країн на якість електричної енергії містять норми за гармоніками споживаного струму до 40-ї. При цьому основним фактором оцінки є інтегральний показник гармонійного складу струму THD (Total Harmonic Distortion, %)

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_i^2}}{I_1}$$

де I_i , I_1 – струми i -ї та першої гармонік.

У міжнародних стандартах (наприклад, МЕК 1000-2-4) введено обмеження емісії гармонійних складових струму технічних засобів із споживаним струмом у фазі не більше 16 А. Відповідно до стандартів, все технічні засоби класифікуються за граничними значеннями гармонік струму навантаження, тобто визначаються лише граничні значення гармонік струму, але не його коефіцієнт гармонік. Також встановлено граничне значення коефіцієнта гармонік струму, що дорівнює $K_{ГТ} = 0,08 \dots 0,20$ залежно від мережі.

Вплив навантаження на показники якості електроенергії мережі живлення. На електростанціях, як правило, виробляють електроенергію досить високої якості, а погіршення ЯЕ відбувається у процесі її передачі та споживання внаслідок впливу електричних приймачів.

Численні дослідження показують, що у 70 % випадків на якість електроенергії впливають споживачі електроенергії і лише у 30% випадків – виробники електроенергії.

Вирішуючи питання підвищення якості електроенергії, слід враховувати основні причини, що впливають на значення показників якості електроенергії, як з боку джерела електроенергії, так і з боку споживачів.

Як зазначено у роботах [2, 3] аналіз цих причин показав, що відхилення напруги визначається невідповідністю потужностей мережі живлення і споживаної потужності, а також роботою генераторів електростанцій, розмах і фаза коливань напруги – перехідними процесами, пов'язаними з перемиканням навантаження. Коефіцієнти зворотної та нульової послідовності визначаються симетричністю споживаного струму. Провали напруги викликаються аварійними режимами як джерела, так і споживачів. Імпульсна напруга, як правило, викликається комутаціями апаратів керування та захисту споживачів, що живляться від джерела або атмосферними електромагнітними явищами (грозові імпульси). Слід виділити спотворення напруги, що мають характер зазубрин (notch), викликані комутацією силових тиристорів та діодів у потужних джерелах живлення. Найбільш небезпечними є спотворення напруги поблизу переходу

напруги живлення через нуль. Ці спотворення можуть спричинити додаткові комутації ключів малопотужних джерел живлення.

Характерною особливістю сучасних систем електропостачання є їхня насиченість споживачами, вольтамперні характеристики яких нелінійні. Такі навантаження для мережі живлення є джерелами тривалих спотворень напруги.

Як вказується в [4, 5] в електричних мережах загального користування є безліч різних споживачів і спотворення форми кривих струму і напруги пов'язано, як правило, з посиленням взаємного впливу різних видів електрообладнання. Для характеристики цього впливу використовується поняття електромагнітна сумісність.

У статті [4], за аналогією зі стандартом МЕК 1000-2-4, пропонується розділити електромагнітне середовище на три класи:

Клас 1. До нього слід віднести ЕП ЕОМ, АСУ ТП, системи управління відповідальними ЕП, апаратуру КВП технологічних лабораторій тощо. Саме ці ЕП дуже чутливі до електромагнітних перешкод.

Клас 2. Сюди входять ЕП з електродвигунами змінного струму (насоси, вентилятори, компресори, димососи, пересувні механізми, верстати, преси тощо). До цього ж класу відносяться електричні печі опору та індукційні печі промислової частоти, електричне освітлення і т.д., що не створюють перешкод високих рівнів і не дуже чутливі до них.

Клас 3. До його складу включені ЕП: перетворювачі струму і частоти, електрозварювальні машини та установки, ЕП з електродвигунами, що часто запускаються, і з різко змінним режимом роботи, які створюють перешкоди з високим рівнем.

Існує ряд ЕП (дугові печі, прокатні стани, великі електролізні установки), які створюють електромагнітні перешкоди вищі, ніж ЕП третього класу. Ці ЕП слід живити від окремих трансформаторів, підключених до мереж 6 кВ і вище та їх рівні сумісності повинні узгоджуватися з живильною енергосистемою.

У зазначеній статті також наведено рівні ЕМС, що рекомендуються автором, для трьох класів електромагнітних середовищ, які відповідають стандарту ДСТУ EN 61000-3-3:2017.

При вирішенні завдання покращення ЯЕ повинна враховуватись необхідність забезпечення електромагнітної сумісності обладнання.

Згідно [6, 7] для аналізу якості електроенергії найзручніше виділити електромагнітні перешкоди, які найчастіше зустрічаються, якими є: провали і підйоми напруги, тимчасові пропадання напруги, тривале спотворення форми напруги, несиметрія фазних напруг, перехідні процеси. Дуже актуальною проблемою є споживання нелінійного навантаження вищих гармонік струму.

Відповідно до стандарту на обмеження емісії гармонійних складових струму технічних засобів (МЕК 01000-3-2-95) усі технічні засоби класифікуються таким чином:

- клас А – симетричні, трифазні технічні засоби, що не входять до класу В, С, Д;
- клас В – переносні електроінструменти;
- клас С – світлові прилади, включаючи пристрої регулювання;
- клас Д – технічні засоби із споживаним струмом спеціальної прямокутноступінчастої форми та активною потужністю менше 600 Вт.

До кожного класу є свої граничні значення гармонік струму.

В електричних мережах загального користування присутня безліч нелінійних споживачів, результуюча зворотна дія на мережі яких може як підсумовуватися, так і послаблюватися. Великі труднощі при контролі якості напруги у вузлі енергосистеми представляє визначення пайових вкладів спотворень від вищих гармонік окремих нелінійних навантажень, підключених до вузла, у загальне спотворення напруги у вузлі.

Питання визначення вкладів нелінійних споживачів у спотворення напруги мережі живлення у точці загального приєднання розглянуто в [6]. Велика питома вага нелінійних навантажень у загальному складі споживачів електроенергії, тенденції до його суттєвого зростання та розширення номенклатури, широке

впровадження обладнання, чутливого до спотворення форми кривих струмів та напруг, визначили зростаючу увагу дослідників до проблеми вищих гармонік [8, 9, 10].

Проблема вищих гармонік торкнулася «великої» енергетики, промисловості, транспорту, комунально-побутових об'єктів, житлових будинків та комерційного сектору.

Крім нелінійних пристроїв великої потужності (електротехнологічні установки, керовані та некеровані випрямлячі, статичні перетворювальні пристрої різного технологічного та функціонального призначення та ін.), широко поширені нелінійні електроприймачі порівняно малої потужності низьковольтних розподільчих мереж загального призначення та цехових електричних мереж промислових підприємств.

До таких електроприймачів належать: напівпровідникові перетворювальні пристрої, лампи денного освітлення, нагрівальні пристрої, побутові електронні пристрої, імпульсні джерела електронної техніки.

Зростання частки перетворювальних навантажень в електричних мережах викликало появу робіт, спрямованих на дослідження гармонійного змісту кривої споживаного струму та напруги мережі, що містить

Як показав аналіз [11], найбільше спотворення в споживаний струм вносять споживачі комерційного сектора (офіси), а також лікарні, школи, тобто ті споживачі, які містять велику кількість електронної техніки з випрямляючими блоками живлення.

Було встановлено, що спотворення форми кривої напруги живлення є наслідком несинусоїдності споживаного струму в результаті падіння напруги несинусоїдальної форми. У цьому випадку змінний струм (напруга) крім основної гармоніки містить і вищі гармоніки, які в даній ситуації є перешкодою, що циркулює в електричній мережі .

В даний час перетворювальна техніка є головним джерелом гармонійних складових у сучасних системах електропостачання. Широке впровадження силових напівпровідникових перетворювачів у різні галузі техніки породило

проблему їхнього негативного впливу на якість електричної енергії живильної мережі. Причиною цього став нелінійний та імпульсний характер процесів перетворення електроенергії за допомогою ключових елементів, що дискретно управляють потоками електричної енергії. В результаті роботи ключових елементів відбувається спотворення струмів у ланцюгах змінного струму та крім активної потужності, що споживається з мережі (або переданої в мережу) з'являється реактивна потужність, обумовлена фазовим зсувом основних гармонік струму та напруги, і потужність спотворення.

Потужність спотворення по суті характеризується вмістом у повному струмі вищих гармонік (при синусоїдальній напрузі). З іншого боку, вищі гармоніки струму спотворюють напругу мережі залежно від співвідношення потужностей джерела змінного струму (мережі) і перетворювача. Можливі такі характерні випадки приєднання перетворювальної установки до енергосистеми:

1. Установка підключена безпосередньо до енергосистеми нескінченної потужності, падіння напруги визначається тільки реактивністю трансформаторів перетворювачів.

2. Установка приєднана до енергосистеми, потужність якої близька до потужності установки.

3. Установка приєднана до енергосистеми порівнянної потужності (що перевищує потужність установки в кілька разів) Спотворення форми кривої первинної напруги буде спостерігатися в різних точках системи.

У зв'язку з тим, що дедалі більше електричних приводів стають регульованими, проблема вищих гармонік торкнулася і промисловості.

Застосування напівпровідникових схем для плавного пуску асинхронних двигунів призводить до значних спотворень струму на інтервалі пуску, а застосування регульованих приводів спотворює форму струму в режимі, причому рівень окремих гармонік (7-й, 11-й, 13-й) досягає рівня 9-13 % струму першої гармоніки [12, 13].

У [12] при дослідженні силових ланцюгів частотно-регульованих асинхронних електроприводів зазначено, що потужні нелінійні навантаження

генерують в мережу гармоніки струму, в основному 5-у і 7-у (до 70-80% від основної кожна), спотворюючи синусоїду споживаного струму.

Як показано в [14, 15, 16, 17], проблема електромагнітної сумісності нелінійних споживачів особливо гостро проявляється та має свої особливості у мережах низької напруги. Зростання частки суттєво нелінійних (спотворюючих) споживачів у загальному енергоспоживанні є головною причиною зниження якості електроенергії у розподільчих мережах низької напруги. При синусоїдальній вхідній напрузі вхідний струм нелінійних споживачів несинусоїдальний. Їх енергоспоживання характеризується величиною як активної потужності, але й потужністю спотворення. Реактивна потужність, якщо і є, то незначна в порівнянні з іншими складовими потужності.

Незважаючи на невелику потужність кожного з цих споживачів електроенергії (засоби комп'ютерної техніки, телекомунікаційна апаратура, аудіо-відео-техніка, сучасні побутові електроприлади і т.д.), їхнє масове застосування є причиною того, що спотворення форми кривої напруги в мережах низької напруги можуть бути суттєвими.

Від низьковольтних мереж, поряд з ЕП, що генерують перешкоди, живляться і системи управління ЕП, а також інші відповідальні електроспоживачі, що відрізняються підвищеною чутливістю до дії вищих гармонік, збої в роботі яких можуть призвести до зупинення всього підприємства і як наслідок - до шкоди.

У роботі [17] сформульовані основні положення формування спотворення синусоїдності кривих напруг у навантажувальних вузлах мережі низької напруги. Також отримав розвиток метод аналізу не синусоїдальності струмів і напруг мереж низької напруги з використанням традиційних моделей з джерелами струмів вищих гармонік.

Розроблені моделі дозволяють оцінити ефективність використання різних способів забезпечення ЕМС та провести аналіз енергетичних показників низьковольтних мереж за умов їх насиченості нелінійними електроприймачами для вдосконалення системи обліку електроенергії.

У [14, 16] проведено аналіз величини спотворень синусоїдальних кривих струмів та напруг в електричних мережах житлових та громадських будівель.

Встановлено, що спотворення кривих фазних напруг переважно визначаються напругою гармонік, кратним трьом. Відзначено, що існує потреба в аналізі електромагнітних процесів у мережах низької напруги з нелінійними навантаженнями для визначення вимог до електроприймачів, параметрів елементів мережі, а також засобів зниження рівня вищих гармонік з метою забезпечення електромагнітної сумісності споживачів низьковольтних мереж.

Питання генерації вищих гармонік струму та напруги газорозрядними лампами при регулюванні напруги розглянуті в роботі [19]. Газорозрядні лампи є нелінійними споживачами, робота яких призводить до появи в мережі найвищих гармонік струму та напруги.

У роботі [9] зазначено, що імпульсні джерела електроживлення електронної техніки, які відносяться до низьковольтних нелінійних споживачів, поширені в мережах низької напруги. В якості вхідної ланки таких джерел живлення використовується, як правило, мережевий випрямляч, параметри якого поряд з параметрами ємнісного фільтра низькочастотного визначають характер і форму споживаного струму. Слід зазначити, що при підключенні до мережі обмеженої потужності випрямляч викликає появу вищих гармонік напруги.

В результаті проведених розрахунків показано, що потужність спотворення є ваговою складовою повної потужності як випрямляча, так і сумарного навантаження. Тому підхід, при якому на етапі проектування мережі низької напруги з випрямлянням напруги потужність спотворення не враховується, може привести при експлуатації до перевантаження елементів мережі.

Дуже часто нелінійні електроприймачі є одночасно винуватцями та жертвами спотворень споживаного струму, виступаючи в цьому випадку і як «жертва» і як «порушник», замикаючи порочне коло негативного взаємовпливу гармонік струму та напруги в мережах з нелінійними навантаженнями.

1.2. Регулювання якості електроенергії мережі живлення

1.2.1. Використання складових повної потужності в САУ напівпровідниковими компенсаторами

Перші роботи, присвячені складникам повної потужності, було опубліковано на початку минулого століття С.І. Budeanu та S. Fryze [19] і знайшли розвиток у роботах О.А. Маєвського [20] про складові повної потужності у трипровідній системі з трифазним джерелом симетричних синусоїдальних напруг. Запропонована в роботах О.А. Маєвського теорія застосовна для оцінки електромагнітної сумісності перетворювальних систем, що живляться від трифазної трипровідної мережі з трифазним джерелом симетричної синусоїдальної напруги:

$$\begin{aligned} u_a &= U_m \sin \vartheta, \\ u_b &= U_m \sin \left(\vartheta - \frac{2\pi}{3} \right), \\ u_c &= U_m \sin \left(\vartheta - \frac{4\pi}{3} \right). \end{aligned} \quad (1.6)$$

$$u_a + u_b + u_c = 0, \quad (1.7)$$

де U_m – амплітуда фазної напруги,

$$\vartheta = 2\pi f_s t, \quad (1.8)$$

ϑ – кутова координата, f_s – частота мережі, t – час.

Навантаження в такій системі в загальному випадку нелінійне і може бути представлене трьома джерелами струму, що містять основну гармоніку, частота якої дорівнює частоті мережі, вищі гармоніки та субгармоніки. Основні гармоніки струму можуть мати пофазну асиметрію. Період повторюваності процесів у системі містить цілу кількість періодів напруги мережі живлення. Середня активна P_Σ та реактивна Q_Σ потужності системи, обчислених у періоді повторюваності, незмінні чи змінюються з постійною часу, яка значно перевищує період повторюваності. Оскільки напруга в мережі синусоїдальна, середня

активна та реактивна потужності визначаються лише величинами основних гармонік струму

$$P_{\Sigma} = \frac{1}{2} U_m \sum_{a,b,c} I_{1m\ a,b,c} \cos \varphi_1, \quad (1.9)$$

$$Q_{\Sigma} = \frac{1}{2} U_m \sum_{a,b,c} I_{1m\ a,b,c} \sin \varphi_1, \quad (1.10)$$

де $I_{1m\ a,b,c}$ – амплітуди основних гармонік струму системи у фазах a,b,c відповідно; φ_1 – кут зсуву основної гармоніки фазного струму щодо фазної напруги.

Оскільки нульовий провід у системі відсутній, в будь-який момент часу $i_a + i_b + i_c = 0$.

Теорія потужності, в основі якої лежить припущення про ідеальність трифазної системи напруг мережі живлення, може використовуватися при аналізі електромагнітних процесів і розрахунку характеристик перетворювальних систем з перетворювачами різних типів, що живляться від промислових мереж загального призначення з номінальною напругою 6kV, 10kV або вище, відповідних вимогам стандартів.

Теорія О.А. Маєвського оперує з чотирма складовими повної потужності [20]

$$S_{\Sigma} = \sqrt{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2 + T_{\Sigma}^2 + H_{\Sigma}^2}, \quad (1.11)$$

де S_{Σ} , P_{Σ} , Q_{Σ} , T_{Σ} , H_{Σ} – відповідно середні у періоді повторюваності сумарні для трьох фаз значення повної, активної, реактивної потужностей (потужності зсуву), потужності спотворення та потужності несиметрії.

Сумарна повна потужність, що розраховується через діючі значення фазних струмів

$$S_{\Sigma} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} U_m \sqrt{\sum_{a,b,c} I_{\partial\ a,b,c}^2}, \quad (1.12)$$

де $I_{\partial\ a,b,c}$ – значення фазних струмів, що діють, з урахуванням всіх гармонік.

Середня активна потужність визначається за (1.9) або прямим інтегруванням миттєвої потужності

$$P_{\Sigma} = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt, \quad (1.13)$$

де p – миттєва активна потужність; T – період повторюваності, що містить цілу кількість періодів напруги мережі живлення T_s ;

$$p = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (1.14)$$

Середня реактивна потужність визначення (1.10) або інтегруванням

$$Q_{\Sigma} = \frac{1}{T} \int_0^T q \, dt, \quad (1.15)$$

де

$$q = -\frac{du_a}{dt} i_a - \frac{du_b}{dt} i_b - \frac{du_c}{dt} i_c. \quad (1.16)$$

У загальному випадку

$$p \neq P_{\Sigma}, \text{ и } q \neq Q_{\Sigma}. \quad (1.17)$$

Потужність несиметрії, обумовлена несиметрією основних гармонік мережевого струму, визначається із співвідношення

$$H_{\Sigma} = \sqrt{S_{осн \Sigma}^2 - P_{\Sigma}^2 - Q_{\Sigma}^2}, \quad (1.18)$$

де

$$S_{осн \Sigma} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} U_m \sqrt{\sum_{a,b,c} I_{1 a,b,c}^2}, \quad (1.19)$$

$S_{осн \Sigma}$ – повна потужність основної гармоніки; $I_{1 a,b,c}$ – діючі значення основних гармонік фазних струмів.

Неважко переконатися, що при $I_{1 a} = I_{1 b} = I_{1 c}$ потужність несиметрії дорівнює нулю (див. (1.18), (1.19), (1.9), (1.10)).

Потужність спотворення визначається із співвідношення

$$T_{\Sigma} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} U_m \sqrt{\sum_{a,b,c} \sum_{k=2}^{\infty} I_{k a,b,c}^2}, \quad (1.20)$$

де I_k – діючі значення гармонік струму k -того порядку щодо частоти мережі.

Знаючи складові повної потужності, можемо визначити енергетичні коефіцієнти.

Коефіцієнт зсуву

$$K_c = P_\Sigma / \sqrt{P_\Sigma^2 + Q_\Sigma^2}. \quad (1.21)$$

Коефіцієнт спотворення

$$K_H = \sqrt{P_\Sigma^2 + Q_\Sigma^2} / \sqrt{P_\Sigma^2 + Q_\Sigma^2 + T_\Sigma^2}. \quad (1.22)$$

Коефіцієнт несиметрії

$$K_H = \sqrt{P_\Sigma^2 + Q_\Sigma^2 + T_\Sigma^2} / S_\Sigma. \quad (1.23)$$

Коефіцієнт потужності

$$K_M = P_\Sigma / S_\Sigma. \quad (1.24)$$

Енергетичні коефіцієнти пов'язані між собою співвідношенням

$$K_M = K_c \cdot K_H \cdot K_H. \quad (1.25)$$

Часто зустрічається в публікаціях, наприклад, [12], коефіцієнт несинусоїдності, в англomовній літературі позначається *THD* [21], однозначно визначається через коефіцієнт спотворення

$$K_H = THD = \sqrt{\frac{1}{K_H^2} - 1}. \quad (1.26)$$

Отже, теорія потужності О.А. Маєвського дозволяє розраховувати складові повної потужності та енергетичні коефіцієнти у системах з вентильними перетворювачами різних типів, що живляться від ідеальної трифазної трипровідної мережі змінної напруги. Співвідношення, отримані в рамках цієї теорії, можуть бути основою для вимірювання складових потужності та енергетичних коефіцієнтів у промислових установках.

Недоліками теорії потужності А. Маєвського є:

– відсутність співвідношень, що дозволяють побудувати систему придушення вищих гармонік струму та компенсації реактивної потужності за допомогою силового активного фільтра;

- неврахування спотворень напруги мережі живлення;
- непридатність теорії для чотирипровідних трифазних систем із струмами нульової послідовності.

1.2.2 Визначення миттєвих активної та реактивної потужностей у сучасних теоріях потужності

При визначенні миттєвих активної та реактивної потужностей у сучасних теоріях потужності [22, 23] виконуються такі умови:

- розглядаються лише трифазні чотирипровідні [24] або m -фазні $m+1$ -провідні [25] системи електропостачання; при цьому однофазна система є граничним випадком розсиметрованої багатофазної системи з нескінченно великими опорами навантаження у всіх фазах, крім однієї;
- миттєва активна та реактивна потужності визначаються через результуючі вектори напруги $\vec{u}_s$ та струму $\vec{i}_s$ у площині або у тривимірному просторі;
- координати просторового результуючого вектора напруги $\vec{u}_s$ однозначно визначаються миттєвими фазними значеннями напруги системи, а координати просторового вектора струму $\vec{i}_s$ – миттєвими значеннями фазних струмів навантаження.

Миттєва активна потужність з урахуванням зазначених умов дорівнює скалярному добутку просторових векторів напруги та струму. Для трифазної системи

$$p = \vec{u}_s \vec{i}_s = |\vec{u}_s| |\vec{i}_s| \cos \varphi_{ui} = u_{sa} i_{sa} + u_{sb} i_{sb} + u_{sc} i_{sc}, \quad (1.27)$$

де $|\vec{u}_s|, |\vec{i}_s|$ – модулі миттєвих значень модулів просторових векторів напруги та струму;

φ_{ui} – миттєве значення кута зсуву між просторовими векторами напруги та струму;

$u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}, i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ – відповідно миттєве значення напруги мережі фаз a, b, c і струмів навантажень фаз a, b, c .

Миттєва реактивна потужність визначається як модуль векторного добутку просторових векторів напруги та струму

$$q = | \vec{u}_s \times \vec{i}_s | = |\vec{u}_s| |\vec{i}_s| \sin \varphi_{ui} = \sqrt{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2}, \quad (1.28)$$

де:

$$k_1 = u_{sb} i_{sc} - u_{sc} i_{sb},$$

$$k_2 = u_{sc} i_{sa} - u_{sa} i_{sc},$$

$$k_3 = u_{sa} i_{sb} - u_{sb} i_{sa}.$$

p - q теорія потужності.

Ця теорія запропонована в роботах [22, 23] Н. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae стосовно трифазних трипровідних мереж без нульового дроту і розвинена в [26]. Виклад p - q теорії можна знайти також у [27]. У p - q теорії миттєві активна та реактивна потужності визначаються як і в теорії Маєвського при синусоїдальній симетричній системі напруг мережі із співвідношення (1.13), (1.15), причому будь-який фізичний зміст реактивної потужності не приписується – це просто розрахункова величина.

На відміну від теорії Маєвського, що визначає миттєві потужності в координатах abc , в p - q теорії використовується запис співвідношень в $\alpha\beta$ – координатах, що виходять в результаті перетворень Кларка.

Миттєва напруга мережі в координатах $\alpha\beta$ визначається як

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}. \quad (1.29)$$

Миттєві струми навантаження в координатах $\alpha\beta$

$$\begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix}. \quad (1.30)$$

Миттєва активна та реактивна потужності навантаження визначаються як [24]:

$$\begin{bmatrix} P_l \\ Q_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \end{bmatrix}. \quad (1.31)$$

Зазначимо особливість запису рівнянь (1.29), (1.30), (1.31) під час розгляду теорій потужності. У перетвореннях Кларка у правій частині рівнянь (1.29), (1.30) має стояти коефіцієнт $2/3$, що забезпечує рівності $u_\alpha = u_a$, $i_{la} = i_{la}$, а в правій частині співвідношення (1.31) має бути коефіцієнт $3/2$. У цитованих джерелах у співвідношеннях (1.29), (1.30) прийняті коефіцієнти $\sqrt{2/3}$, що дає одиничний коефіцієнт у рівняннях для складових потужності (1.31).

Миттєві активну та реактивну потужності можна розкласти на дві складові: постійну (середню) та змінну:

$$p_l = P_l + \tilde{p}_l, \quad (1.32)$$

$$q_l = Q_l + \tilde{q}_l. \quad (1.33)$$

У трифазній симетричній системі напруг в режимі, що встановився, постійні складові активної P_l і реактивної Q_l потужності визначаються основною гармонікою мережевого струму прямої послідовності, а змінні складові $\tilde{p}_l$ і $\tilde{q}_l$, визначаються гармоніками струму навантаження, відмінними від основної, і струмами основної гармоніки зворотної послідовності. У загальному випадку корисною складовою є лише постійна активна потужність P_l . Якщо на перетворювальну систему (ПС) покладається функція компенсації $\tilde{p}_l$ і $\tilde{q}_l$, то завдання струмів на вході ПС в координатах $\alpha\beta$ можна отримати, проінвертувавши матричне рівняння (1.31):

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{(u_\alpha^2 + u_\beta^2)} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p}_l \\ \tilde{q}_l \end{bmatrix}. \quad (1.34)$$

Якщо ПС має компенсувати лише змінні складові активної та реактивної потужності, то рівняння (1.34) дещо видозмінюється

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{(u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2)} \begin{bmatrix} u_{\alpha} & u_{\beta} \\ u_{\beta} & -u_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p}_l \\ \tilde{q}_l \end{bmatrix}. \quad (1.35)$$

Для роботи ПС необхідно мати завдання миттєвих значень фазних струмів у координатах abc . Ці величини отримаємо, проінвертувавши рівняння (1.31).

В [27] запропонований метод $i_d - i_q$, що представляє кориговану $p-q$ теорію для випадку, коли напруги мережі живлення спотворені.

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix}. \quad (1.36)$$

$p-q$ теорія потужності та метод $i_d - i_q$ дозволяють ефективно компенсувати вищі гармоніки та основну гармоніку зворотної послідовності струму нелінійного навантаження за допомогою ПС. Якщо напруга мережі симетрична і синусоїдальна, ефективність роботи ПС на основі $p-q$ теорії та $i_d - i_q$ методу однакова. При спотвореннях напруги мережі живлення кращі результати дає $i_d - i_q$ метод [27].

Недоліком $p-q$ теорії та $i_d - i_q$ методу є неможливість їх застосування при аналізі чотирипровідних мереж з нульовим проводом і, у ряді випадків, великі значення коефіцієнтів несинусоїдності струмів після їх корекції САФ при несинусоїдальній напрузі мережі живлення.

$p-q-r$ теорія потужності.

Ця теорія запропонована у роботі [28]. Автори теорії вважають за краще використовувати терміни «реальна» (real) і «уявна» (imaginary) потужності відповідно замість термінів «активна» (active) і «реактивна» (reactive) потужності, з метою підкреслити відмінність цих понять від загальноприйнятих понять активної та реактивної потужності у частотній області. Однак оскільки в $p-q-r$ теорії використовуються ті ж позначення, що в $p-q$ і крос-векторній теоріях і оскільки сенс, що вкладається в поняття активна і реальна потужності один і той

же доцільно, все ж таки, використовувати терміни «активна» та «реактивна» потужності.

В p - q - r теорії використовуються три системи прямокутних координат abc , $\alpha\beta_0$, і pqr , причому перші дві системи нерухомі по відношенню один до одного, а третя система pqr обертається навколо осі O разом з площиною, перпендикулярній площині $\alpha\beta$. Взаємне розташування зазначених систем координат ілюструє рис. 1.1.

Початки всіх трьох систем координат збігаються і лежать у вершині 5 куба 1-2-3-4-5-6-7-8 (рис.1.1).

Вісь a прямокутної системи координат abc спрямована на грані 5-8 куба, вісь b – на грані 5-6 куба, вісь c – на грані 5-1 куба.

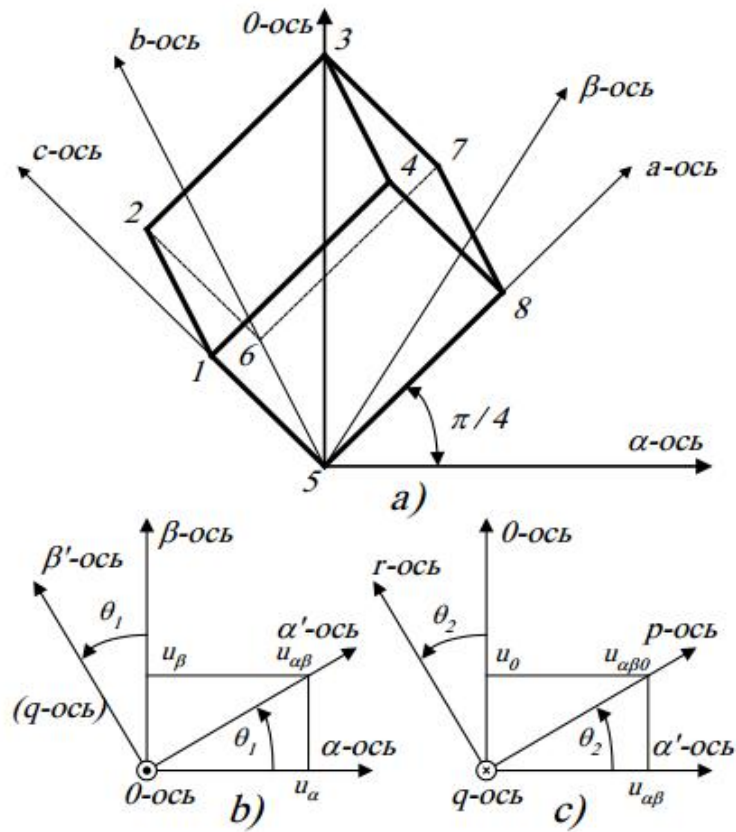
$$\theta_1 = \arctg \frac{u_\beta}{u_\alpha}. \quad (1.37)$$

Куб зорієнтовано над площиною $\alpha\beta$ таким чином, що вісь O , що проходить через вершини 5-3, знаходиться в площині, перпендикулярній площині $\alpha\beta$ і утворює зі слідом цієї площини кут $\pi/2$. При цьому кути між осями abc і площиною $\alpha\beta$ складають $\pi/4$ (рис. 1.1). Система координат $\alpha\beta_0$ представлена на рис. 1.1. Площина $\alpha\beta$ лежить у площині рисунка, а вісь O перпендикулярна площині рисунка. У площині $\alpha\beta$ лежить вісь q , кут повороту якої щодо осі β .

Дві інші осі p , r системи координат pqr лежать у площині, що проходить через осі α' і O (рис. 1.1).

Система координат pqr представлена рис. 1.1 [29]. У площині рисунка лежать осі p, r , вісь q перпендикулярна площині малюнка. Положення осі p визначається вектором $u_{\alpha\beta}$ у площині $\alpha\beta$ і вектором напруги нульової послідовності, що відкладається по осі O . Відповідно до цього кут повороту осі p щодо площини $\alpha\beta$ визначається як (рис. 1.1)

$$\theta_2 = \arctg \frac{u_0}{u_{\alpha\beta}}. \quad (1.38)$$

Рис. 1.1 Система координат p - q - r

Перетворення напруги мережі в точці підключення навантаження з abc координат у координати pqr здійснюється за допомогою наступних співвідношень [28]:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}. \quad (1.39)$$

Напруги мережі в координатах pqr [28]:

$$\begin{bmatrix} u_p \\ u_q \\ u_r \end{bmatrix} = \frac{1}{u_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} u_0 & u_\alpha & u_\beta \\ 0 & -\frac{u_{\alpha\beta 0} u_\beta}{u_{\alpha\beta}} & \frac{u_{\alpha\beta 0} u_\alpha}{u_{\alpha\beta}} \\ u_{\alpha\beta} & -\frac{u_0 u_\alpha}{u_{\alpha\beta}} & -\frac{u_0 u_\beta}{u_{\alpha\beta}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{\alpha\beta 0} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1.40)$$

де

$$u_{\alpha\beta 0} = \sqrt{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2 + u_0^2}, \quad (1.41)$$

$$u_{\alpha\beta} = \sqrt{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2}. \quad (1.42)$$

Як видно з (1.40), p - q - r теорії вектор напруг збігається з p -віссю, тобто

$$u_q = u_r = 0. \quad (1.43)$$

Напруга u_p дорівнює сумі постійної складової $u_{p\,dc}$, відповідної основної гармоніки напруги мережі прямої послідовності, та змінної складової $u_{p\,ac}$, відповідної основній гармоніці напруги мережі зворотної послідовності та вищими гармоніками напруги мережі.

Струми системи в координатах pqr визначені в [28]:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{u_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} u_0 & u_{\alpha} & u_{\beta} \\ 0 & -\frac{u_{\alpha\beta 0} u_{\beta}}{u_{\alpha\beta}} & \frac{u_{\alpha\beta 0} u_{\alpha}}{u_{\alpha\beta}} \\ u_{\alpha\beta} & -\frac{u_0 u_{\alpha}}{u_{\alpha\beta}} & -\frac{u_0 u_{\beta}}{u_{\alpha\beta}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix}. \quad (1.44)$$

Миттєва активна потужність p визначається як скалярний добуток векторів напруги та струму [24]:

$$p = \vec{u}_{pqr} \cdot \vec{i}_{pqr} = u_p i_p. \quad (1.45)$$

Миттєва реактивна потужність q визначається як векторний добуток векторів напруги та струму [24]:

$$q = \vec{u}_{pqr} \times \vec{i}_{pqr} = \begin{bmatrix} 0 & -u_p i_r & u_p i_q \end{bmatrix}^t. \quad (1.46)$$

Важливо відмітити, що r -складова струму i_r визначає миттєву реактивну потужність по осі q - q_q , а q -складова струму i_q визначає миттєву реактивну потужність по осі r - q_r .

Миттєві активну та реактивну потужності зручно уявити як

$$\begin{bmatrix} p & q_q & q_r \end{bmatrix}^t = \begin{bmatrix} u_p i_p & -u_p i_r & u_p i_q \end{bmatrix}^t. \quad (1.47)$$

Три миттєві потужності (1.47) лінійно незалежні один від одного. Тому відповідні складові струму можуть бути компенсовані трьома незалежними регуляторами.

1.3 Керування багатофункціональними пристроями компенсації неактивних складових повної потужності

1.3.1. Особливості побудови багатофункціональних пристроїв компенсації неактивних складових повної потужності

Вирішенню завдань покращення якості електроенергії мережі живлення, за допомогою пристроїв компенсації неактивних складових повної потужності, присвячені роботи відомих вчених Шидловського А.К., Стогнія Б.С., Кириленко А.В., Резцова В.Ф., Жежеленко І.В., Півняка Г.Г., Сокола Є.І., Кудрі С.О., Буткевича А.Ф., Липковського К.А., Юрченка М.М., Жуйкова В.Я., Стахіва П.Г., Денісова О.І., Жемерова Г.Г., Ковальова Ф.І., Харитонова С.А., Розанова Ю.К., Федія В.С., Чиженко І.М., Щерби А.А., Жаркіна А.Ф., Михальського В.М., Волкова І.В., Щербака Я.В., в яких сформульовані основні принципи та підходи до вирішення проблеми якості електроенергії мережі живлення. Разом з цим, зазвичай, проблема якості вирішувалася для конкретного джерела спотворень із застосуванням спеціалізованих пристроїв.

Перспективним напрямом є створення багатофункціональних пристроїв, що виконують функції компенсатора несиметрії мережі живлення, стабілізатора, активного фільтра та компенсатора реактивної потужності.

У роботі [29] реалізовано структуру компенсатора неактивних складових повної потужності (інша назва – фільтрокомпенсуючий пристрій (ФКП)), призначеного для виконання одночасно декількох функцій: придушення (фільтрації) вищих гармонік струму, що споживається навантаженням з мережі живлення; компенсації реактивної складової основної гармоніки мережевого

струму; симетрування струмів у фазах трифазного ланцюга; пригнічення струмів нульової послідовності.

Реалізувати в одному пристрої кілька функцій дозволяє структура керованого компенсованого випрямляча (ККВ) [30]. У силовій частині ККВ (рис. 1.2) включені два шестипульсні мости, один з яких виконаний на тиристорах, що замикаються, і працює з випереджаючими (негативними) кутами управління G , а інший виконаний на одноопераційних тиристорах, що працюють з відстаючими (позитивними) кутами управління T . Ключі обох мостів перемикаються з частотою мережі живлення.

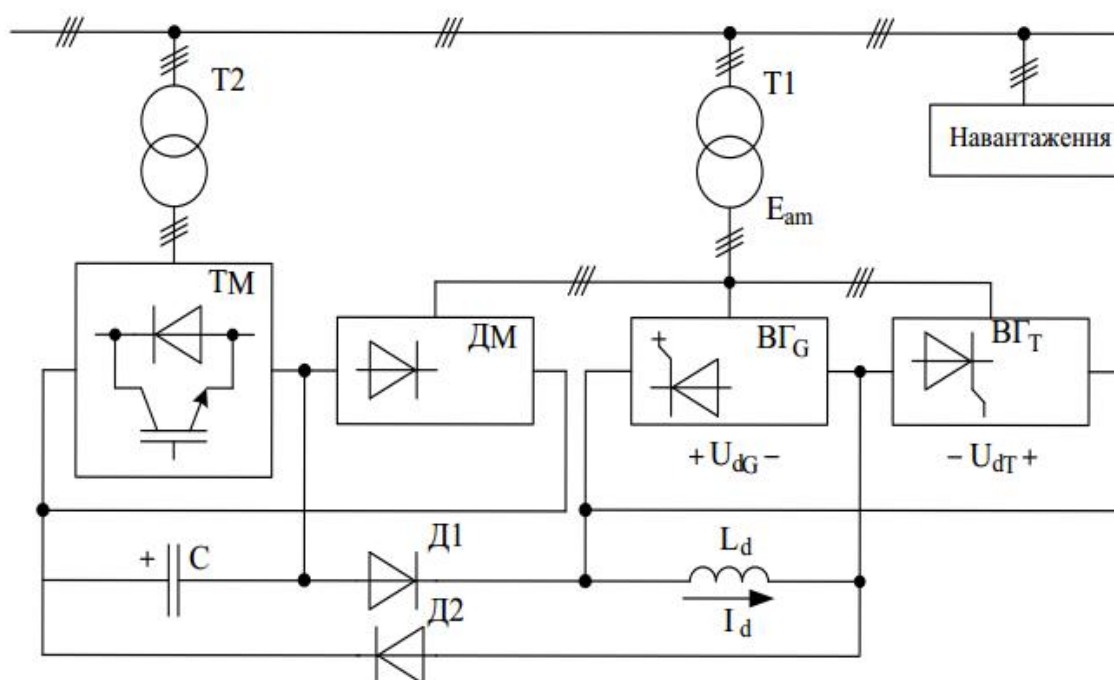


Рис. 1.2 Структура компенсованого керованого випрямляча

Навантаженням шестипульсних мостів $BГГ$ і $BГТ$ є реактор L_d , величина струму в якому пропорційна величині реактивної потужності, що генерується або ККВ. Залежно від знака реактивної потужності на вході ККВ, протікання струму через реактор забезпечує або міст на тиристорах, що замикаються, або міст на одноопераційних тиристорах. Комутація тиристорів, що працюють з випереджаючими кутами управління, вимагає виведення енергії, що накопичується в індуктивностях розсіювання силового живлячого трансформатора ККВ і кабелів змінного струму до моментів вимикання ГТО

тиристорів в накопичувач. Це завдання вирішується включенням до силової схеми шестипульсної діодної групи та двох допоміжних діодів. Як накопичувач використовується конденсатор інвертора напруги C . Інвертор напруги виконує дві функції. Як обов'язкова складова частина компенсованого керованого випрямляча інвертор напруги виконує виведення комутаційної енергії в мережу живлення. Як автономний пристрій інвертор напруги виконує функції фільтра вищих гармонік мережі живлення, пристрою симетрування струмів у фазах трифазного ланцюга; пристрою придушення струмів нульової послідовності.

Компенсовані керовані випрямлячі досить докладно проаналізовані у низці робіт, зокрема у [30, 31].

Таким чином, силову схему ККВ можна представити як двоканальну структуру, що складається з низькочастотного і високочастотного каналів. Низькочастотний представлений одно- або двомостовим випрямлячем і призначений для компенсації середньої реактивної потужності мережі живлення. Оскільки міст на тиристорах, що замикаються, $ВГ_G$ може працювати як з випереджаючими (негативними), так і з відстаючими (позитивними) кутами управління, у зазначених роботах міст на одноопераційних тиристорах виключений зі схеми, а його функції покладені на міст на GTO тиристорах. Ціною такого спрощення є деяке зниження к.к.д. компенсатора у режимі споживання реактивної потужності з мережі. Реактивна потужність на вході ККВ теоретично дорівнює реактивній потужності мережі в точці підключення ККВ і має зворотний знак.

Високочастотний канал призначений для компенсації неактивних складових миттєвої потужності мережі живлення (придушення вищих гармонік мережі живлення, симетрування струмів у фазах трифазного ланцюга; придушення струмів нульової послідовності). Описана структура силової схеми ККВ забезпечує підтримку на заданому рівні регульованих параметрів у точці підключення фільтрокомпенсуючого пристрою до мережі живлення і таким чином вирішує проблему електромагнітної сумісності одного або групи споживачів з мережею живлення. Активні втрати в силовій схемі

фільтрокомпенсуючого пристрою мінімізуються завдяки, з одного боку, відсутності широтної імпульсної модуляції при керуванні тиристорними мостами низькочастотного каналу ККВ і, з іншого боку, роботі інвертора напруги високочастотного каналу на струмах, значно менших номінальних струмів.

Високочастотний канал (інвертор напруги з частотами комутації вище 10 кГц) та низькочастотний канал (випрямляч із частотою комутації 50 Гц) мають один загальний елемент – ємнісний накопичувач.

При вимиканні ключів тиристорного мосту на GTO тиристорах виникають комутаційні перенапруги, пов'язані з накопиченням енергії в індуктивності розсіювання силового трансформатора, дослідження яких проводилося в роботі [31]. У представленому ФКП для обмеження комутаційного перенапруги використовується виведення енергії, що накопичується в індуктивностях розсіювання через діодний міст ДМ і допоміжні діоди Д1, Д2 в конденсатор С. Встановлено, що ефективність роботи високочастотного каналу значною мірою залежить від параметрів ємнісного накопичувача, величина напруги на якому в свою чергу впливає на рівень комутаційних перенапруг і величину активної потужності, що рекуперується в мережу живлення.

В [32] представлена система управління силовою схемою ланцюгів розподіленої електростанції на основі активного керованого випрямляча (АКВ). Робота АКВ у номінальному режимі виконує ту ж функцію, що й ККВ – генерує електроенергію в мережу, при цьому активний випрямляч регулює реактивну потужність на виході електростанції та коригує форму фазних струмів. Для придушення високочастотних пульсацій мережевого струму на виході АКВ встановлюється фільтр.

Переваги перетворювальних систем на основі АКВ порівняно з перетворювальними системами на основі ККВ полягає, перш за все, у простішій системі керування та меншій за кількістю елементів силової частини, а також у можливості подібних систем забезпечувати гарантоване електропостачання більшого за потужністю навантаження. Недоліком перетворювальних систем на основі АКВ є те, що напруга на конденсаторі С, за величиною, що дорівнює

напругі альтернативного джерела в номінальному режимі роботи перетворювача, повинна бути на 25-50% вище амплітуди лінійної напруги вентильних обмоток перетворювального трансформатора, що обмежує діапазон робочих напруг електростанції [32]. У роботі представлено порівняльну оцінку ефективності роботи систем управління, заснованих на різних теоріях потужності шляхом зіставлення результатів комп'ютерного регулювання.

1.3.2. Використання прогностичних обчислень у системах керування

При проектуванні багатофункціональних пристроїв компенсації неактивних складових повної потужності виникає необхідність розробки систем керування та регулювання, застосування яких забезпечувало б виконання вимог до якості електричної енергії мережі, швидкодії з керування, якості стабілізації обраних параметрів при різноманітних збуреннях. Важливим фактором, що визначає ефективність використання мікропроцесорних систем керування напівпровідниковими перетворювачами, є закони керування, що реалізуються цими системами. В даний час більшість алгоритмів, що використовуються при прямому цифровому керування, становлять подібність до відомих алгоритмів аналогового регулювання, тобто. є дискретними наближеннями [33]. Однак, використання алгоритмів, заснованих на методиці підлеглого регулювання зі звичними П-, ПІ- та ПІД-регуляторами, не є найкращим шляхом для досягнення найбільшої ефективності. При оцінці ефективності алгоритмів, що розробляються, необхідно виходити з гранично досяжних техніко-експлуатаційних показників напівпровідникових перетворювачів як нелінійних дискретних ланок.

Найбільш перспективним напрямом, що відповідає природі мікропроцесорного керування, є прогнозне керування. У системі, що працює за таким принципом, відсутні регулятори, які мають звичну структуру. Основну роль грає математична модель об'єкта, призначена для прогнозування зміни координат стану напівпровідникового перетворювача на інтервалі дискретності,

причому може бути застосована прогноуюча модель, що працює як у реальному масштабі часу, так і у прискореному.

У системі з прогнозуванням у реальному масштабі часу математична модель перетворювача здійснює «розгортку» змін координат стану напівпровідникового перетворювача, які повинні мати місце на черговому інтервалі провідності за умови, що до кінця n -го інтервалу всі координати будуть мати задане значення. Такий прогноз здійснюється на кожному інтервалі провідності на основі інформації про задані значення координат стану перетворювача і поточних значеннях фази і амплітуди мережевої напруги, що живить перетворювач. Під час "розгортки" прогнозовані значення координат безперервно порівнюються з поточними значеннями, і при збігу з деякими наближеннями порівнюваних значень виробляється керуючий вплив, що призводить до зміни стану відповідного напівпровідникового ключа. Для випадку, коли модель адекватна об'єкту, зміни координат на черговому інтервалі будуть відповідати прогнозованим, оскільки вони починалися за тих самих початкових умов.

В [29] описана структура аналого-цифрової системи керування фільтрокомпенсуючим пристроєм для компенсації впливу навантаження на якість електроенергії трифазних мереж електроживлення. Дана система керування перетворювачем (рис. 1.3) побудована на основі прогнозу стану системи на наступному такті в каналі керування випрямлячем і гістерезисного керування каналом управління інвертором напруги, з використанням $p-q$ теорії потужності.

Інвертор напруги I , випрямляч з допоміжними ключами скидання енергії, накопичувач H і реактор L складають силову частину двоканального компенсатора [30, 14].

Сигнал датчика струму мережі ДТ1-3 несе інформацію про величини миттєвих сумарних значень активної та неактивної потужності навантаження та компенсатора (ФКП)

$$\begin{aligned} p_{\Sigma} &= p_L + p_C, \\ q_{\Sigma} &= q_L + q_C, \end{aligned} \quad (1.48)$$

Сигнал з виходу датчика напруги мережі ДН1-3 надходить на перший вхід блоку цифрової обробки БЦО, в якому здійснюється перетворення напруги мережі з координат a, b, c в координати α, β відповідно до рівняння

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}. \quad (1.50)$$

Сигнал з виходу датчика струму мережі ДТ1-3 надходить на відповідний вхід блоку цифрової обробки БЦО, в якому здійснюється перетворення струму мережі з координат a, b, c в координати α, β відповідно до рівняння

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} + i_{Ca} \\ i_{Lb} + i_{Cb} \\ i_{Lc} + i_{Cc} \end{bmatrix}. \quad (1.51)$$

На третій вхід БЦО надходить сигнал, пропорційний величині напруги на накопичувальному конденсаторі C .

Для формування цього сигналу використовується вузол порівняння та регулятор P_c . На входи вузла порівняння надходить сигнал завдання величини напруги на конденсаторі накопичувача U і сигнал з датчика напруги ДН4, пропорційний напрузі на конденсаторі накопичувача. Вихідний сигнал регулятора P_c пропорційний величині активної потужності в період комутації тиристорів ГТО (комутаційної потужності).

У БЦО здійснюється розрахунок миттєвих значень активної та неактивної потужності за співвідношеннями, описаними в [34]

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \quad (1.52)$$

де i_α, i_β визначаються з (1.51), u_α, u_β – по (1.50).

Змінні складові активної $\tilde{p}$ та реактивної $\tilde{q}$ потужності, дозволяють розрахувати струми $i_{F\alpha}$ та $i_{F\beta}$, які повинен генерувати в мережу інвертор напруги

для компенсації неактивних складових миттєвої потужності, зокрема придушення вищих гармонік струму [31, 34]:

$$\begin{bmatrix} i_{Fa} \\ i_{F\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3(u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2)} \begin{bmatrix} u_{\alpha} & u_{\beta} \\ u_{\beta} & -u_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} + P_c \\ \bar{q} \end{bmatrix}. \quad (1.53)$$

По струмах i_{Fa} та $i_{F\beta}$ в координатах α, β можуть бути розраховані сигнали завдання миттєвих значень фазних струмів інвертора напруги

$$\begin{bmatrix} i_{Fa} \\ i_{Fb} \\ i_{Fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Fa} \\ i_{F\beta} \end{bmatrix}. \quad (1.54)$$

Завдання за струмами інвертора з виходу БЦО надходять на вхід компаратора з гістерезисом, де порівнюються з фактичними значеннями фазних струмів інвертора. Залежно від результату порівняння включаються транзистори відповідних плечей інвертора напруги.

Завдання середньої реактивної потужності на навантаженні Q_z надходить на один із входів вузла порівняння, на другий вхід якого надходить сигнал зворотного зв'язку по середній реактивній потужності Q з виходу БЦО. Сигнал різниці через регулятор середньої реактивної потужності P_Q і підлеглий регулятор струму навантаження P_I випрямляча ФКП впливає на вхід системи імпульсно-фазового керування, синхронізованої з напругою мережі живлення.

Наведена в даних роботах система керування орієнтована на роботу компенсатора з одномостовим випрямлячем в низькочастотному каналі і не передбачає врахування переведення струму з вентильної групи на ГТО тиристорах на вентильну групу на одноопераційних тиристорах, у разі перемикання з режиму генерації реактивної потужності в мережу живлення на режим споживання і навпаки.

Актуальним є створення багатоконтурної системи керування та алгоритмів керування компенсатором неактивних складових повної потужності, що створює умови для побудови універсального напівпровідникового компенсатора, який швидко адаптується під вимоги конкретного замовника, за умови його програмно-апаратної реалізації з використанням сучасних засобів цифрової обробки.

1.3.3. Особливості проектування нечітких регуляторів у складі САК напівпровідниковими компенсаторами

Зазвичай при аналізі складних технічних систем доводиться мати справу з неповнотою, невизначеністю, недетермінованістю вихідної інформації про систему, що не дає можливості точно описати систему в рамках класичних математичних формалізмів, а дозволяє тільки будувати міркування своєю природною мовою, що має, як відомо, багатозначні інтерпретації. У цих умовах потрібно розширення всіх основних математичних понять та створення відповідного формального апарату для моделювання людських міркувань природною мовою та людських прийомів вирішення завдань.

Такий новий математичний апарат був створений професором Л. Заде на основі запровадження так званих лінгвістичних змінних, що описують неточне (нечітке) завдання інформації про об'єкт. Значеннями (термами) лінгвістичної змінної є не числа, а слова й пропозиції природної (чи формальної) мови. Наприклад, можна говорити про лінгвістичну зміну – перешкоду (або сигнал) – як про малу, середню, велику або ще інших залежно від необхідного ступеня детальності опису. Введення лінгвістичних змінних вимагає розширення такого базового поняття математики, як поняття безлічі. Була розроблена теорія нечітких множин, важливих з світоглядної точки зору. Їх введення уможливило піддавати кількісному аналізу ті явища, які раніше можна було аналізувати або тільки на якісному рівні, або за допомогою досить грубих моделей.

На сьогоднішній день поширеними завданнями, що вимагають застосування концепцій нечіткої логіки, є завдання керування пристроями силової електроніки.

Як зазначено в [36] тенденція до використання непарної логіки і неймереж для вирішення завдань з великим числом змінних, що важко визначаються, або мають випадковий характер вже в даний час проявляється при управлінні в електроприводі або, наприклад, гнучкими лініями енергопередач і активними фільтрами. При цьому як виконавчі органи застосовуються швидкодіючі перетворювачі змінного / постійного струму з властивостями джерела напруги.

Функціональна схема системи автоматичного керування з урахуванням нечіткої логіки (системи керування з нечітким регулятором) наведено на рис. 1.4.

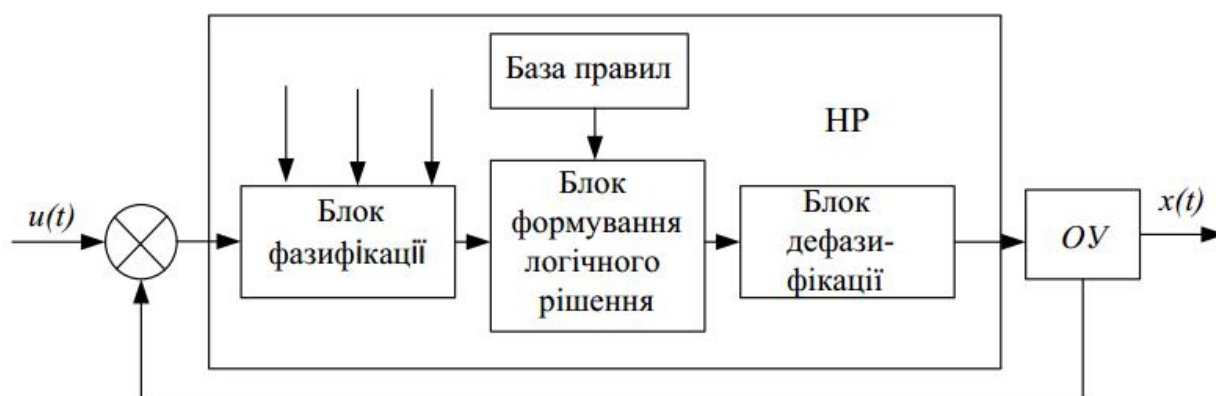


Рис. 1.4. Функціональна схема системи автоматичного керування на базі нечіткої логіки

У блоці фазифікації вхідні лінгвістичні змінні, $x_i, i = \overline{1, n}$, якісно характеризуються терм-множинами (лінгвістичними величинами), що описуються на універсальній множині U функціями приналежності ФП $\mu(u)$.

ФП визначає ступінь приналежності кожного елемента і множині числом між 0 і 1, яке називають ступенем істинності аналізованої лінгвістичної змінної даного терму.

Діапазони зміни вхідних змінних і поточні значення вхідних змінних перераховуються (відображаються) на єдину універсальну множину, $U_i = [0, L_i - 1]$ де L_i – число, відповідне кількості термів кожної лінгвістичної змінної $x_i, i = \overline{1, n}$, або універсальна множина $U = [0, 1]$. Як правило, кількість термів j для кожної лінгвістичної змінної вибирається тим самим. Таким чином, для кожного

поточного значення вхідної змінної визначається ступінь належності (величина істинності) до тих терм (нечітких підмножин), які характеризують конкретну лінгвістичну змінну. Оскільки ФП зазвичай перекривають один одного, то для однієї і тієї ж вхідної змінної кілька ФП можуть повідомляти різні величини істинності, що відрізняються від нуля.

У блоці формування логічного рішення на основі матриці знань (бази правил) записуються лінгвістичні правила виду ЯКЩО (початкова ситуація), ТО (відповідна реакція), які разом зазвичай називають робочим правилом. Взаємодія між вхідними та вихідними ФП типу ЯКЩО-ТО позначається як імплікація (логічна зв'язка). Імплікація (активізація) – це етап нечіткого висновку, що є процедурою знаходження ступеня істинності кожного з підскладання логічних правил виду ЯКЩО-ТО, які є нечіткими лінгвістичними висловлюваннями у формі лінгвістичних змінних. Частина ЯКЩО (передумови чи умови) означає поєднання логічних операцій, а частина ТО (рішення, висновок, висновок) зазвичай є простою вказівкою лінгвістичної величини для вихідного впливу (керуючого на об'єкт управління) нечіткого регулятора. Відповідним формулюванням правил досягається результат, при якому для будь-якої лінгвістичної величини керуючого впливу, як мінімум, одне з правил виявляється прийнятним. Найчастіше використовується «мінімаксний» Min-Max метод логічного рішення, коли спочатку ФП частини ТО кожного з правил об'єднуються з величиною істинності частини ЯКЩО (при цьому ФП частини ТО обмежується величиною істинності частини ЯКЩО – це «міні» – операція), а потім з обмежених ФП частини ТО шляхом взаємного накладання вибирається результуюча ФП з максимальною величиною істинності («Максі» - операція). Ця результуюча ФП визначає собою поточний вплив основи правил. Процедура обробки правил з формуванням результуючої ФП є логічним рішенням для розрахунку вихідної величини НР.

Нечіткий висновок займає центральне місце у нечіткій логіці та системах нечіткого керування. Процес нечіткого висновку є деякою процедурою або алгоритмом отримання нечітких висновків на основі нечітких умов або передумов

з використанням понять нечіткої логіки. Цей процес поєднує у собі всі основні концепції теорії нечітких множин: функції приналежності, лінгвістичні змінні, нечіткі логічні операції, методи нечіткої імплікації та нечіткої композиції [36].

Нижче наведено деякі особливості нечіткого регулятора (НР). НР працює в дискретному режимі, тому на кожному кроці квантування він має виконати всі необхідні обчислення. НР обробляє всі вхідні змінні, тому на нього можна подавати додаткові змінні, що характеризують процеси в об'єкті керування, і тим самим забезпечувати більший вплив на динаміку керування. Система з НР зазвичай стійка щодо змін параметрів об'єкта керування, що з нечіткою природою правил функціонування. Традиційні методи опису регуляторів, наприклад, за допомогою передавальних функцій для НР не підходять і не потрібні. НР є нелінійним та їх особливістю є відсутність динаміки у самому НР. Відсутність «пам'яті» та процедура проектування, а також словесний опис процесу керування, що характеризується лінгвістичними правилами, є головними особливостями НР.

Нечіткі регулятори реалізуються на практиці, як правило, у формі програмного забезпечення високого рівня, наприклад MATLAB, що забезпечує більшу гнучкість при їх налаштуванні. При цьому за результатами моделювання та випробувань системи керування, що містить нечіткий регулятор у замкнутому контурі, можна змінювати кількісні діапазони лінгвістичних змінних, функції приналежності та модифікувати базу правил з метою отримання необхідної якості керування.

Нечіткі регулятори становлять інтерес у першу чергу для керування об'єктами, які або не піддаються, або піддаються з великими труднощами формалізованого опису, але навіть стосовно керування об'єктами, для яких отримані математичні моделі, ці регулятори часто краще інших, оскільки дозволяють отримати більш високу якість (менші помилки в перехідних та встановлених режимах) систем автоматичного керування.

Оскільки алгоритми керування з урахуванням нечіткої логіки може бути реалізовані лише з використанням ЕОМ, система автоматичного керування з нечітким регулятором є цифровою. Найважливішою характеристикою цифрової

системи керування є крок квантування (інтервал дискретизації аналогового сигналу). Значення багато в чому визначає значення інших параметрів цифрової системи автоматичного керування, зокрема параметрів традиційних цифрових регуляторів.

Тому при проектуванні систем керування з нечіткими регуляторами необхідно приділяти увагу вибору значення кроку квантування.

При формуванні структурних схем систем керування з нечіткими регуляторами, важливим є вибір входних параметрів нечіткого регулятора. Лінгвістичні правила керування власними силами неможливо знайти реалізовані на сучасних ЕОМ. Необхідна процедура їхньої формалізації. У зв'язку з цим дуже важливим є завдання вибору методу формалізації експертних знань. Оскільки нечіткі множини формалізуються за допомогою функцій власності, важливу роль відіграє вибір їх виду та параметрів. При реалізації нечіткого керування у сучасних ЕОМ необхідно ставити конкретні значення параметрів функцій власності, насамперед межі зміни. Тому важлива методика параметричного налаштування нечіткого регулятора.

При оптимізації параметрів цифрових нечітких регуляторів необхідно задавати критерій якості та функції впливів (керівний та/або збурюючий впливи) на систему. Якщо розробника цікавить у першу чергу швидкодія системи автоматичного керування, то за критерій якості можна прийняти час регулювання, що визначається по кривій перехідного процесу (реакції системи на ступінчасту входну дію) [36]:

$$J = t_p \Rightarrow \min \quad (1.55)$$

Крім цього, необхідно накласти певні обмеження на криву реакції системи, наприклад, на число коливань, величину перерегулювання при коливальному перехідному процесі.

Якщо необхідно мінімізувати поточну помилку (забезпечити точність стеження за входним впливом), то найчастіше використовують один із квадратичних критеріїв якості, наприклад,

$$J = \frac{1}{L} \sum_{v=0}^{L-1} \theta_v^2 \Rightarrow \min, \quad (1.56)$$

де помилка системи θ_v обчислюється з кроком моделювання h_0 , а число L визначає інтервал спостереження.

В інтерактивній системі MATLAB блок DRMS обчислює значення кореня із середньоквадратичної помилки (root mean squared value). У цьому випадку критерій якості можна записати як

$$J = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{v=0}^{L-1} \theta_v^2} \Rightarrow \min. \quad (1.57)$$

Оптимальні параметри нечіткого регулятора відповідають мінімальному значенню критерію якості, а мінімізація критерію якості автоматично призводить до оптимізації перехідних процесів у системі керування. Можна використовувати різні алгоритми умовної та безумовної оптимізації.

При проектуванні систем автоматичного керування розробник має можливість використовувати нечіткі регулятори з різними розглянутими ідентичними для кожної лінгвістичної змінної функції приналежності або синтезувати нечіткі регулятори з іншими функціями приналежності. Для кожної лінгвістичної змінної можна використовувати свої функції приналежності з параметром, що варіюється. Таким чином, існує досить велика кількість варіантів завдання функцій при оптимізації параметрів нечіткого регулятора. Найбільш простим варіантом є завдання функцій приналежності однієї і тієї ж форми з одним і тим самим коефіцієнтом налаштування або для кожної лінгвістичної змінної. Іншим варіантом є завдання функцій приналежності однієї й тієї ж форми, але з різними коефіцієнтами налаштування кожної лінгвістичної змінної. Наступним варіантом є завдання функцій приналежності різної форми з різними коефіцієнтами налаштування кожної лінгвістичної змінної. При проектуванні регулятора необхідно вибрати варіант, який за оптимізації параметрів нечіткого регулятора дає найменше значення критерію якості з розрахованих для різних варіантів мінімальних критеріїв якості.

Часто задовольняючу якість системи керування можна отримати, синтезуючи нечіткий регулятор з різними ідентичними для кожної лінгвістичної змінної функціями приналежності та досліджуючи методом математичного моделювання процеси в системі з нечітким регулятором шляхом порівняння різних варіантів та вибору одного з варіантів.

Нині активно формується ринок комерційних програмних продуктів до роботи з нечіткою логікою. На ньому представлено понад 100 пакетів прикладних програм, які тією чи іншою мірою використовують нечітку логіку. Лідерами у цій галузі є кілька компаній-розробників програмного забезпечення. Їхні інструментальні засоби орієнтовані на застосування нечіткої логіки в максимальній кількості областей та додатків. Це пакет CubiCalc фірми Hyper Logic, FuzzyTECH (Inform Software), FIDE (Ap-tronix), пакети розширення до Matlab: Fuzzy Logic Toolbox (постачається з MatLab) та FlexTool for MATLAB компанії Synap Sys, а також пакет JFS (розробник Ян Мортенсен) та інші.

Більшість перерахованих пакетів програм мають повнофункціональний інтерфейс користувача, розвинені засоби імпорту/експорту даних. Класифікувати пакети нечіткої логіки за їх можливостями можна наступні групи.

1. Програмне забезпечення для створення коду для мікроконтролерів, що працюють на нечітких алгоритмах. Як правило, код генерується мовою Сі або мовою асемблера.

2. Пакети, що дозволяють будувати експертні системи з урахуванням нечіткої логіки. Іншими словами, нечіткі правила та функції власності задаються експертами предметної галузі. У всіх пакетах досліднику надається можливість вибору виду функцій приналежності (трикутна, трапецеїдальна, гауссова та ін), механізму нечіткого виведення (Мамдані, Сугено, Цукамото, Ларсена), способу композиції та приведення до чіткості. Робота з пакетами полегшується графічним відображенням мнемосхем нечітких моделей, поверхонь відгуку та інших залежностей [37].

3. Пакети, що дозволяють будувати апроксиматори залежностей та системи класифікації на основі адаптивних моделей нечіткого виведення.

До першої групи належать інструментальні засоби Fuzzy TECH та FIDE. При моделюванні складних систем основний інтерес представляють пакети програм із двох останніх груп. Серед розглянутих пакетів найбільшу універсальність мають FuzzyTECH і розширення Fuzzy Logic Toolbox for MatLab.

Fuzzy logic toolbox – вбудована в Матлаб сукупність функцій, що забезпечує набір засобів, що дозволяють:

- створювати та редагувати нечіткі системи всередині середовища Матлаб;
- вбудовувати нечітку підсистему Simulink (постачається з Матлабом) при моделюванні загальної системи;
- побудувати нечітку систему у Матлабі як процедури, викликані з програми, написаної на Сі.

Також для розробки додатків на базі нечіткої логіки та нейросистем для завдань автоматичного управління компаніями INFORM GmbH та Inform Software Corp. було розроблено досить потужний пакет програм, який отримав назву FuzzyTECH. Цей пакет програм є засобом моделювання та оптимізації проектів створення нечітких систем управління на базі мікроконтролерів, він також є генератором асемблерного коду, який підтримує велику кількість сучасного обладнання.

Основними кроками розробки програм на FuzzyTECH є:

- формалізація поставленої задачі – визначення лінгвістичних змінних, зіставлення термів з конкретними фізичними значеннями;
- розробка бази правил, що визначає стратегію управління – завдання методу дефазифікації вихідних даних;
- оптимізація розробленої системи в режимі off-line – інтерактивний аналіз поведінки системи з використанням заздалегідь підготовлених даних за допомогою програмної моделі об'єкта управління;
- оптимізація в режимі on-line – підключення створеної системи управління до реального об'єкта та оптимізація різних компонентів системи у реальних умовах; так як у моделі об'єкта керування неможливо врахувати всі тонкощі

процесу, то цей режим налагодження дуже важливий під час створення систем управління;

– реалізація – цьому етапі вибирається варіант генерованого коду залежно від потреб. Отриманий код для мікроконтролера то, можливо пов'язані з основний програмою чи записаний в ПЗП системи керування.

Висновки до розділу 1

Згідно з виконаним аналізом літератури, актуальним є вирішення наступних завдань:

– розробка теоретичних основ побудови прогнозної системи керування та регулювання двоканальним компенсатором у разі двомостової схеми випрямляча низькочастотного каналу компенсатора;

– розробка методик керування низькочастотним каналом компенсатора, а саме алгоритмів переведення струму вентиляційної групи на ГТО тиристорах на вентиляційну групу на одноопераційних тиристорах, у разі перемикання з режиму генерації реактивної потужності в мережу живлення в режим споживання, і навпаки;

– розробка багатоконтурної цифрової системи керування двоканальним компенсатором неактивних складових повної потужності;

– розробка та мікропроцесорна реалізація узагальненого алгоритму керування двоканальним компенсатором;

– оптимізація параметрів багатоконтурної цифрової системи керування напівпровідниковим двоканальним компенсатором.

Вирішення поставлених питань забезпечить оптимальні умови функціонування силового обладнання напівпровідникового двоканального компенсатора неактивних складових повної потужності, його високі енергетичні характеристики, у тому числі максимальний коефіцієнт корисної дії компенсатора за підтримки допустимого рівня середньої реактивної потужності мережі живлення.

РОЗДІЛ 2. КЕРУВАННЯ ДВОКАНАЛЬНИМ НАПІВПРОВІДНИКОВИМ КОМПЕНСАТОРОМ

2.1. Двоконтурна система керування двоканальним компенсатором неактивних складових повної потужності

Проектування багатоконтурних систем регулювання є складним процесом, і вибір правильних рішень потребує глибокого аналізу та експериментального дослідження. Значно покращити якість регулювання процесу за наявності кількох збурень різноманітного типу можливо завдяки використанню багатоконтурних систем з підлеглим регулюванням параметрів. Налаштування багатоконтурної системи з підлеглим регулюванням параметрів досягається послідовною оптимізацією контурів системи, починаючи з внутрішнього і до зовнішніх. Під оптимізацією контуру зазвичай розуміють таке його налаштування, яке найкраще відповідає поставленим вимогам. Відхилення регульованої величини від заданого значення повинні усунути регулятором за найкоротший час і з мінімальним перерегулюванням.

Застосування багатоконтурної системи керування напівпровідниковим компенсатором неактивних складових повної потужності дозволить підвищити ефективність функціонування компенсатора загалом. Це обумовлюється тим, що одночасне застосування в системі керування та регулювання напівпровідниковим компенсатором додаткових контурів регулювання має забезпечити підтримку на допустимому рівні величини генерованої або споживаної середньої реактивної потужності та миттєвих значень неактивних потужностей, зокрема рівня коефіцієнта гармонік струму мережі, або окремо взятих вищих гармонік струму мережі при збереженні оптимальних умов функціонування силового обладнання напівпровідникового компенсатора.

Структура аналого-цифрової системи керування компенсатором з урахуванням $p-q$ теорії потужності наведено на рис. 2.1 [35]. Силова частина перетворювача містить дві вентильні групи $ВГ_G$ та $ВГ_T$ компенсатора реактивної

При використанні зворотного зв'язку датчика струму 1, сигнал на його виході несе інформацію про величини миттєвих сумарних значень активної та неактивної потужності навантаження і компенсатора:

$$p_{\Sigma} = p_L + p_C, \quad q_{\Sigma} = q_L + q_C, \quad (2.1)$$

де p_{Σ} , q_{Σ} – миттєва сумарна активна та неактивна потужності в точці підключення компенсатора до навантаження;

p_L , q_L – миттєва активна та неактивна потужності навантаження відповідно;

p_C , q_C – миттєва активна та неактивна потужності компенсатора, а також інформацію про зміст вищих гармонік у струмах мережі $i_{S a,b,c}$. У цьому випадку завдання компенсатора полягає у підтримці близького до нуля значення середньої реактивної потужності

$$Q_{\Sigma} = 0, \quad (2.2)$$

внаслідок чого на вході регулятора середньої реактивної потужності 3 встановлюється сигнал завдання

$$Q_{ref} = 0. \quad (2.3)$$

Крім того, перетворювач здійснює компенсацію миттєвих складових неактивної потужності, зокрема, компенсацію вищих гармонік мережного струму та підтримку форми мережевого струму, близьку до синусоїди. Для цього, використовуючи інформацію на виході датчика струму 9, силовий активний фільтр повинен генерувати в мережу живлення струми $i_{F a,b,c}$ так, щоб здійснювати синусоїдальну форму струмів мережі $i_{S a,b,c}$.

Сигнал завдання середньої реактивної потужності $Q_{ref} = 0$ надходить на додатний вхід вузла порівняння 4, на від'ємний вхід якого надходить сигнал зворотного зв'язку середньої реактивної потужності $Q = q$.

Залежно від знака реактивної потужності навантаження, різницевий сигнал через регулятор середньої реактивної потужності 3 і підлеглий регулятор струму I_d 5 впливає на вхід однієї із систем імпульсно-фазового управління 6 або 7, синхронізованих з напругою мережі живлення. Сигнал на виході блоку 8 відключає керуючі імпульси непрацюючої вентильної групи.

Сигнал з виходу датчика напруги мережі 9, клеми 101, надходить на вхід блоку 11, в якому здійснюється перетворення напруги мережі з координат a, b, c в координати α, β відповідно до рівнянням:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Сигнал з виходу датчика струму 1 або 2, клеми 105 або 106, надходить на вхід блоку 12, в якому здійснюється перетворення струму мережі з координат a, b, c в координати α, β відповідно до рівняння:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} + i_{Ca} \\ i_{Lb} + i_{Cb} \\ i_{Lc} + i_{Cc} \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

У блоці 13 здійснюється розрахунок миттєвих значень активної та неактивної потужності за співвідношеннями, описаними в [35]:

$$p = \frac{3}{2}(u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta), \quad q = \frac{3}{2}(u_\beta i_\alpha - u_\alpha i_\beta), \quad (2.6)$$

де i_α, i_β визначаються з (2.5), а u_α, u_β – з (2.4).

Змінні складові активної p і реактивної потужності q , на виході фільтрів 14 і 15 дозволяють розрахувати струми i_{Fa} і $i_{F\beta}$, які повинен генерувати в мережу інвертор напруги для компенсації неактивних складових миттєвої потужності, зокрема придушення вищих гармонік струму [35]:

$$\begin{aligned} i_{Fa} &= \frac{2}{3(u_\alpha^2 + u_\beta^2)}(u_\alpha(\tilde{p} + P_c) + u_\beta \tilde{q}) \\ i_{F\beta} &= \frac{2}{3(u_\alpha^2 + u_\beta^2)}(u_\beta(\tilde{p} + P_c) - u_\alpha \tilde{q}) \end{aligned} \quad (2.7)$$

На третій вхід блоку 16 надходить сигнал активної комутаційної потужності P_c , пропорційний величині напруги на накопичувальному конденсаторі C .

Для формування цього сигналу використовуються вузли порівняння 17 і регулятор P_c 18. На входи вузла порівняння 17 надходить сигнал завдання величини напруги на конденсаторі накопичувача і сигнал з датчика напруги 19, пропорційний напрузі на конденсаторі накопичувача. Вихідний сигнал регулятора P_c 18 пропорційний комутаційній активній потужності.

Комутаційна потужність P_c , що використовується у співвідношенні 2.7, дорівнює нулю при роботі моста на одноопераційних тиристорах і відмінна від нуля при роботі моста на тиристорах GTO.

По струмах i_{Fa} і $i_{F\beta}$ в координатах α, β можуть бути розраховані сигнали завдання миттєвих значень фазних струмів інвертора напруги:

$$\begin{bmatrix} i_{Fa}^* \\ i_{Fb}^* \\ i_{Fc}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Fa} \\ i_{F\beta} \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

Завдання струмами інвертора з виходу блоку цифрової обробки БЦО надходять на вхід компаратора з гістерезисом, де порівнюються з фактичними значеннями фазних струмів інвертора у вузлах порівняння 21, 22, 23. Залежно від результату порівняння включаються транзистори відповідних плечей інвертора напруги. Сигнали керування транзисторами виробляються у блоці 24.

Алгоритм роботи блоку цифрової обробки наведено на рис. 2.2.

Для реалізації додаткових контурів регулювання системи керування компенсатором проведено аналіз роботи компенсованого керованого випрямляча ККВ у режимі компенсатора неактивних складових повної потужності для врахування впливу параметрів силової схеми ККВ на регульовані параметри мережі живлення [38]. При вимиканні ключів вентиляційної групи на GTO тиристорах виникають комутаційні перенапруги, пов'язані з накопиченням енергії в індуктивності розсіювання силового трансформатора.

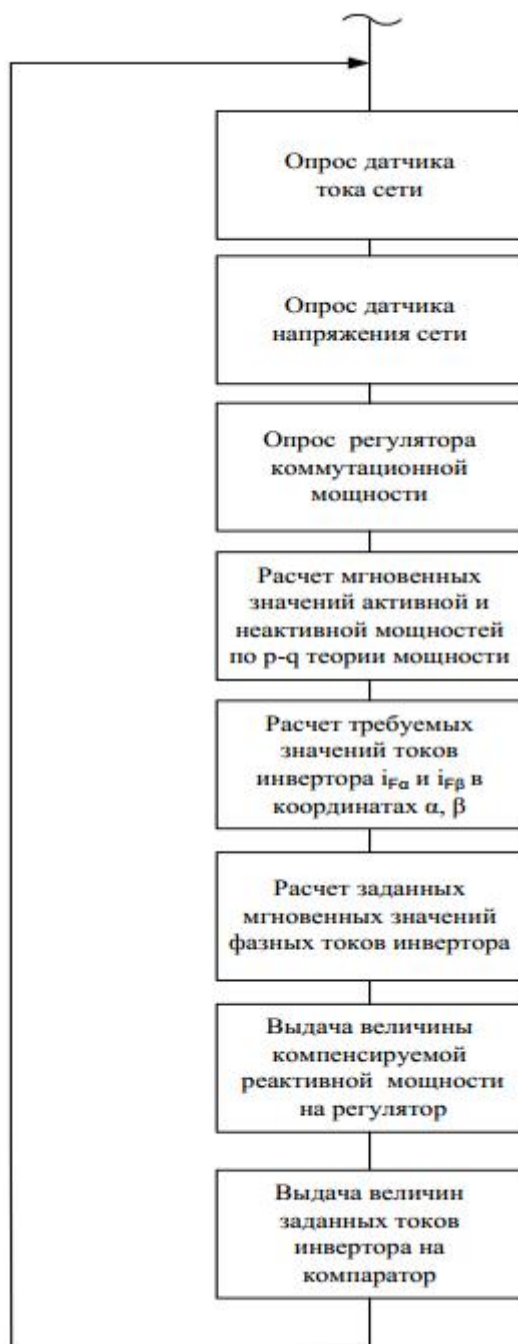
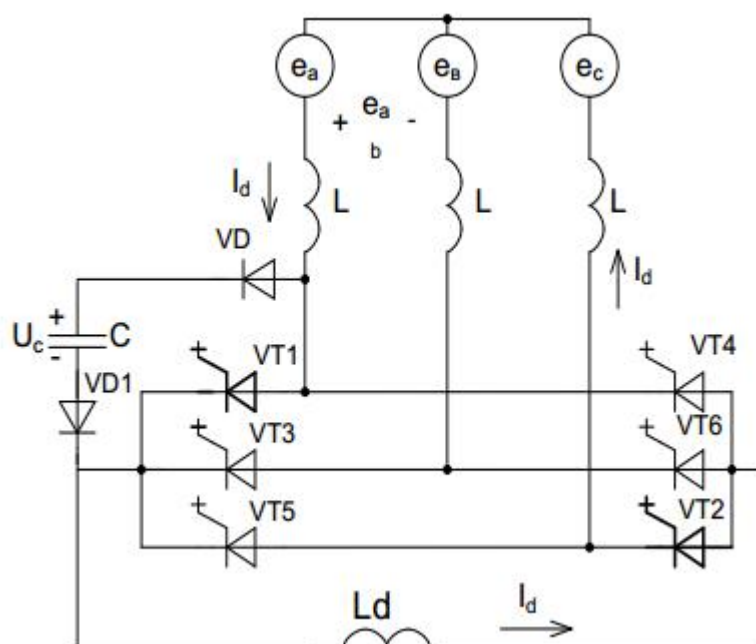


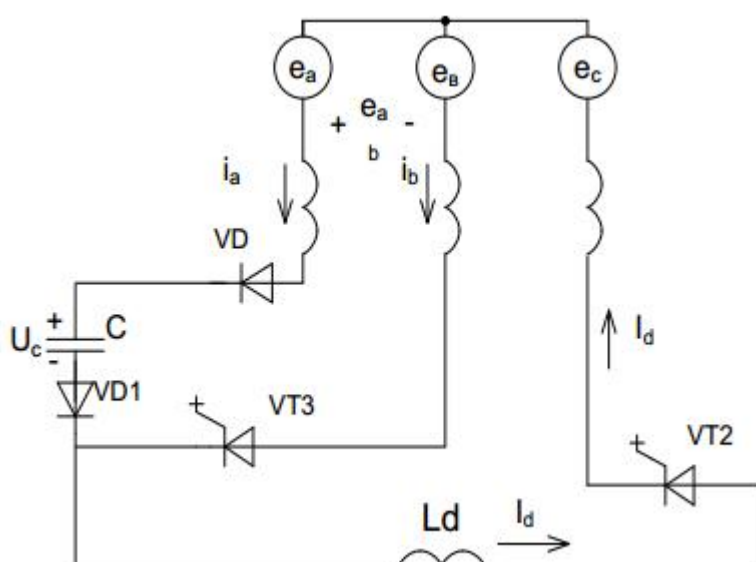
Рис 2.2 Алгоритм работы блока цифровой обработки

Амплітуда імпульсу комутаційної перенапруги залежить від рівня напруги на конденсаторі C та струму реактора L_d . Для обмеження комутаційної перенапруги використовується виведення енергії, що накопичується в індуктивностях розсіювання через діодну групу ДГ і допоміжні діоди $D1$, $D2$ в ємнісний накопичувач.

Контури протікання комутаційних струмів показано на рис. 2.3.



а)



б)

Рис. 2.3. Стан схеми на інтервалах комутації

На рис. 2.3 а представлені відкриті тиристори ВМ_Г V1 і V2 у момент часу, що передуює комутаційному інтервалу.

На рис. 2.3 б показані тиристори, відкриті на комутаційному інтервалі при комутації струму з фази *a* у фазу *b*.

Комутація струму в ВГ_Г здійснюється під дією напруги U_C , більшою ніж амплітуда лінійної напруги вторинної обмотки трансформатора Т1.

Комутація струму у вентильному мосту на тиристорах ВГ_Т відбувається під впливом напруги мережі.

Амплітуда імпульсу комутаційної перенапруги залежить від рівня напруги на конденсаторі C накопичувача U_c та струму реактора L_d .

На рис. 2.4 наведено діаграму лінійної напруги вторинної обмотки трансформатора випрямного моста (низькочастотного каналу компенсатора). Огинаюча відповідає величині напруги на конденсаторі накопичувача.

Імпульси комутаційних перенапруг приводять до розширення спектру гармонік, присутніх в струмі мережі живлення. Кожній вищій гармоніці випрямленої напруги порядку n у змінному струмі відповідають дві вищі гармоніки струму з номерами $n-1$ і $n+1$.

Максимальна амплітуда імпульсу комутаційної перенапруги визначається так:

$$U_{\text{кн}} = U_c - E_{\text{ам1}} , \quad (2.9)$$

де $E_{\text{ам1}}$ – амплітуда лінійної напруги на вторинній обмотці силового трансформатора ФКП.

Енергія, накопичена в індуктивності фази, що вимикається, дорівнює:

$$\Delta W_L = L I_d^2 / 2 , \quad (2.10)$$

де L – індуктивність вентильних обмоток трансформатора,

I_d – струм реактора L_d .

Приріст енергії конденсатора C на інтервалі комутації за умови рівності нулю енергії ($\Delta W_N = 0$), що віддається на цьому інтервалі в мережу живлення, визначається виразом:

$$\Delta W_c = \frac{U_c I_d}{2\omega} \gamma_G , \quad (2.11)$$

де γ_G – кут комутації GTO тиристорів.

За умови повної передачі енергії, накопиченої в індуктивності фази, що вимикається, в конденсатор, отримаємо:

$$\frac{U_c I_d}{2\omega} \gamma_G = LI_d^2 / 2, \quad (2.12)$$

звідки справедливий вираз (2.13), що встановлює зв'язок між напругою на конденсаторі C та кутом комутації мосту на GTO тиристорах:

$$\gamma_G = \frac{LI_d \omega}{U_c}. \quad (2.13)$$

Вирішення поставленої задачі мінімізації високочастотних гармонік можливе шляхом отримання загальних аналітичних виразів для розкладання в ряд Фур'є мережевого струму шестипульсного компенсаційного керованого випрямляча при довільних значеннях кутів керування α_G та α_T і кутів комутації γ_G та γ_T .

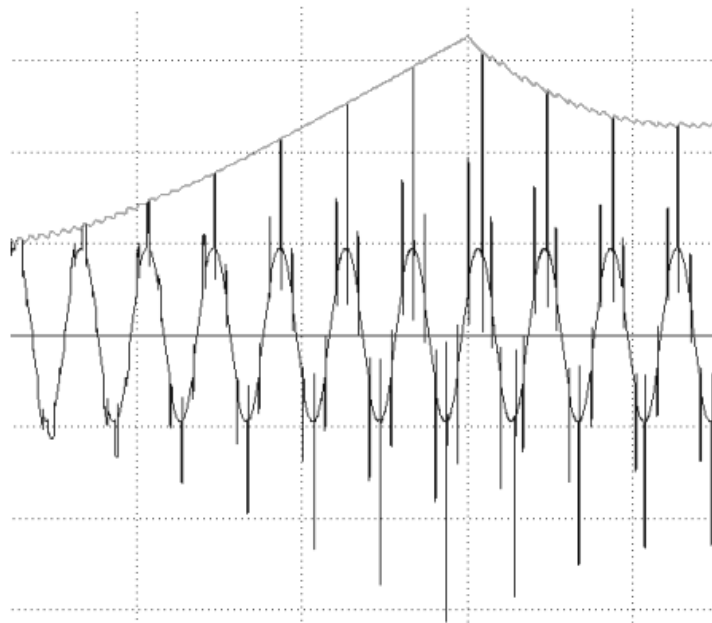


Рис. 2.4. Комутаційні перенапруги

У схемі ККВ, що виконує функцію компенсатора реактивної потужності, миттєве значення фазного струму мережі i_N визначається або миттєвим значенням струму вентильної групи на одноопераційних тиристорах, або миттєвим значенням струму вентильної групи на тиристорах GTO:

$$\begin{aligned} i_N &= i_T, \text{ при } \alpha = \alpha_T; \\ i_N &= i_G, \text{ при } \alpha = \alpha_G, \end{aligned} \quad (2.14)$$

де i_T, i_G – відповідно миттєві значення мережових фазних струмів вентиляльних груп на одноопераційних та GTO тиристорах. Мережовий струм вентиляльної групи на GTO тиристорах містить дві складові: відповідну струму навантаження, пропорційну компенсованої реактивної потужності, і відповідну струму рекуперації. Аналіз гармонійного складу здійснимо без урахування впливу силового активного фільтра на мережовий струм, що споживається ККВ.

Косинусний та синусний ряди Фур'є для вищих гармонік мережного струму ККВ можуть бути визначені як відповідні косинусні та синусні ряди складових мережового струму, зумовлених роботою одного з мостів. Тому справедливі такі рівності:

$$A_n = A_{Gn}; B_n = B_{Gn}; \quad (2.15)$$

$$A_n = A_{Tn}; B_n = B_{Tn}, \quad (2.16)$$

де $A_n, B_n, A_{Gn}, B_{Gn}, A_{Tn}$ і B_{Tn} – відповідно коефіцієнти при n -й гармоніці косинусного та синусного рядів Фур'є сумарного мережового струму та його складових.

З урахуванням (2.13) коефіцієнти A_{Gn}, B_{Gn}, A_{Tn} і B_{Tn} обчислюються наступним чином [38]:

$$\begin{aligned} A_{Gn} &= \frac{U_a}{\sqrt{3}\omega L} \frac{\sin \frac{\pi n}{3}}{\frac{\pi n}{3}} F_{GA}(n); \\ B_{Gn} &= -\frac{U_a}{\sqrt{3}\omega L} \frac{\sin \frac{\pi n}{3}}{\frac{\pi n}{3}} F_{GB}(n); \\ A_{Tn} &= \frac{U_a}{\sqrt{3}\omega L} \frac{\sin \frac{\pi n}{3}}{\frac{\pi n}{3}} F_{TA}(n); \\ B_{Tn} &= -\frac{U_a}{\sqrt{3}\omega L} \frac{\sin \frac{\pi n}{3}}{\frac{\pi n}{3}} F_{TB}(n). \end{aligned} \quad (2.17)$$

Коефіцієнти $F_{GA}(n)$, $F_{GB}(n)$, $F_{TA}(n)$, $F_{TB}(n)$, що входять у вирази (2.17), обчислюються за такими виразами:

$$\begin{aligned}
 F_{GB}(n) &= \frac{\sin(n+1)\frac{\gamma_G}{2}}{n+1} * \sin(n+1)(-\alpha + \frac{\gamma_G}{2}) - \dots \\
 &\quad \frac{\sin(n-1)\frac{\gamma_G}{2}}{n-1} \cdot \sin(n-1)(-\alpha + \frac{\gamma_G}{2}); \\
 F_{GB}(n) &= \frac{\sin(n+1)\frac{\gamma_G}{2}}{n+1} * \cos(n+1)(-\alpha + \frac{\gamma_G}{2}) - \dots \\
 &\quad \frac{\sin(n-1)\frac{\gamma_G}{2}}{n-1} \cdot \cos(n-1)(-\alpha + \frac{\gamma_G}{2}); \\
 F_{TA}(n) &= \frac{\sin(n+1)\frac{\gamma_T}{2}}{n+1} * \sin(n+1)(\alpha + \frac{\gamma_T}{2}) - \dots \\
 &\quad \frac{\sin(n-1)\frac{\gamma_T}{2}}{n-1} \cdot \sin(n-1)(\alpha + \frac{\gamma_T}{2}); \\
 F_{TB}(n) &= \frac{\sin(n+1)\frac{\gamma_T}{2}}{n+1} * \cos(n+1)(\alpha + \frac{\gamma_T}{2}) - \dots \\
 &\quad \frac{\sin(n-1)\frac{\gamma_T}{2}}{n-1} \cdot \cos(n-1)(\alpha + \frac{\gamma_T}{2}).
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

Отримані аналітичні вирази дозволяють проаналізувати залежність амплітуд вищих гармонік мережного струму, що визначається як:

$$\begin{aligned}
 I_{Gn} &= \sqrt{A_{Gn}^2 + B_{Gn}^2}; \\
 I_{Tn} &= \sqrt{A_{Tn}^2 + B_{Tn}^2},
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

від відносної напруги на конденсаторі накопичувача U_C^* , яке визначається як відношення величини напруги на конденсаторі до амплітуди лінійної напруги на вторинній обмотці трансформатора живлення випрямного блоку.

Рис. 2.5 показує залежність амплітуди п'ятої, сьомої, одинадцятої і тринадцятої гармонік струму мережі живлення, споживаного випрямлячем фільтрокомпенсуючого пристрою від відносної напруги на конденсаторі накопичувача. Пунктирною лінією виділено відносне значення зміни рівня комутаційних перенапруг.

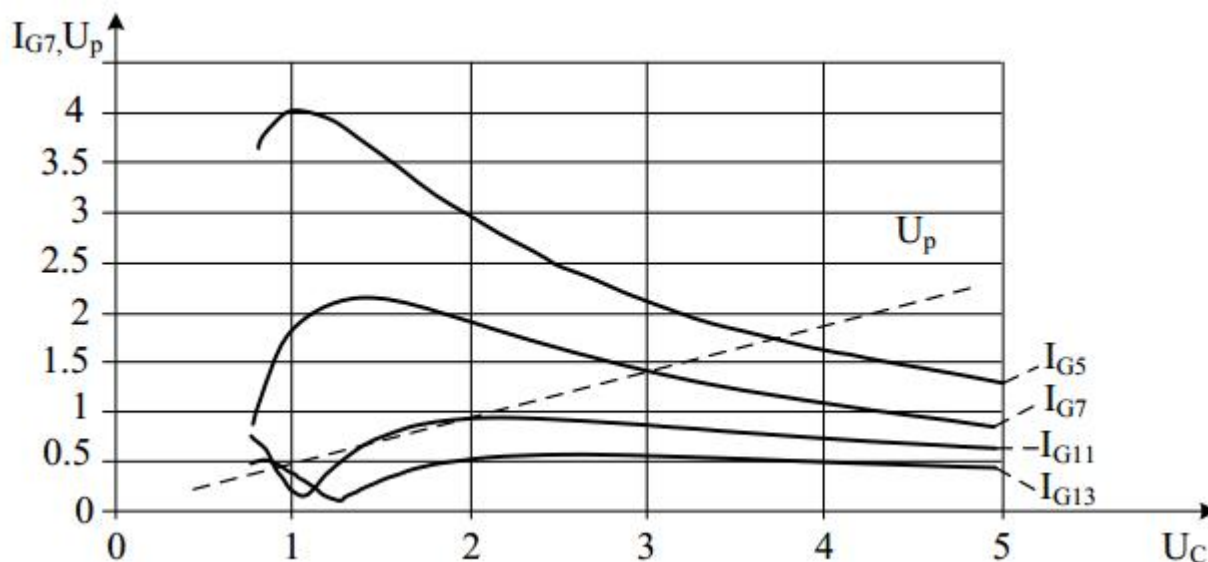


Рис. 2.5. Залежність комутаційних перенапруг та рівня вищих гармонік струму мережі живлення від напруги на конденсаторі

Кожна з отриманих графічних залежностей має деякий діапазон значень напруги на конденсаторі накопичувача, при якому відбувається збільшення величин окремих гармонік а, отже, і коефіцієнта пульсацій мережевого струму ККВ [39].

Дані особливості залежностей необхідно враховувати при виборі величини напруги на конденсаторі накопичувача. Збільшення значення напруги на конденсаторі накопичувача у свою чергу веде до зменшення рівня вищих гармонік струму мережі живлення, проте при цьому слід накладати обмеження, обумовлене зростанням комутаційних перенапруг.

Напруга на конденсаторі накопичувача обмежена знизу умовою відведення енергії в накопичувач, при роботі моста на тиристорах GTO, і дорівнює 1,05 від амплітудного значення лінійної напруги на вторинній обмотці трансформатора випрямляча [29]. Вибір величини напруги на конденсаторі накопичувача слід

виконувати з урахуванням наявності діапазону, в якому відбувається збільшення амплітуди окремо взятих гармонік та коефіцієнта гармонік струму мережі в цілому. Величина напруги на конденсаторі накопичувача, що вибирається з умови забезпечення допустимого значення коефіцієнта гармонік струму мережі живлення, дорівнює подвійному амплітудному значенню лінійної напруги на вторинній обмотці трансформатора ККВ.

Отже, при побудові системи керування та регулювання слід враховувати характер залежності залишкового рівня вищих гармонік струму мережі та комутаційних перенапруг, що виникають при роботі вентиляльної групи на керованих тиристорах, від напруги на ємнісному накопичувачі інвертора напруги.

Результатом обліку отриманих залежностей є введення в описану структуру системи керування компенсатором на рис. 2.6 додаткового контуру регулювання за рівнем амплітуд вищих гармонік струму мережі живлення КР1, а з урахуванням залежності рівня комутаційних перенапруг від напруги на конденсаторі накопичувача, контур регулювання КР1 регулювання за рівнем комутаційних перенапруг. Подібне виконання контуру регулювання рівня амплітуди окремо взятої гармоніки (КР2 на рис. 2.7) дозволить досягти мінімального рівня амплітуди обраної гармоніки за допустимого рівня комутаційних перенапруг, тим самим забезпечить оптимальні умови функціонування силового обладнання напівпровідникового двоканального компенсатора та його високі енергетичні характеристики.

Контур регулювання КР1 (рис. 2.6) складається із задатчика допустимого рівня вищих гармонік струму $I_{n\ ref}$ і вимірювача поточного рівня вищих гармонік струму в точці підключення компенсатора до мережі живлення. Сигнали даних блоків порівнюються в компараторі 1, вихідний сигнал якого надходить на вхід блоку регулятора амплітуд гармонік струму 2. Вихідний сигнал регулятора подається на вхід вузла порівняння, на другий вхід якого подається сигнал з датчика напруги на конденсаторі накопичувача.

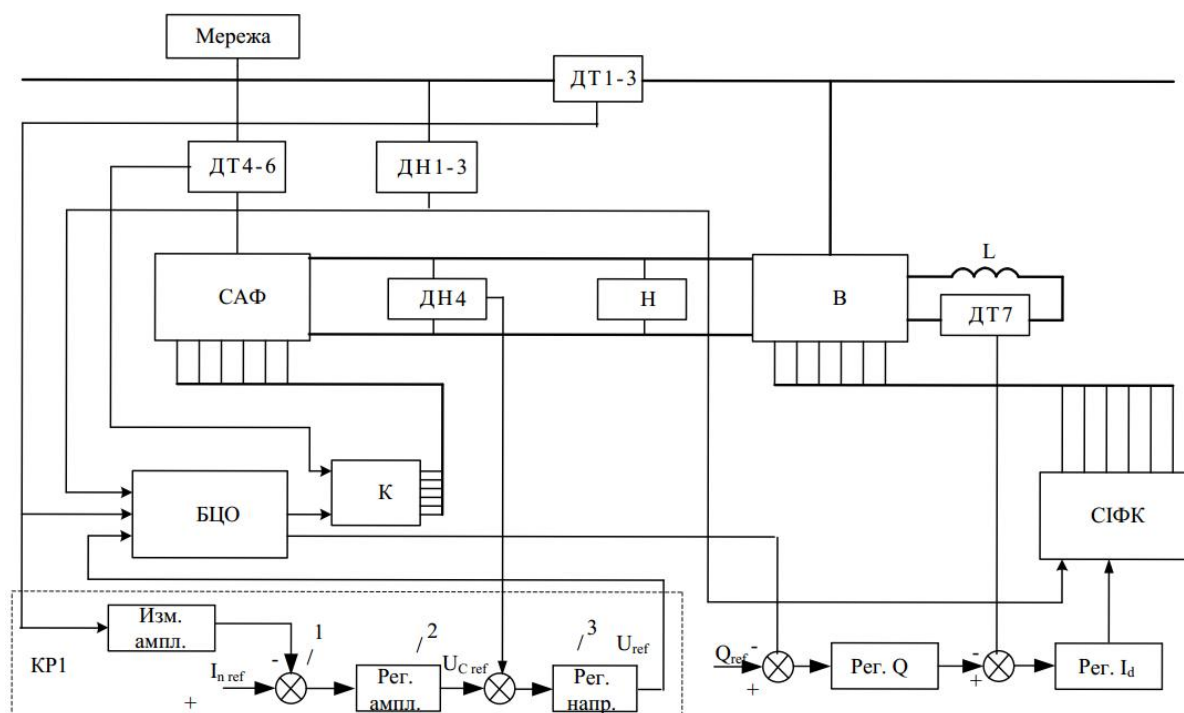


Рис. 2.6. Структура аналого-цифрової системи управління ФКП на основі $p-q$ або $p-q-r$ теорій потужності з додатковим контуром регулювання допустимого рівня амплітуди обраної гармоніки

Вихідний сигнал другого регулятора 3 визначає необхідний рівень напруги на конденсаторі напруги інвертора. Таким чином забезпечується підтримка напруги на конденсаторі інвертора на рівні, необхідному для забезпечення допустимого рівня вищих гармонік в струмі мережі живлення.

При роботі системи автоматичного регулювання компенсатора з додатковим підпорядкованим контуром регулювання за рівнем комутаційних перенапруг КР2 (рис. 2.7), сигнал завдання допустимої величини гармоніки $I_{n\text{ ref}}$ надходить на один із входів компаратора 1, на другий вхід якого надходить сигнал з блоку вимірювача поточного рівня вищих гармонік струму в точці підключення компенсатора до мережі живлення.

Вихідний сигнал регулятора рівня амплітуд гармонік струму 2 надходить на компаратор 3. Другому вхідному сигналу компаратора відповідає сигнал, пропорційний величині прикладених до силових ключів перенапруги, з виходу фіксатора перенапруг ФП. Вихідний сигнал другого регулятора рівня комутаційних перенапруг U_k 4 визначає необхідний рівень напруги на

fuzzy-регулятором, що визначає відхилення від заданого значення амплітуди обраної гармоніки струму і приводить її до встановлених норм.

Першим завданням при побудові системи керування з fuzzy-регулятором є вибір вхідних та вихідних параметрів fuzzy-регулятора, а також формулювання необхідних для роботи регулятора лінгвістичних правил керування.

В якості вхідних параметрів системи нечіткого виведення типу Mamdani запропоновано розглядати 2 нечіткі лінгвістичні змінні (ЛЗ): «коефіцієнт i -тої гармоніки струму мережі живлення», тобто рівень амплітуди обраної гармоніки, віднесений до амплітуди першої гармоніки струму мережі – k_{im} і «рівень напруги на накопичувальному конденсаторі інвертора напруги» – U_c , а як вихідний параметр – нечітка ЛЗ «керуючий сигнал по напрузі на накопичувальному конденсаторі інвертора напруги» – $U_{c\,ref}$.

Кількість лінгвістичних правил керування визначається характером залежності вихідних параметрів регулятора за зміни його вхідних параметрів [40].

Емпіричні знання про аналізований контур регулювання амплітуди обраної гармоніки струму представлені як бази знань fuzzy-регулятора в таблиці 2.1. При складанні бази правил як зв'язок використовується логічна операція «І».

Таблиця 2.1. База знань fuzzy-регулятора

		k_{im}		
		nige_srednego	srednee	vushe_srednego
U_c	NN	N	NN	VN
	N	N	VN	VN
	VN	NN	N	VN

В таблиці 2.1 використані такі значення лінгвістичних термів трикутної форми: NN – нижче за норму; N – норма; VN – вище за норму; $nige_srednego$ – нижче середнього; $srednee$ – середнє значення; $vushe_srednego$ – вище середнього.

При цьому, за середнє значення коефіцієнта i -тої гармоніки струму мережі живлення приймається рівень 5% (відповідно до ДСТУ), а встановлена норма

рівня напруги на накопичувальному конденсаторі інвертора напруги $U_c = 2.5 * E_{am}$ [29].

Перевірку роботи складених лінгвістичних правил керування, а також процедури нечіткого логічного висновку Fuzzy регулятора здійснюється у додатку Fuzzy Logic інтерактивного середовища Matlab у ручному режимі без запуску Matlab-моделі компенсатора.

На рис. 2.8 представлені терми та функції приналежності трикутної форми для вхідних та вихідних змінних системи нечіткого виведення в редакторі FIS Membership Function середовища Matlab.

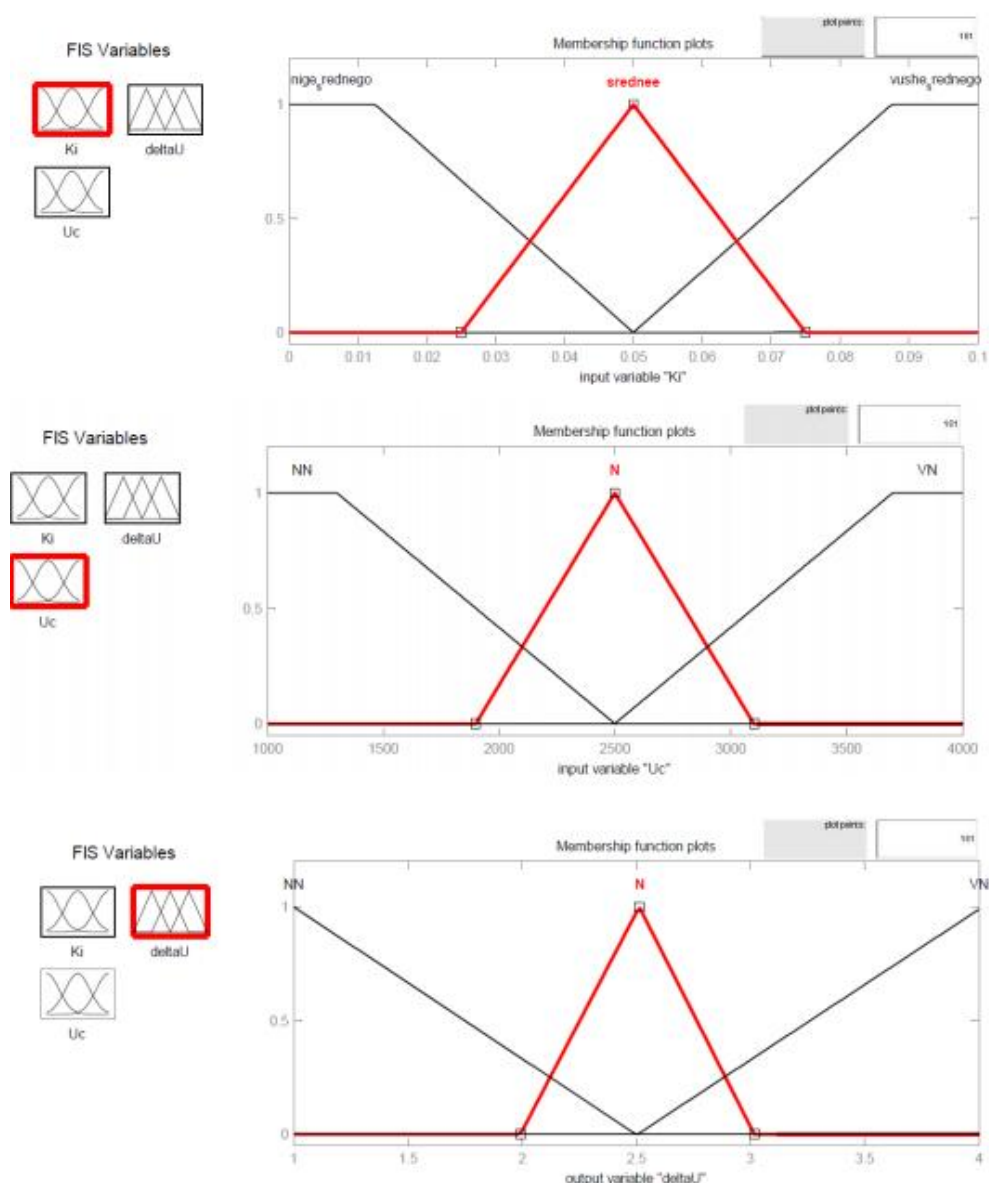


Рис. 2.8 Функції приналежності вхідних та вихідних змінних fuzzy-регулятора у редакторі FIS Membership Function середовища Matlab

На рис. 2.9 показано зміну значення вихідної змінної під час перегляду правил нечіткого виведення у редакторі FIS Rule Viewer після зміни вхідних змінних k_i та U_c на $[0.07; 2100]$. У цьому випадку розроблена система нечіткого виведення видає керуючий сигнал по напрузі на накопичувальному конденсаторі інвертора напруги рівний 2.7, що згодом призводить до збільшення напруги на накопичувальному конденсаторі до заданого рівня, щоб забезпечити необхідний рівень обраної гармоніки мережі живлення.

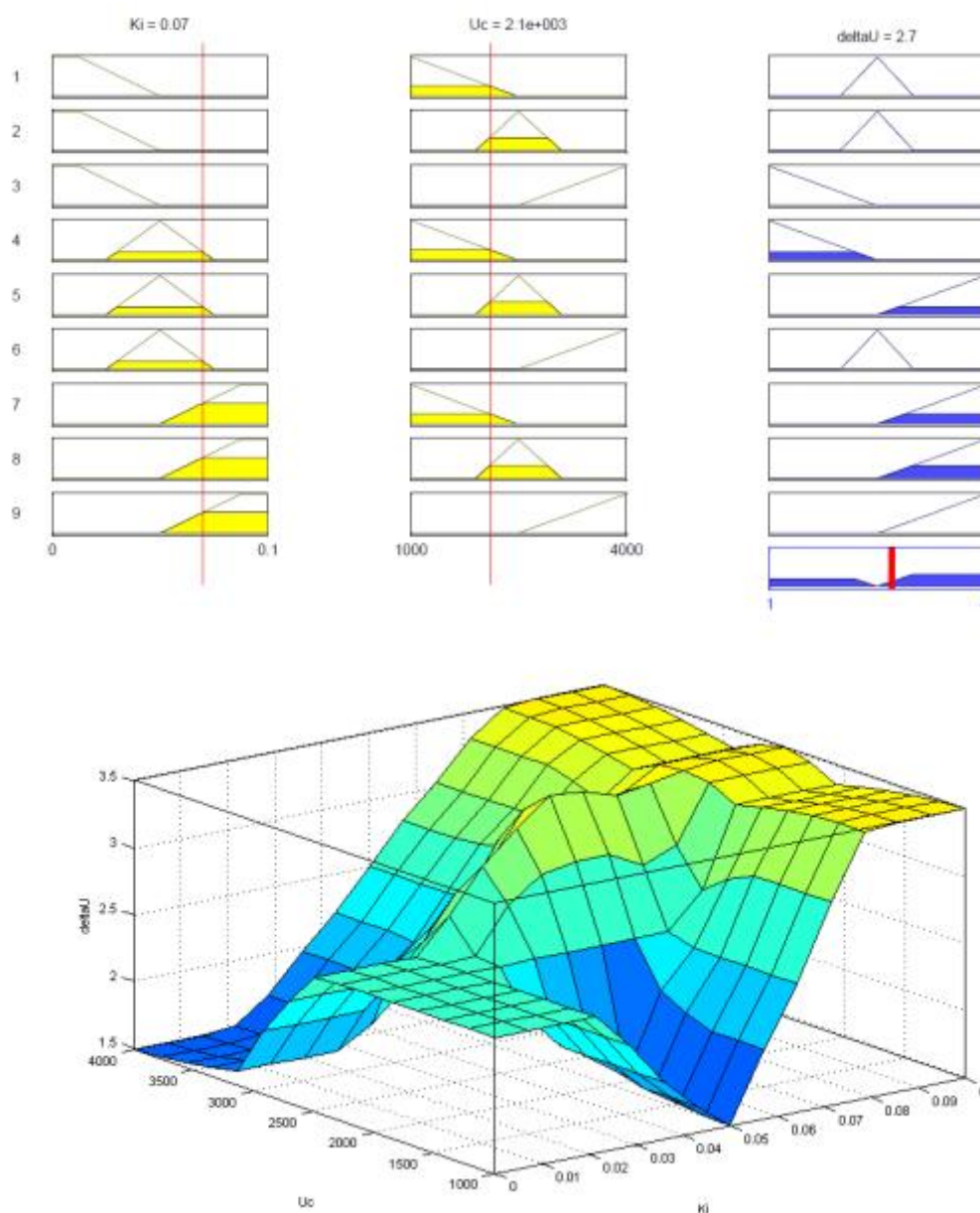


Рис. 2.9. Перегляд правил та поверхні нечіткого логічного висновку у редакторі FIS Rule Viewer

Пропонована система може бути модифікована з урахуванням додавання нових правил або зміни існуючих, а також зміни параметрів функцій належності вхідних та вихідних змінних. Більш тонка настройка моделі може т бути пов'язана зі збільшенням кількості термів для кожної з вхідних та вихідних ЛЗ, що, у свою чергу, призведе до збільшення кількості правил у системі нечіткого виведення та загального ускладнення моделі.

На рис. 2.10 представлена структура багатоконтурної системи керування компенсатором з fuzzy-регулятором рівня амплітуди вибраної гармоніки струму мережі живлення. Контур регулювання за рівнем амплітуд вищих гармонік струму мережі КР1 містить fuzzy-регулятор, один вхід якого надходить сигнал з датчика напруги на конденсаторі накопичувача 19.

На другий вхід регулятора надходить сигнал, що відповідає рівню амплітуди обраної гармоніки k_{im} , отриманий за допомогою блоку вимірювача амплітуд і віднесений до значення рівню амплітуди першої гармоніки мережі живлення. Вихідний сигнал регулятора, утворений за допомогою процедури нечіткого логічного висновку, визначає необхідний рівень напруги на конденсаторі накопичувача для забезпечення необхідного рівня амплітуди обраної гармоніки мережі живлення.

Аналогічним чином може бути побудована багатоконтурна система автоматичного керування компенсатором з додатковим контуром fuzzy-регулювання за рівнем комутаційних перенапруг КР2 (рис. 2.10).

У контурі регулювання КР2, вхідними параметрами fuzzy-регулятора є рівень комутаційних перенапруг U_p з виходу блоку фіксатора перенапруг ФП, рівень напруги на конденсаторі накопичувача U_C , а також рівень амплітуди обраної гармоніки k_{im} , отриманий за допомогою блоку вимірювача амплітуд і віднесений до гармоніки мережі живлення.

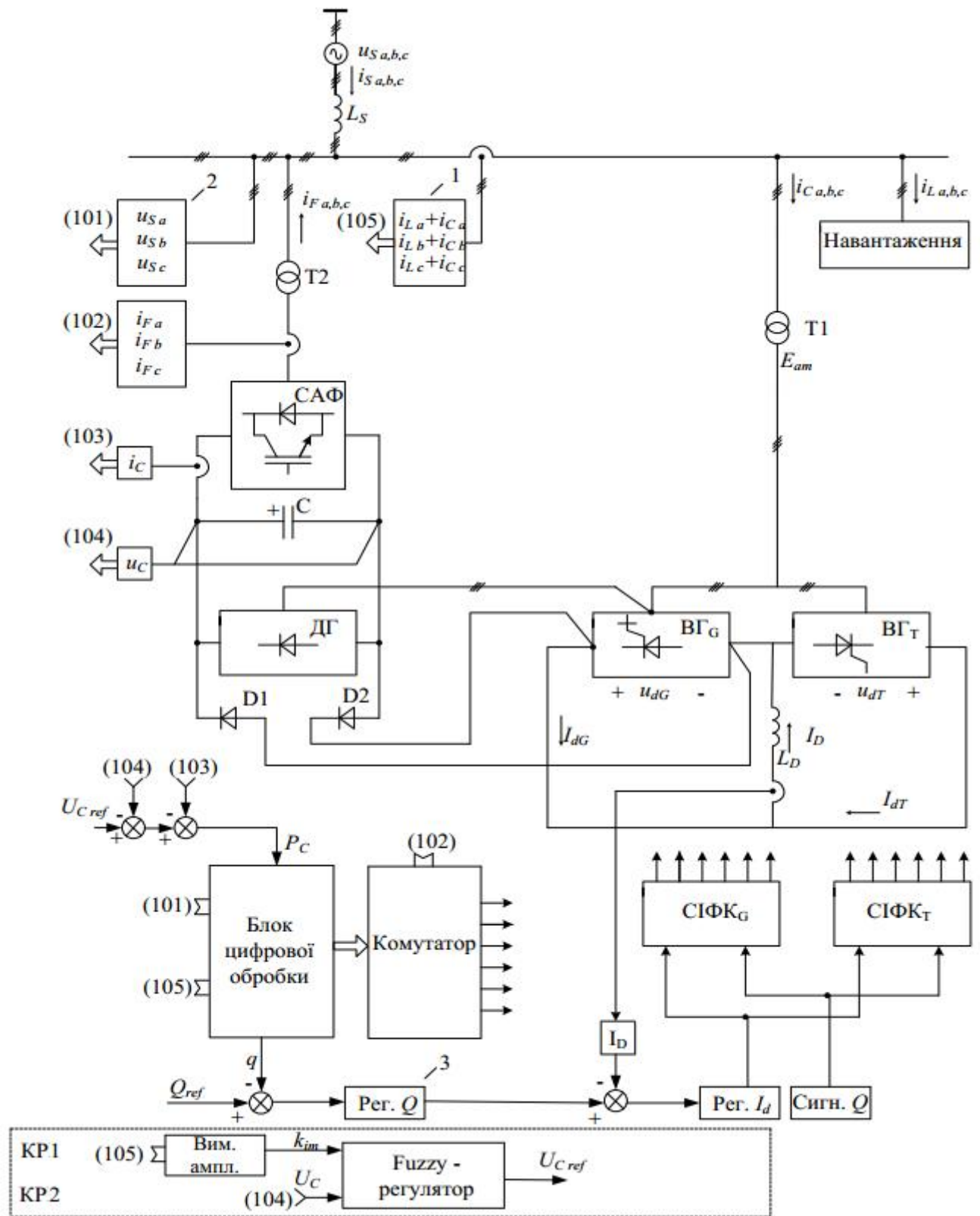


Рис. 2.10 Структура багатоконтурної системи керування компенсатором з fuzzy-регулятором

Зростання кількості вхідних змінних fuzzy-регуляторів відповідає збільшенню кількості лінгвістичних правил управління в системі нечіткого виведення.

Третя вхідна лінгвістична змінна fuzzy-регулятора КР2, а саме рівень комутаційних перенапруг U_p , описується трьома термами трикутної форми: вище норми, норма і нижче норми.

База правил fuzzy-регулятора, наведена в таблиці 2.1, під час використання контуру регулювання КР2 доповнюється наступним лінгвістичним правилом управління: якщо «рівень амплітуди обраної гармоніки k_{im} нижчий від середнього» & «рівень комутаційних перенапруг U_p вищий за норму» то «керуючий сигнал U_{cref} нижчий за норму», де & – логічна операція «І».

Зміна вихідного параметра fuzzy-регулятора, а саме напруги на конденсаторі накопичувача, забезпечує регулювання рівня комутаційних перенапруг, що виникають при роботі моста на тиристорах, що замикаються, а так само рівня амплітуди обраної гармоніки струму мережі живлення.

Методика нечіткого логічного виведення fuzzy-регулятора системи керування двоканальним напівпровідниковим компенсатором.

Процес синтезу fuzzy-регулятора полягає у виборі функцій приналежності терм – множин лінгвістичних змінних, алгоритму нечіткого виведення (логічного виведення на основі нечіткої логіки), оптимізації основних параметрів регулятора (діапазонів зміни лінгвістичних змінних, форми та параметрів функцій приналежності) шляхом системи автоматичного керування.

Розглянемо процес вироблення керуючого впливу fuzzy-регулятора, що входить до складу двоконтурної системи керування двоканальним компенсатором.

Функціональна схема системи управління з fuzzy-регулятором представлена у вигляді структури на рис. 2.11. Така система fuzzy-регулювання складається з об'єкта керування ОК, яким є компенсатор, ланцюги зворотного зв'язку, пристрої порівняння ПП, fuzzy-регулятора НР.

Fuzzy-регулятор містить блок фазифікації, блок формування логічного рішення та блок дефазифікації.

1) Визначення нечіткості (фазифікація). Визначаються терм-множини вхідних лінгвістичних змінних ЛЗ, задаються функції приналежності на єдиному універсальному просторі для термів вхідних лінгвістичних змінних і для конкретних значень змінних визначаються ступеня істинності аналізованої лінгвістичної змінної даного терму.

У блоці фазифікації вхідні змінні, якими є «коефіцієнт i -ї гармоніки струму мережі живлення» – k_i і «рівень напруги на накопичувальному конденсаторі інвертора напруги» – U_c , якісно характеризуються терм-множинами.

Дані терм-множини описуються на універсальній множині U функціями приналежності ФП, що визначають ступінь приналежності кожного елемента множині U числом між 0 і 1, тобто ступенем істинності лінгвістичної змінної даного терму (рис. 2.12).

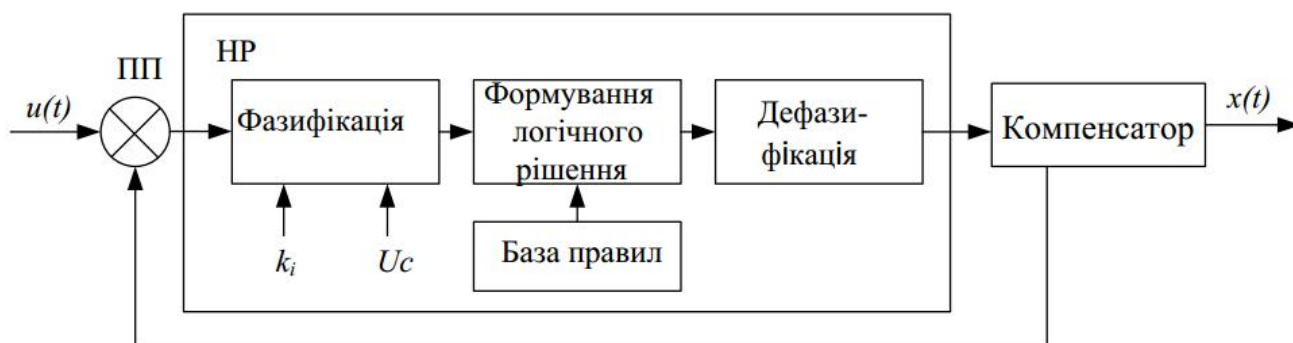


Рис. 2.11. Функціональна схема системи керування з fuzzy-регулятором

Відобразимо діапазони $[k_{i\min}; k_{i\max}]$, $[U_{c\min}; U_{c\max}]$, $[\delta_{\min}; \delta_{\max}]$ зміни вхідних і вихідного параметрів на єдину універсальну множину $U = [0; 1]$. На множині $U = [0; 1]$ задаємо три нечіткі підмножини, ФП яких трикутної симетричної форми показані на рис. 2.12.

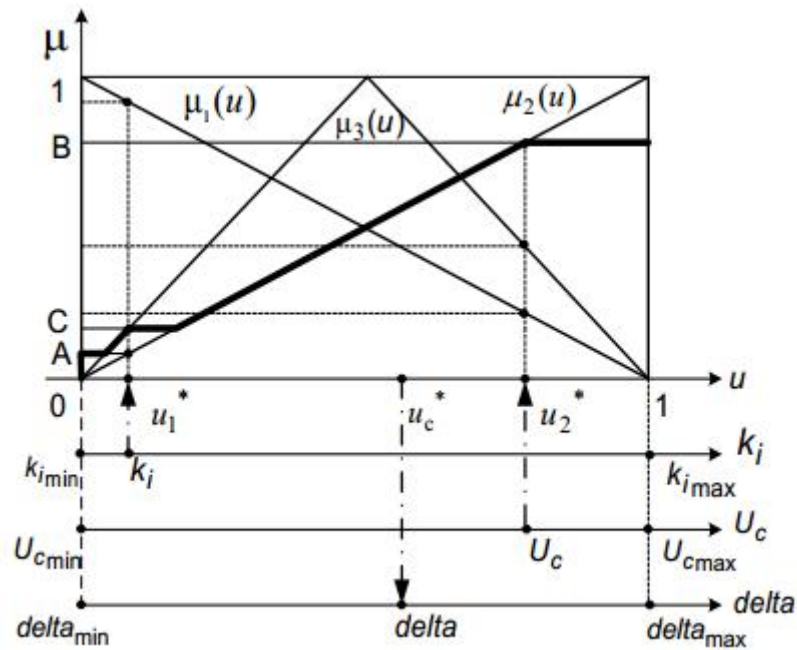


Рис. 2.12. Функції приналежності вхідних та вихідний змінних

Використовуючи рівняння прямої, що проходить через дві точки, отримаємо такі аналітичні вирази для функцій належності кожної ЛЗ [36]:

$$\begin{aligned}
 \mu_1(u) &= 1-u, \quad u \in [0;1]; \\
 \mu_2(u) &= u, \quad u \in [0;1] \\
 \mu_3(u) &= \begin{cases} 2u, & u \in [0;1/2]; \\ 2(1-u), & u \in [1/2;1]. \end{cases}
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

При надходженні на fuzzy-регулятор в якийсь момент часу значень вхідних змінних з кроком квантування здійснюється перерахунок вхідних і вихідних змінних k_i^* , U_c і $delta$ в змінні u_1^* , u_2^* і u_c^* на універсальну множину $U = [0;1]$ за формулами (2.20) [36] та розрахунок значень ФП для цих змінних.

Перерахунок фіксованого значення параметра k_i [$k_{i \min}; k_{i \max}$] у відповідний елемент u_i^* [0;1] визначається пропорцією:

$$(k_{i \max} - k_{i \min}) / (1 - 0) = (k_i - k_{i \min}) / (u_i^* - 0),$$

з якої отримуємо:

$$u_i^* = (k_i - k_{i \min}) / (k_{i \max} - k_{i \min}).$$

Аналогічним чином:

$$\begin{aligned} u_2^* &= (U_c - U_{c_{\min}}) / (U_{c_{\max}} - U_{c_{\min}}), \\ u_c^* &= (\text{delta} - \text{delta}_{\min}) / (\text{delta}_{\max} - \text{delta}_{\min}). \end{aligned} \quad (2.21)$$

У блоці формування логічного рішення на основі матриці знань записуються лінгвістичні правила ЯКЩО-ТО.

2.3. Керування низькочастотним каналом напівпровідникового двоканального компенсатора

Розглянута структура напівпровідникового двоканального компенсатора неактивних складових повної потужності вимагає більш детального розгляду можливості побудови низькочастотного каналу компенсатора. Як було зазначено, низькочастотний канал компенсації середньої реактивної потужності мережі живлення двоканального компенсатора може бути представлений тільки вентильною групою на GTO тиристорах $ВГ_G$, або двома вентильними групами $ВГ_G$ і $ВГ_T$ на GTO і на одноопераційних тиристорах відповідно.

Далі розглянемо вирішення таких питань: створення цифрової прогнозної системи керування двоканальним компенсатором, у разі подання низькочастотного каналу компенсатора двома вентильними групами $ВГ_G$ і $ВГ_T$, а також алгоритмів переведення струму з однієї вентильної групи на іншу, у разі перемикання з режиму генерації реактивної потужності мережу живлення на режим споживання і навпаки.

Нижче розглянуто принцип побудови системи керування двоканальним компенсатором у разі представлення низькочастотного каналу компенсатора двома вентильними групами $ВГ_G$ та $ВГ_T$.

Структурну схему такого компенсатора представлено на рис. 2.13.

Запропонований напівпровідниковий двоканальний компенсатор для компенсації впливу навантаження на якість електроенергії трифазних мереж живлення має прогнозно-гістерезисну систему керування, що складається з

реактивної потужності в точці підключення компенсатора до мережі живлення шляхом компенсації реактивної потужності за рахунок зменшення до нуля сигналу потужності основної частоти змінних складових активної та реактивної потужностей.

При побудові системи керування з урахуванням прогнозних обчислень, основну роль грає математична модель об'єкта, яким є компенсатор, здатна прогнозувати зміна координат стану системи черговому інтервалі дискретності. Розрахунок прогнозованих процесів у перетворювачі реалізується за допомогою сучасних теорій потужності шляхом обчислення середнього та миттєвого значень активної та реактивної потужності в точці підключення компенсатора до мережі живлення.

Різниця між вимірним значенням середньої реактивної потужності та заданим визначає величину реактивної потужності Q , що підлягає компенсації:

$$Q = Q_z - Q_T, \quad (2.22)$$

де Q_z – задане значення реактивної потужності; Q_T – поточне середнє значення реактивної потужності у точці підключення джерела реактивної потужності та компенсатора до мережі, обчислене з використанням теорій потужності.

Реактивна потужність, що споживається від мережі або генерується в мережу відповідно трифазною вентильною групою на GTO, або на одноопераційних тиристорах, залежить від струму реактора L_H і кута керування:

$$Q = 2,45 \cdot U_2 \cdot i_H \sin \alpha \quad (2.23)$$

Звідси можна визначити значення струму, заданого для системи регулювання рівня реактивної потужності:

Керування вентильною групою $B\Gamma_G$ низькочастотного каналу на тиристорах GTO.

Напруга на виході вентильної групи на тиристорах GTO, що працюють з випереджаючими кутами управління α_0 , обчислюється наступним чином:

$$U_{d\alpha} = U_{2m} \cdot \cos\left(\omega t + \alpha_0 + \frac{5}{6}\pi\right). \quad (2.24)$$

Алгоритм керування за прогнозом, що обчислюється, передбачає обчислення кута α_0 , при якому до моменту наступної комутації з кутом керування α_1 струм навантаження досягає заданого значення (рис. 2.14).

Приріст струму навантаження на інтервалі $t = \frac{1}{\omega} \left(\frac{\pi}{3} + \alpha_1 - \alpha_0 \right)$, що дорівнює тривалості поточного такту ККВ, залежить від параметрів навантаження, зміни кутів керування на поточному та наступному тактах і може бути подане у вигляді:

$$\Delta i^*_{H} = \frac{U_{2m}}{k(L_H \cdot \omega + R_H(\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{2}))} \cdot \cos(\frac{\alpha_1 + \alpha_0}{2}) \sin(\frac{\pi}{6} - \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{2}), \quad (2.25)$$

при допущенні про рівність нулю активних опорів R_ϕ та індуктивностей L_ϕ фаз мережі живлення та врахування величини активного опору реактора R_H .

Рівняння зв'язку збільшення струму навантаження вентильною групою ВГ_G з кутом управління (випереджаючим або відстаючим) для випадку реалізації пропорційно - інтегрального закону регулювання струму i_H [29]:

$$\Delta i^*_{H1} = (\cos \alpha_0 - \cos \alpha_1 + \frac{t}{T_1} (i^*_{зад} - i^*_{H0})) \frac{1}{\frac{T_2}{T_1} + \frac{t}{2T_1}} \quad (2.26)$$

де i^*_{H0} – струм у навантаженні в момент відмикання тиристорів при куті α_0 ; T_1 – постійна часу інтегрального каналу ПІ-регулятора; T_2 / T_1 – коефіцієнт передачі пропорційного каналу ПІ-регулятора.

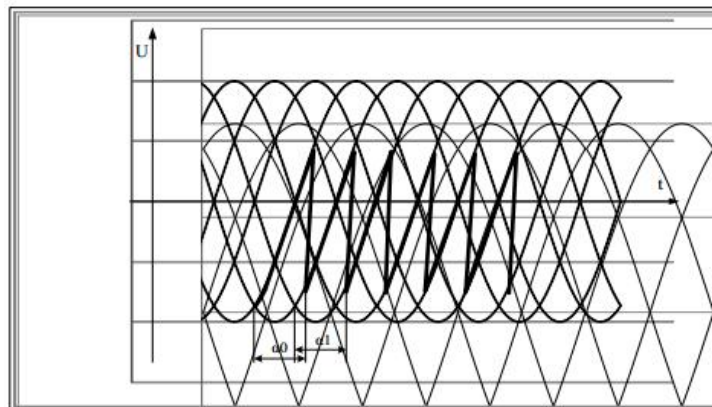


Рис. 2.14. Діаграма керування вентильною групою ВГ_G на GTO тиристорах з випереджаючими кутами

Рівняння (2.26) дозволяє одержати відповідні рівняння зв'язку для реалізації пропорційного (2.27) та інтегрального (2.28) законів регулювання струму реактора:

$$\Delta i_{H1}^* = (i_{зад}^* - i_{H0}^*), \quad (2.27)$$

$$\Delta i_{H1}^* = (i_{зад}^* - i_{H0}^* - \frac{T_1}{t} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_0)). \quad (2.28)$$

Незалежно від умовного регулятора, що застосовується, поточне значення кута α_0 визначається як момент рівності Δi_H^* та Δi_{H1}^* .

Тоді обчислювальний вираз для випадку пропорційного закону регулювання матиме вигляд:

$$\begin{aligned} & \frac{U_{2m}}{k(L_H \cdot \omega + R_H (\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{2}))} \cdot \\ & \cdot (\sin(\alpha_1 + \frac{7}{6}\pi) - \sin(\alpha_0 + \frac{5}{6}\pi)) \\ & = i_{зад}^* - i_{H0}^*. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Рівняння (2.29) можна записати в такий спосіб:

$$\begin{aligned} F1 &= \frac{U_{2m}}{k(L_H \cdot \omega + R_H (\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{2}))} \cdot \\ & \cdot (\sin(\alpha_1 + \frac{7}{6}\pi) - \sin(\alpha_0 + \frac{5}{6}\pi)) - i_{зад}^* + i_{H0}^* = 0. \end{aligned} \quad (2.30)$$

Керування вентиляльною групою ВГ_Т низькочастотного каналу на одноопераційних тиристорах.

Напруга на виході вентиляльної групи на одноопераційних тиристорах, що працюють з відстаючими кутами управління α_0 , обчислюється за формулою:

$$U_{d\alpha} = U_{2m} \cdot \cos(\omega t + \alpha_0 - \frac{1}{6}\pi). \quad (2.31)$$

Приріст струму навантаження на інтервалі $t = \frac{1}{\omega} \left(\frac{\pi}{3} + \alpha_1 - \alpha_0 \right)$, що дорівнює тривалості поточного такту ККВ, залежить від параметрів навантаження, зміни

кутів управління на поточному та наступному тактах α_0 і α_1 (рис. 2.15), може бути подане у вигляді:

$$\Delta i^*_{H} = \frac{U_{2m}}{k(L_H \cdot \omega + R_H (\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{2}))} \cdot (\sin(\alpha_1 + \frac{\pi}{6}) - \sin(\alpha_0 - \frac{\pi}{6})) \quad (2.32)$$

Раніше було отримано рівняння (2.27), яке показує зв'язок вихідного сигналу регулятора зі струмом навантаження ККВ для реалізації пропорційного закону регулювання струму реактора:

$$\Delta i^*_{H1} = (i^*_{зад} - i^*_{H0}), \quad (2.33)$$

де i^*_{H0} – струм навантаження в момент вимкнення тиристорів при куті управління α_0 .

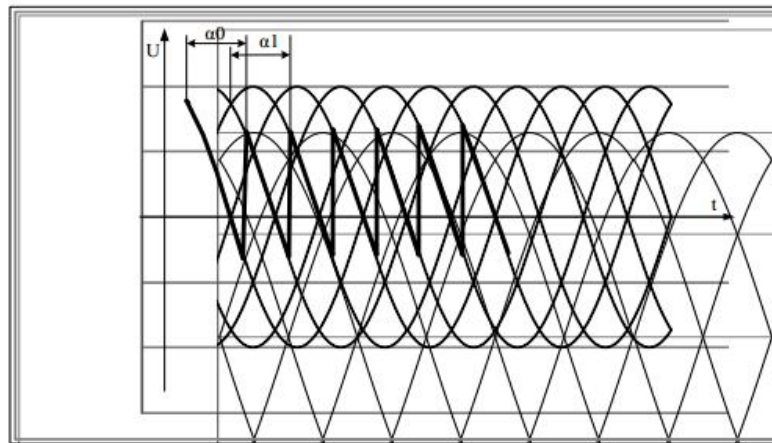


Рис. 2.15. Діаграма управління вентильною групою ВГ_Т на одноопераційних тиристорах з відстаючими кутами управління

Поточне значення кута α_0 визначається в момент рівності Δi^*_H та Δi^*_{H1} . Тоді вираз для випадку пропорційного закону регулювання матиме вигляд:

$$\begin{aligned} & \frac{U_{2m}}{k(L_H \cdot \omega + R_H (\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{2}))} \cdot (\sin(\alpha_1 + \frac{1}{6}\pi) - \sin(\alpha_0 - \frac{1}{6}\pi)) = \\ & = i^*_{зад} - i^*_{H0}, \end{aligned} \quad (2.34)$$

Наведене рівняння можна переписати так:

$$F2 = \frac{U_{2m}}{k(L_H \cdot \omega + R_H(\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{2}))} \cdot (\sin(\alpha_1 + \frac{1}{6}\pi) - \sin(\alpha_0 - \frac{1}{6}\pi)) - i_{зд}^* + i_{н0}^* = 0. \quad (2.35)$$

У виразах (2.30) і (2.35) невідомим є значення кута управління вентиляною групою на наступному такті 1. З урахуванням прийнятих раніше припущень і припускаючи рівність струму навантаження на наступному такті заданому значенню можна знайти α_1 :

$$\alpha_1 = \arccos \frac{i_{зд} \cdot R_H}{U_{d0}}, \quad (2.36)$$

де U_{d0} – вихідна напруга ККВ при $\alpha = 0^\circ$.

Отримані рівняння (2.30) і (2.35) можна використовувати як функціонал, за допомогою якого в перетворювачі визначається момент подачі імпульсів керування тиристорами.

Наведені вище розрахункові співвідношення реалізовані та апробовані за допомогою Matlab-моделі двоканального компенсатора з двомостовим випрямлячем у низькочастотному каналі у статичних та динамічних режимах. Результати моделювання представлені у третьому розділі роботи.

Методика керування низькочастотним каналом двоканального компенсатора неактивних складових повної потужності.

Залежно від знака реактивної потужності на вході компенсатора, протікання струму через реактор забезпечує вентиляна група на тиристорах, що замикаються, або вентиляна група на одноопераційних тиристорах, тому запропонований алгоритм передбачає контроль знака реактивної потужності навантаження і, при його зміні, забезпечує переведення струму з однієї вентиляної групи на іншу. Цей алгоритм передбачає визначення моменту переведення струму з однієї вентиляної групи на іншу, що відбувається за різних умов.

При зміні знака реактивної потужності навантаження з позитивного на негативний переведення струму з вентиляльної групи $ВГ_T$ на $ВГ_G$ відбувається в той момент часу, коли струм навантаження вентиляльної групи на одноопераційних тиристорах стає рівним нулю і відбувається вимкнення тиристорів (рис. 2.16).

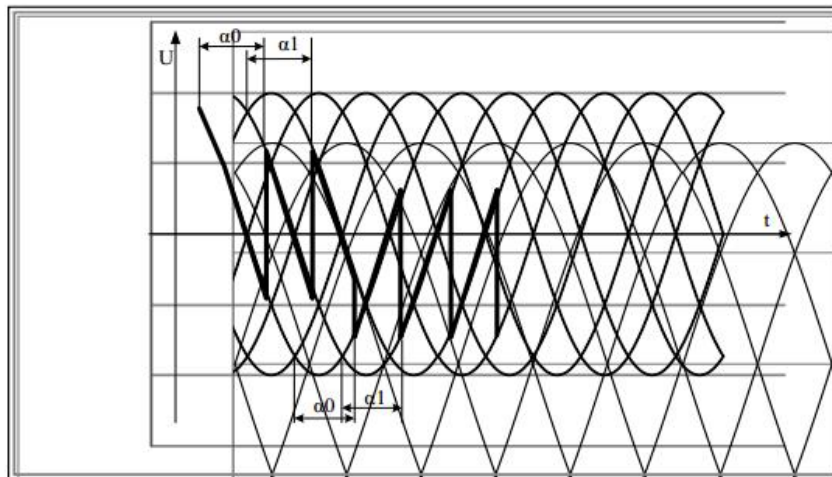


Рис. 2.16. Перехідні процеси за зміни знака реактивної потужності навантаження з «+» на «-»

Якщо ж знак реактивної потужності навантаження став позитивним і слід забезпечити переведення струму з вентиляльної групи $ВГ_G$ на вентиляльну групу $ВГ_T$, алгоритм передбачає обчислення струму завдання для $ВГ_G$, після досягнення якого відбувається перемикавання на одноопераційні тиристори, забезпечуючи мінімальну тривалість перехідного процесу (рис. 2.17).

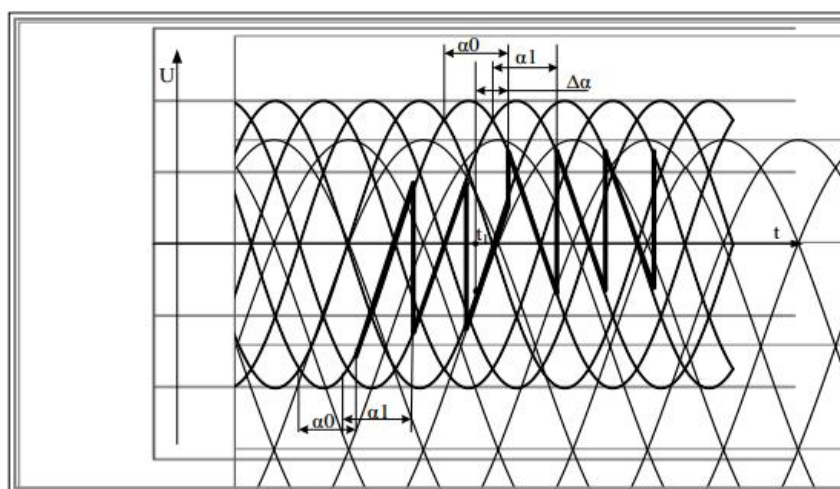


Рис. 2.17. Перехідні процеси за зміни знака реактивної потужності навантаження з «-» на «+»

На рис. 2.18 представлений алгоритм управління низькочастотним каналом компенсатора за зміни знака реактивної потужності навантаження з позитивного на негативний. При зворотній зміні знака реактивної потужності навантаження переведення струму на вентиляну групу ВГ_Т здійснює алгоритм, представлений на рис. 2.19. Функціонали F1 та F2 алгоритмів обчислюються відповідно до виразів (2.30) та (2.35). Алгоритм управління та регулювання двома вентиляними групами каналу компенсації середнього значення реактивної потужності наведено у додатку А.

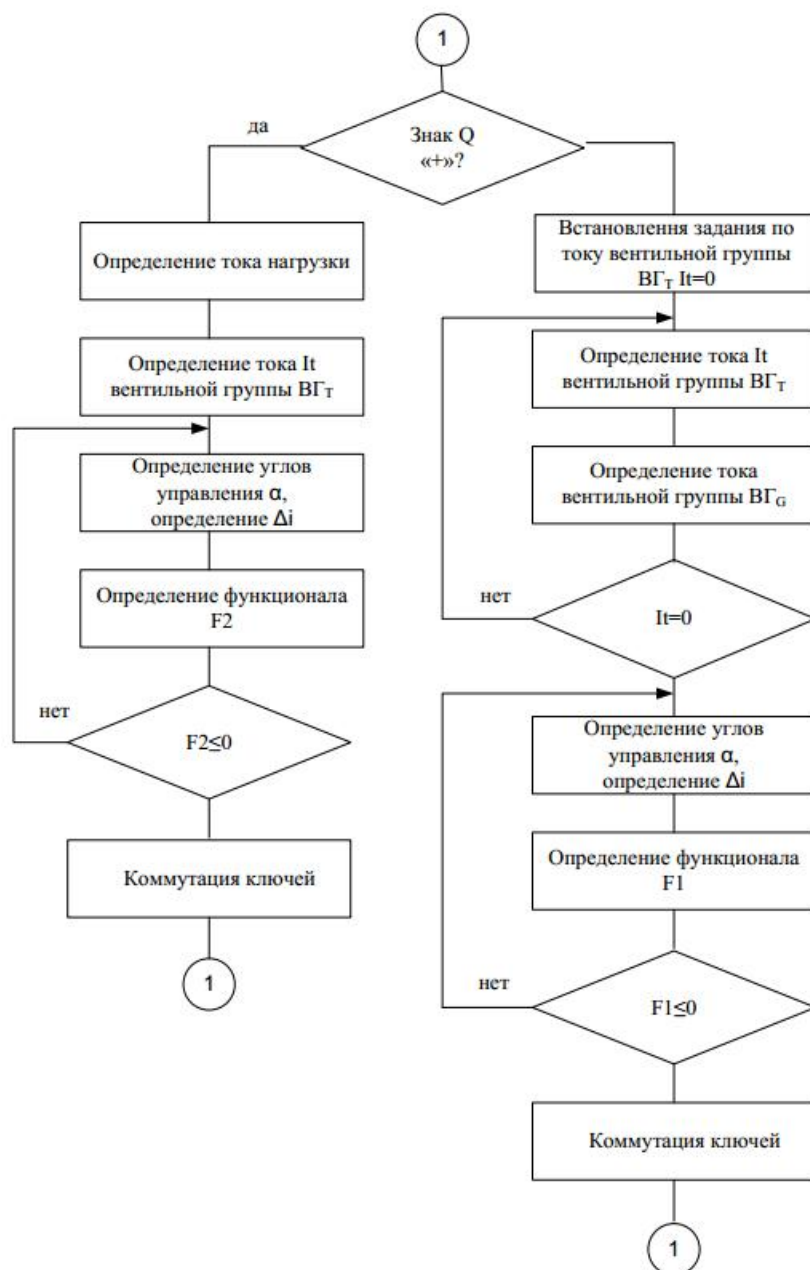


Рис. 2.18. Алгоритм керування низькочастотним каналом компенсатора при зміні знака реактивної потужності навантаження з «+» на «-»

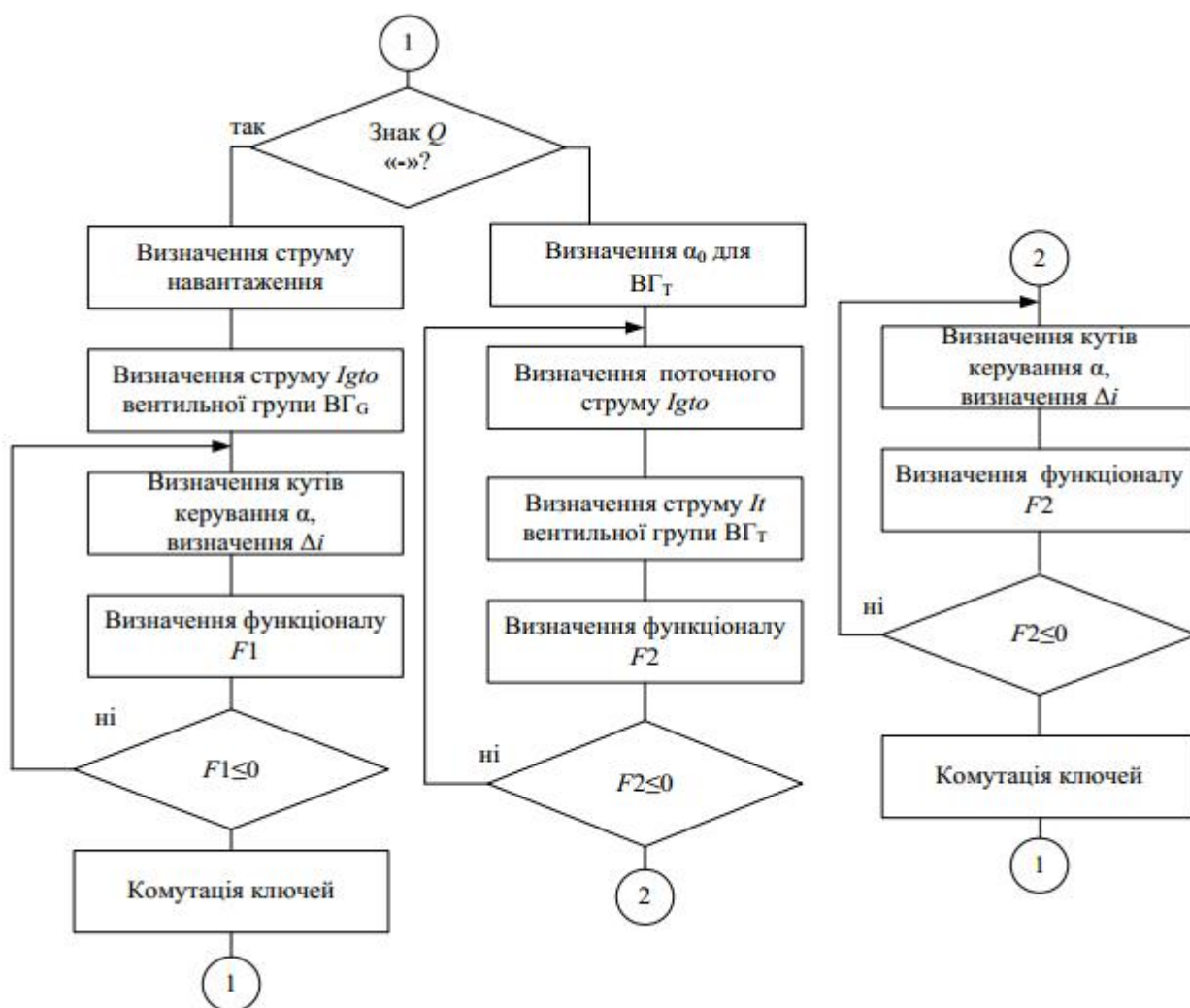


Рис. 2.19. Алгоритм керування низькочастотним каналом компенсатора при зміні знака реактивної потужності навантаження з «-» на «+»

Висновки до розділу 2

1. Запропоновано цифрову реалізацію двоконтурної системи керування двоканалним напівпровідниковим компенсатором на основі сучасних теорій потужності та теорії нечітких множин.
2. Зроблено синтез fuzzy-регулятора у складі додаткових контурів регулювання за рівнем амплітуд вищих гармонік струму мережі живлення та рівнем комутаційних перенапруг.
3. При виборі величини напруги на конденсаторі накопичувача, для забезпечення необхідного рівня амплітуди обраної вищої гармоніки струму мережі, або коефіцієнта гармонік в цілому, необхідно враховувати наявність діапазону, в якому відбувається збільшення окремо взятих гармонік струму мережі, а також умови знаходження я у допустимому діапазоні зміни рівня комутаційних перенапруг.
4. Висока якість регулювання параметрів електричної енергії мережі живлення, а також високі динамічні характеристики двоканалного компенсатора забезпечує запропонована цифрова система управління низькочастотним каналом компенсатора, що використовує сучасні теорії потужності та побудована на основі прогнозу стану системи на наступному такті.
5. Запропоновано алгоритми керування низькочастотним каналом компенсатора, орієнтовані на роботу компенсатора, у разі представлення низькочастотного каналу компенсатора двома вентиляними групами, що передбачають переведення струму з однієї вентиляної групи на іншу у разі перемикання з режиму генерації реактивної потужності в мережу живлення на режим споживання і навпаки, що підвищує к.к.д. компенсатора у режимі споживання реактивної потужності з мережі.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ І РЕЗУЛЬТАТИ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДВУХКАНАЛЬНИМ КОМПЕНСАТОРОМ

3.1. Дослідження роботи цифрової системи керування низькочастотним каналом компенсатора

3.1.1. Matlab-модель напівпровідникового компенсатора

Matlab-модель двоканального напівпровідникового компенсатора з цифровою прогновною системою керування, наведена на рис. 3.1, включає дві вентиляльні групи ВГ_Г та ВГ_Т низькочастотного каналу з активно-індуктивним навантаженням, інвертор напруги – САФ, блок цифрової обробки БЦО, ємнісний накопичувач Н з діодною групою блок розподілу імпульсів БРІ.

Структура блоку цифрової обробки системи керування p - q типу представлена на рис. 3.2. У наведеному блоці виконується перетворення напруги і струму мережі живлення з координат a, b, c в координати α, β з подальшим обчисленням активної і неактивної миттєвої потужності за формулами 1.29-1.30. Для формування сигналів керування високочастотним і низькочастотним каналам компенсатора проводиться поділ середнього $Q_{\text{ср}}$ та змінного $q_{\sim}$ значень неактивної потужності. Вихідні сигнали блоків Sum і Sum2 відповідають змінним складовим активної та неактивної потужностей, що споживаються навантаженням та низькочастотним каналом компенсатора. Зазначені сигнали разом із сигналом P_k , відповідним потужності, що надходить у ємнісний накопичувач, дозволяють розрахувати завдання за струмами інвертора напруги відповідно до співвідношення 2.9.

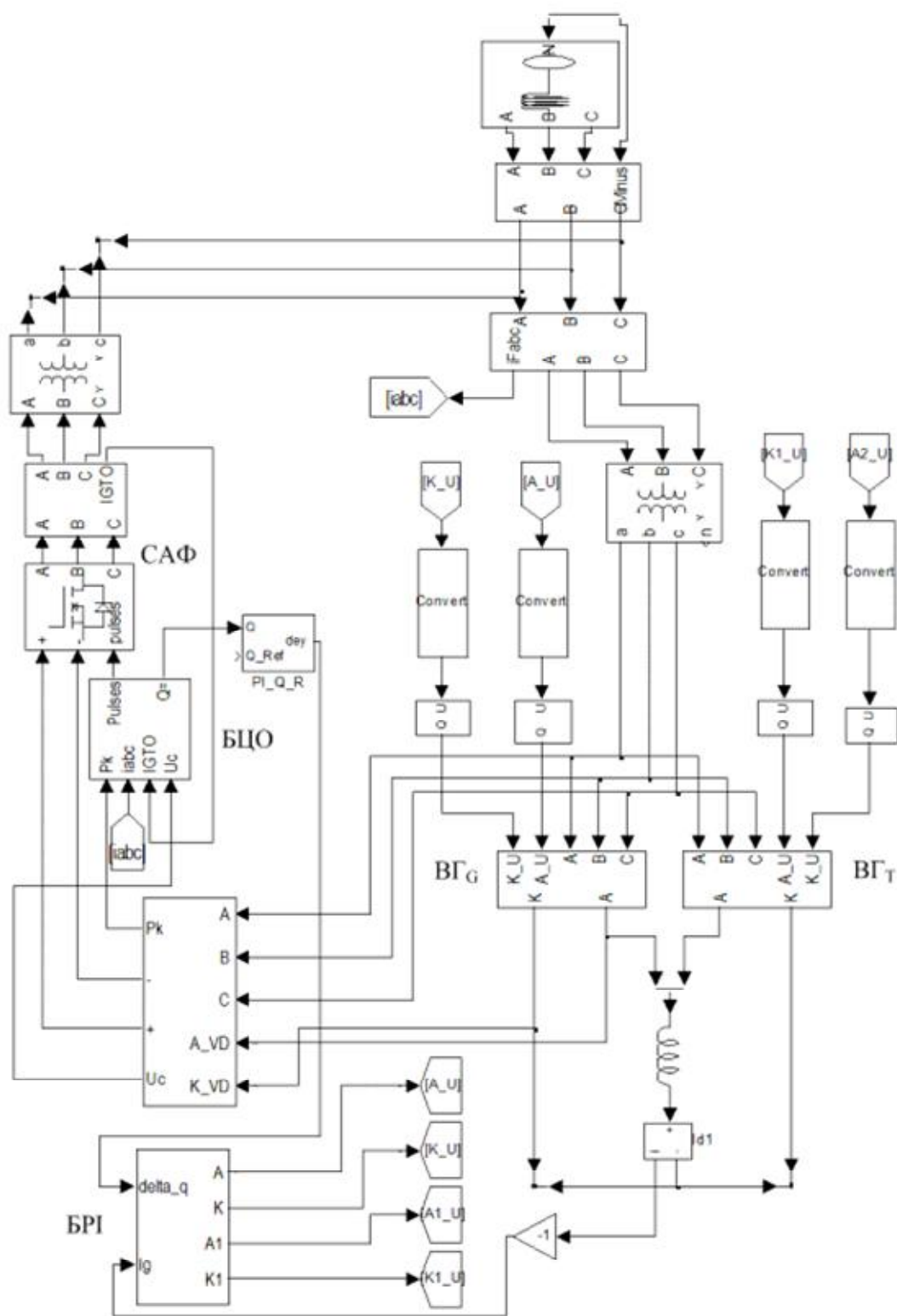


Рис. 3.1 Matlab-модель компенсатора із системою цифрового керування за прогнозом

На виході блоку цифрової обробки виробляються сигнали керування, які визначають величину завдання струмів інвертора та рівень середньої реактивної потужності, що підлягає компенсації низькочастотним каналом компенсатора.

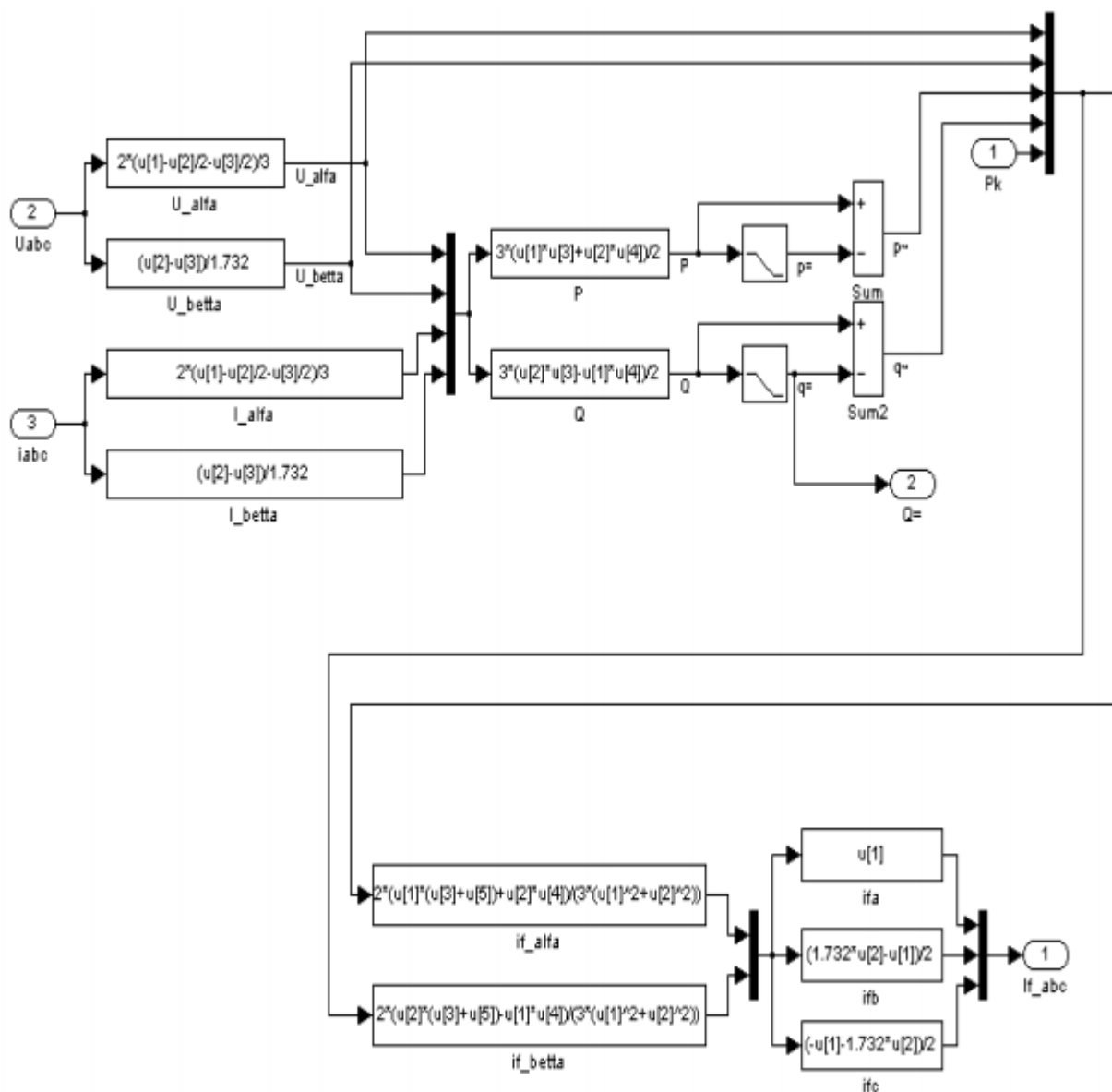


Рис. 3.2. Matlab-модель блоку цифрової обробки системи керування $p-q$ типу

На рис. 3.3 наведено структуру блоку розподілу імпульсів керування низькочастотним каналом компенсатора (БПІ).

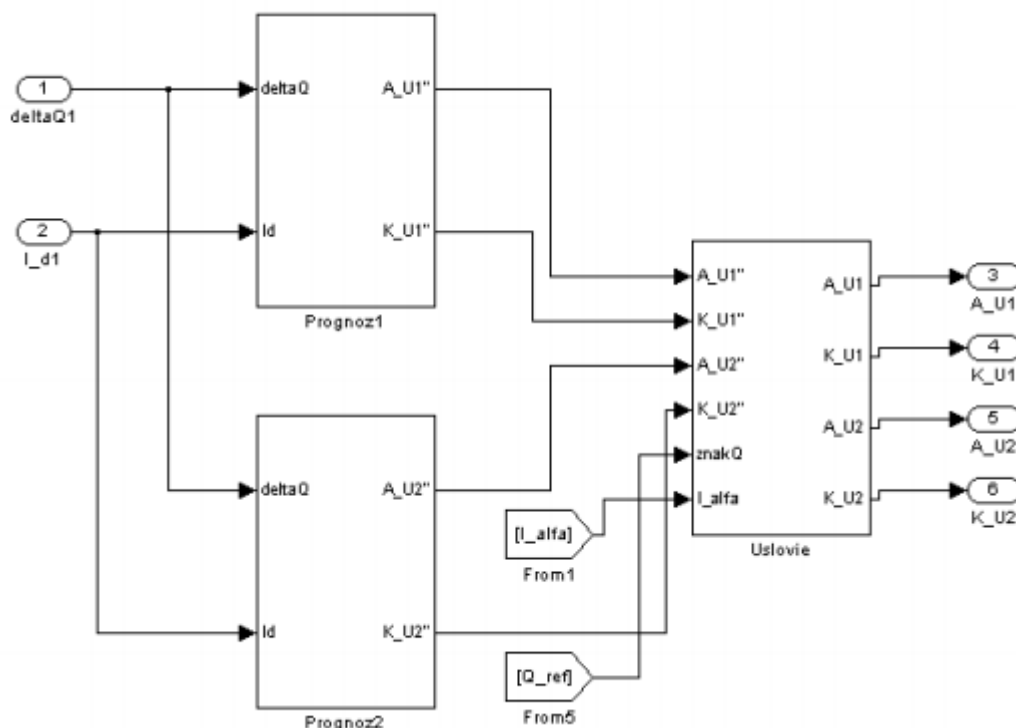


Рис. 3.3. Matlab-модель блоку розподілу імпульсів

Вихідні сигнали блоків «Prognz1» і «Prognz2» відповідають імпульсам керування силовими ключами вентильних груп на тиристорах, що замикаються, і на одноопераційних тиристорах відповідно. Ці блоки мають схожу структуру, показану на рис. 3.4, але різняться рівняннями, реалізованими у блоці «Prognoz delta», наведеному нижче. Блок безпосереднього розподілу імпульсів керування «Distribution», що входить до блоку цифрової обробки, реалізує розподіл імпульсів керування силовими ключами обох вентильних груп, згідно з алгоритмами, наведеними в розділі 2 (рис. 2.18, 2.19) що забезпечують контроль знака реактивної потужності мережі живлення та переведення струму з однієї вентильної групи на іншу у разі зміни характеру навантаження.

У моделі на рис. 3.4 виконується синхронізація системи керування з мережею живлення, формування та розподіл імпульсів управління силовими ключами. Окремим елементом показані блоки прогнозу, що обчислюється для вентильних груп на тиристорах, що замикаються, і на одноопераційних тиристорах, структури яких наведені на малюнках 3.6 і 3.7 відповідно.

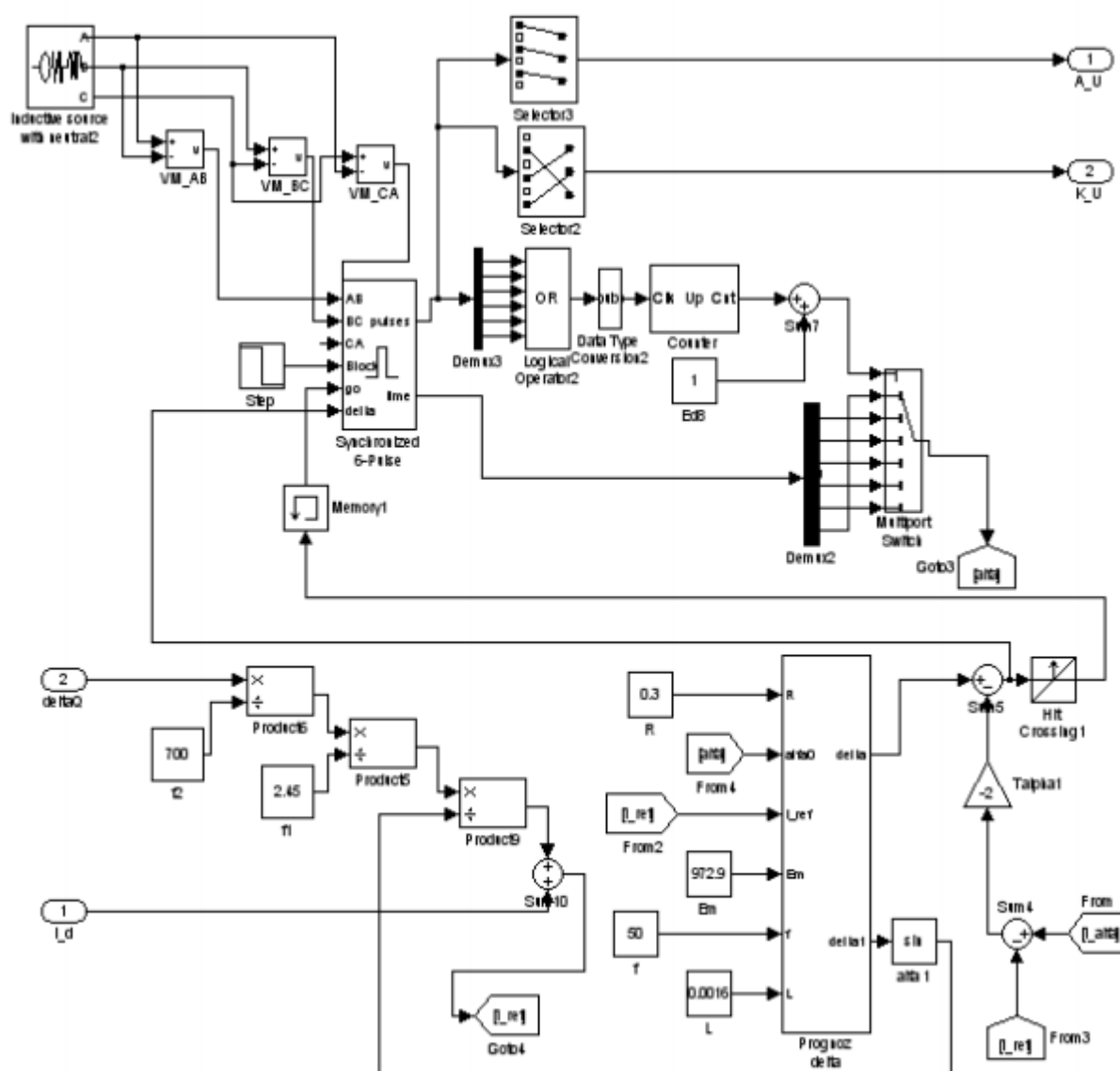


Рис 3.4 Matlab-модель блоків «Prognoz1» і «Prognoz2»

Блок прогнозу, що обчислюється, реалізує розрахункові співвідношення, наведені в розділі 2 з урахуванням масштабних коефіцієнтів. Вихідним сигналом блоків прогнозу «Prognoz delta» як для моста на тиристорах, що замикаються так і для вентильної групи на одноопераційних тиристорах є величина збільшення струму delta для вентильної групи на GTO тиристорах і вентильної групи на одноопераційних тиристорах.

Структура блоку «Distribution» наведена рис. 3.5.

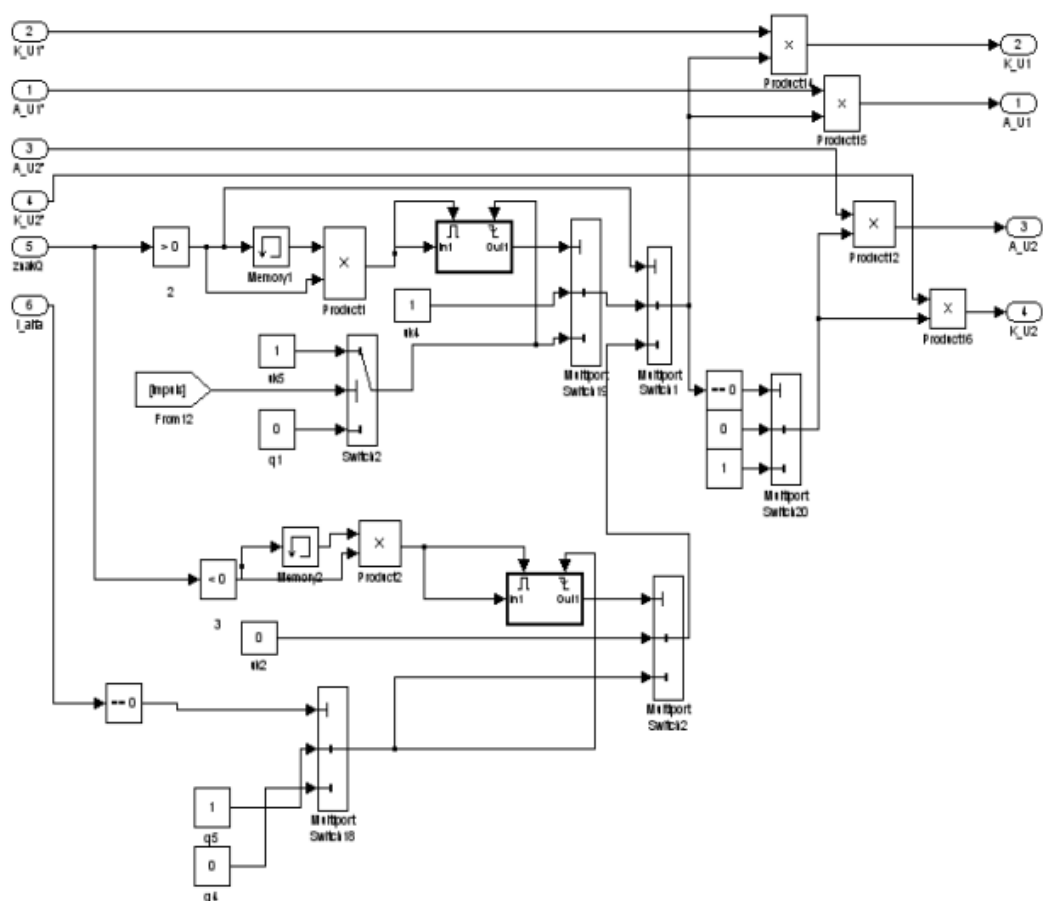


Рис 3.5 Matlab-модель блока "Distribution" (БПИ)

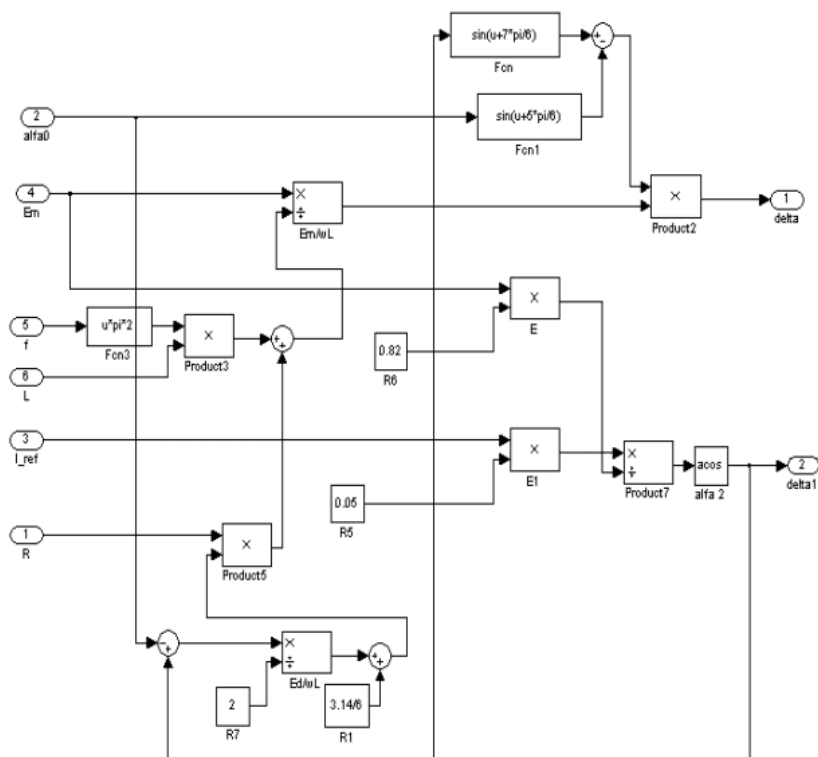


Рис. 3.6 Matlab-модель блока «Prognoz delta» для вентиляной группы на ГТО тиристорах

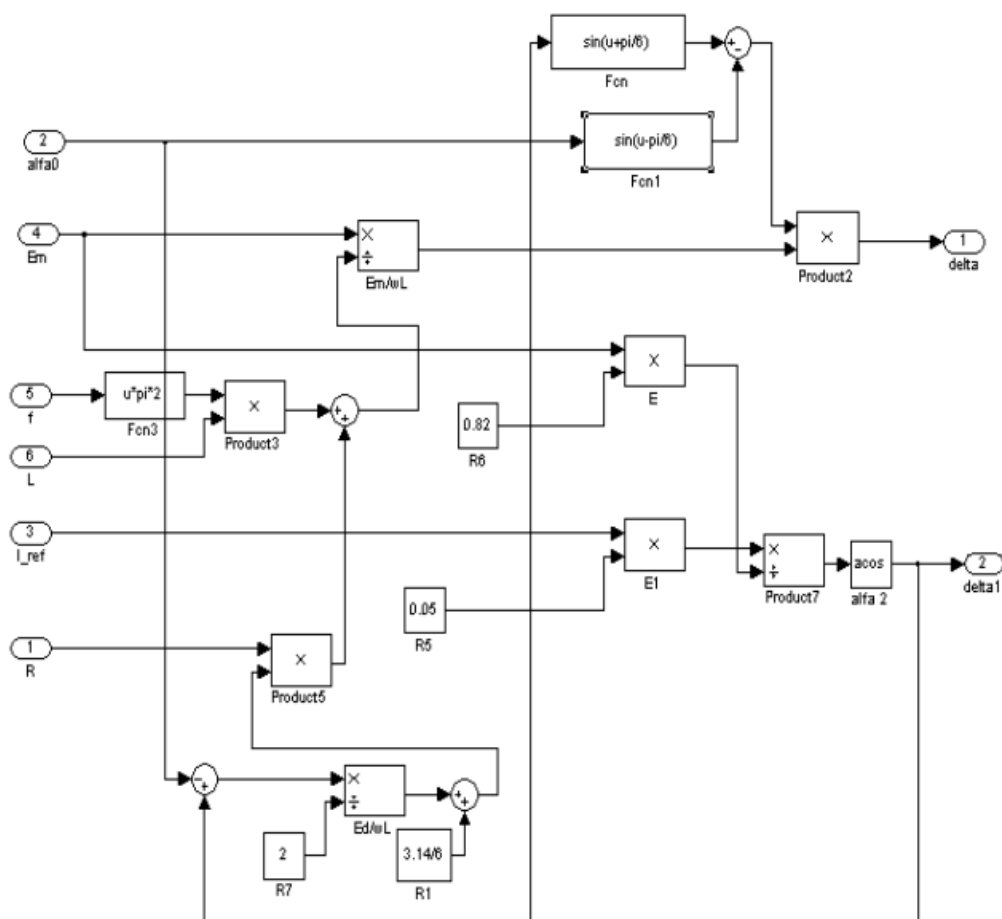


Рис. 3.7 Matlab-модель блоку «Prognoz delta» для вентильної групи на одноопераційних тиристорах

За допомогою математичної моделі зроблено такі розрахунки режимів роботи двоканального напівпровідникового компенсатора:

– досліджено зміну коефіцієнта потужності в точці підключення компенсатора і навантаження до мережі живлення, при включенні напівпровідникового двоканального компенсатора в мережу живлення;

– здійснено розрахунки активної та реактивної потужностей у точці підключення навантаження і напівпровідникового компенсатора до мережі живлення при включенні двоканального компенсатора в мережу живлення;

– досліджено роботу цифрової прогностичної системи керування низькочастотним каналом компенсатора, а саме здійснено розрахунок перехідних процесів у точці підключення компенсатора та навантаження до мережі живлення, при зміні знака реактивної потужності навантаження;

– досліджено перехідні процеси при зміні середньої реактивної потужності в мережі живлення.

Результати моделювання. Наведена вище Matlab-модель двоканального напівпровідникового компенсатора із цифровою прогновною системою керування реалізована і апробована в статичних і динамічних режимах у додатку Simulink інтерактивного середовища Matlab версії 7.0.1.

При включенні двоканального напівпровідникового компенсатора в мережу живлення з активно-індуктивним навантаженням, відбулося значне збільшення коефіцієнта потужності, в точці підключення компенсатора і навантаження до мережі, і підтримання його на рівні 0,99 (рис. 3.8). Момент увімкнення напівпровідникового компенсатора відзначений на діаграмах тимчасовою міткою t_{on} . На малюнку також показаний струм реактора I_r працюючої в даному випадку вентильної групи ВГ_G.

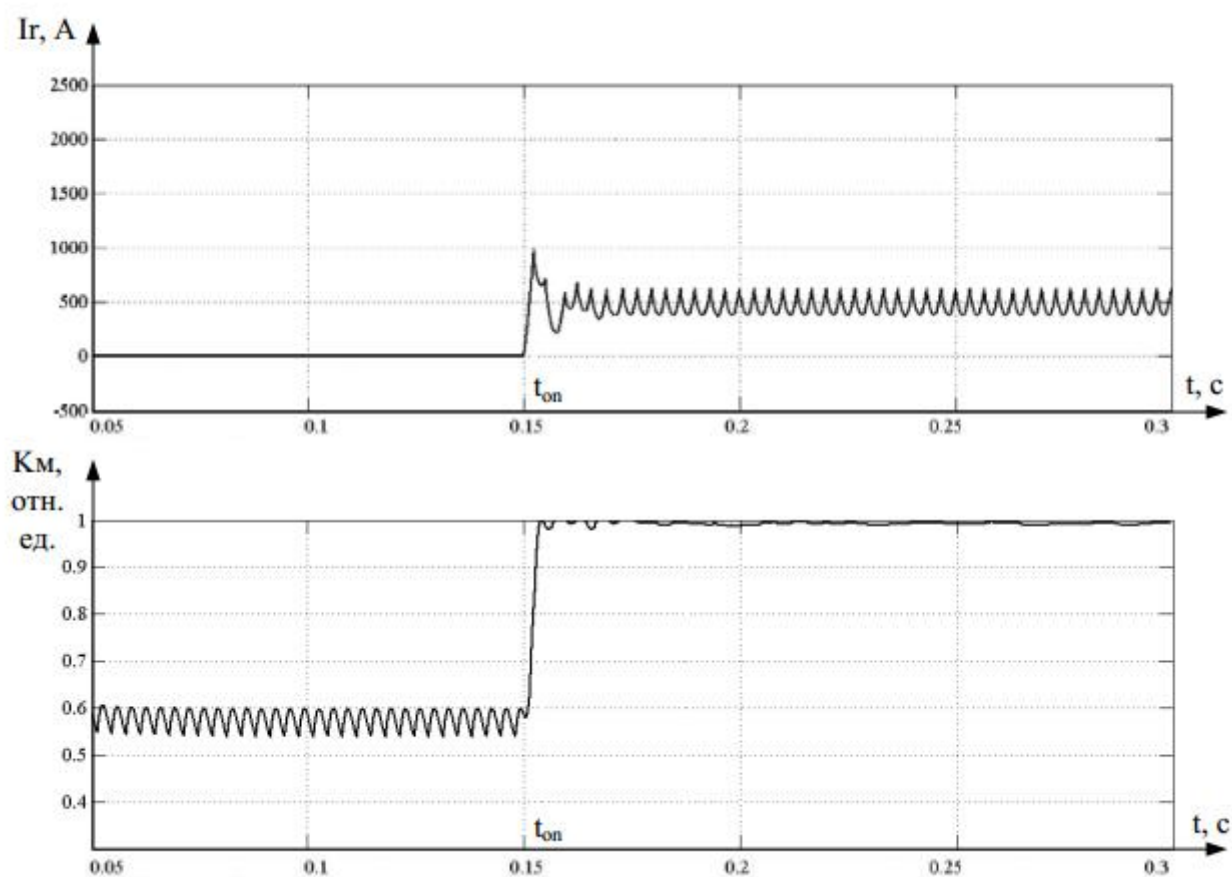


Рис. 3.8 Струм реактора I_r вентильної групи ВГ_G та зміна коефіцієнта потужності k_m у момент включення компенсатора в мережу

На рис. 3.9 показані діаграми активної та реактивної потужності в момент підключення двоканального напівпровідникового компенсатора до мережі, що працює в режимі компенсації реактивної потужності.

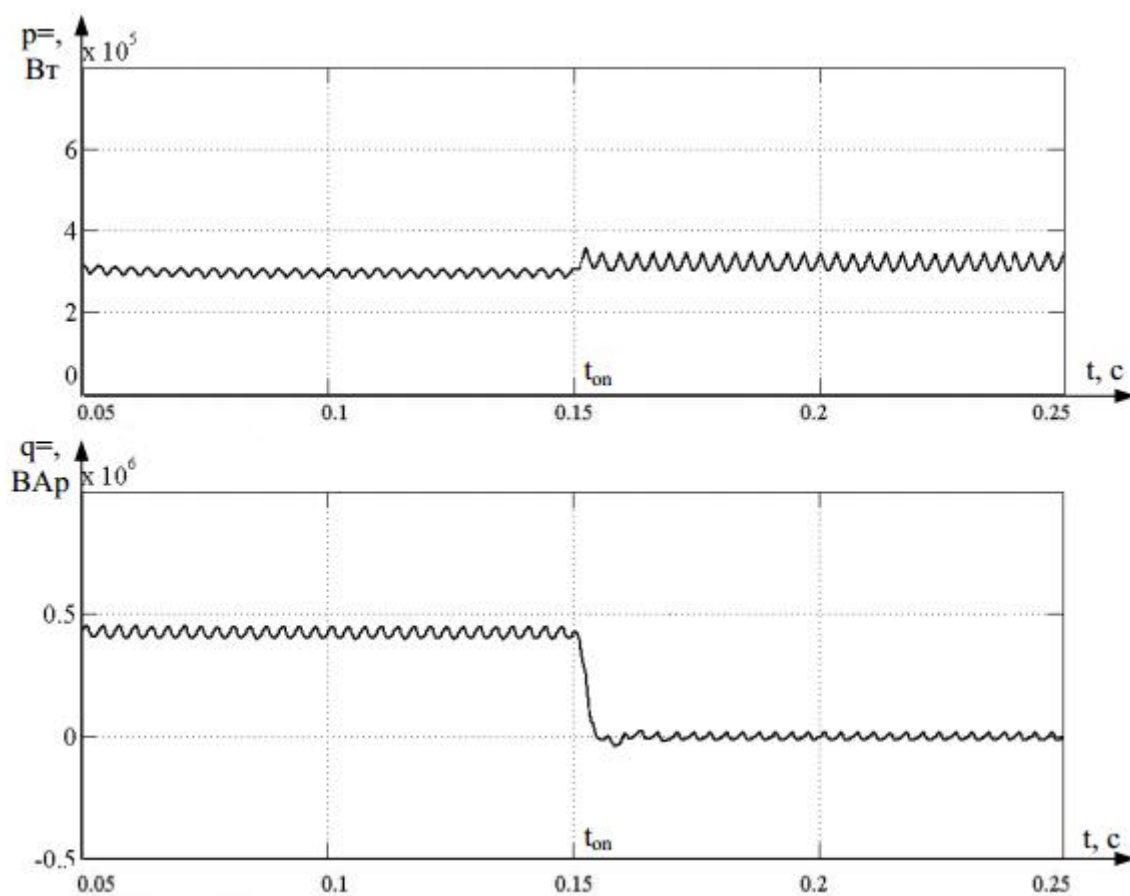


Рис. 3.9 Діаграми активної та реактивної потужностей у точці підключення компенсатора до мережі

Експерименти підтвердили ефективність запропонованого алгоритму керування напівпровідниковим компенсатором стосовно управління вентиляною групою на GTO тиристорах, що працює в режимі компенсації реактивної потужності.

На рис. 3.10 показано роботу напівпровідникового компенсатора в режимі генерації реактивної потужності, тобто під час роботи вентиляної групи ВГ_Т, при зміні умов роботи навантаження, а саме, при зміні середнього значення неактивної потужності мережі живлення в момент часу t_1 . Діаграми на рис. 3.10 відповідають змінам активної $P=$ та реактивної $Q=$ потужності у точці

підключення компенсатора та навантаження до мережі. Перехідний процес має аперіодичний характер. Тривалість перехідного процесу при зміні середнього значення неактивної потужності мережі живлення не перевищує трьох інтервалів провідності ключів низькочастотного каналу. При дослідженні алгоритму розробленого у другому розділі переведення струму з вентиляльної групи на GTO тиристорах на вентиляну групу на одноопераційних тиристорах, тобто, у разі перемикання з режиму генерації реактивної потужності в мережу живлення на режим споживання її з мережі, результати, наведені нижче, підтвердили ефективність запропонованого алгоритму керування низькочастотним каналом компенсатора неактивних складових повної потужності.

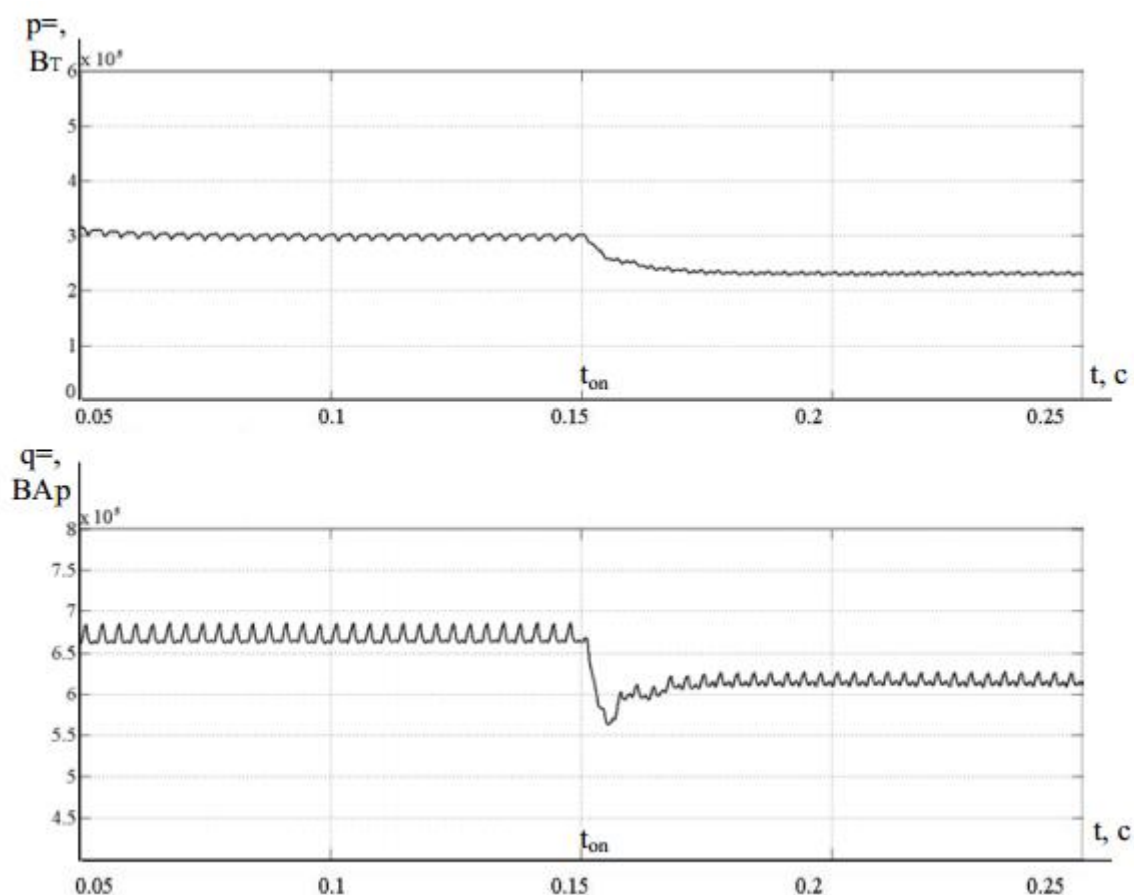


Рис. 3.10 Перехідні процеси при зменшенні середньої реактивної потужності в мережі живлення

На рис. 3.11 показаний струм реактора випрямляча компенсатора I_r , а також поточне середнє значення реактивної потужності Q_T у точці підключення джерела

реактивної потужності та компенсатора до мережі при зміні знака заданого значення реактивної потужності Q_z з негативного на позитивний, тобто при переході з $ВГ_G$ на $ВГ_T$ (за умови, що струм завдання для вентильної групи $ВГ_T$ став менше струму завдання для вентильної групи $ВГ_G$).

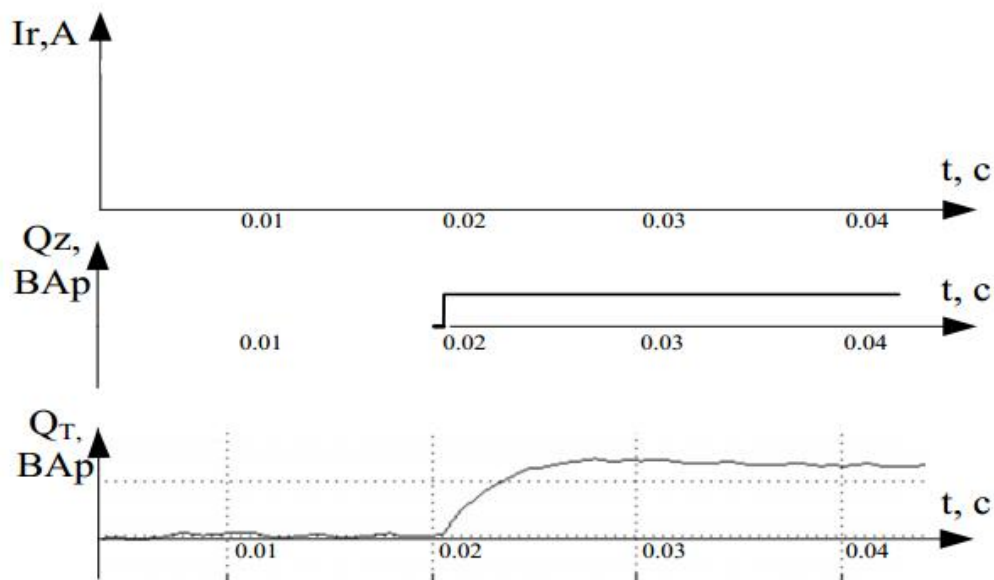


Рис. 3.11. Перехідні процеси при зміні знака реактивної потужності навантаження
з - на +

При зміні знака заданого значення реактивної потужності Q_z з додатного на від'ємний, тобто при перемиканні з режиму споживання реактивної потужності з мережі в режим генерації, запропонований алгоритм управління забезпечує переведення струму з вентильної групи $ВГ_T$ на $ВГ_G$ (перехідний процес в даному випадку відображений на рис. 3.12).

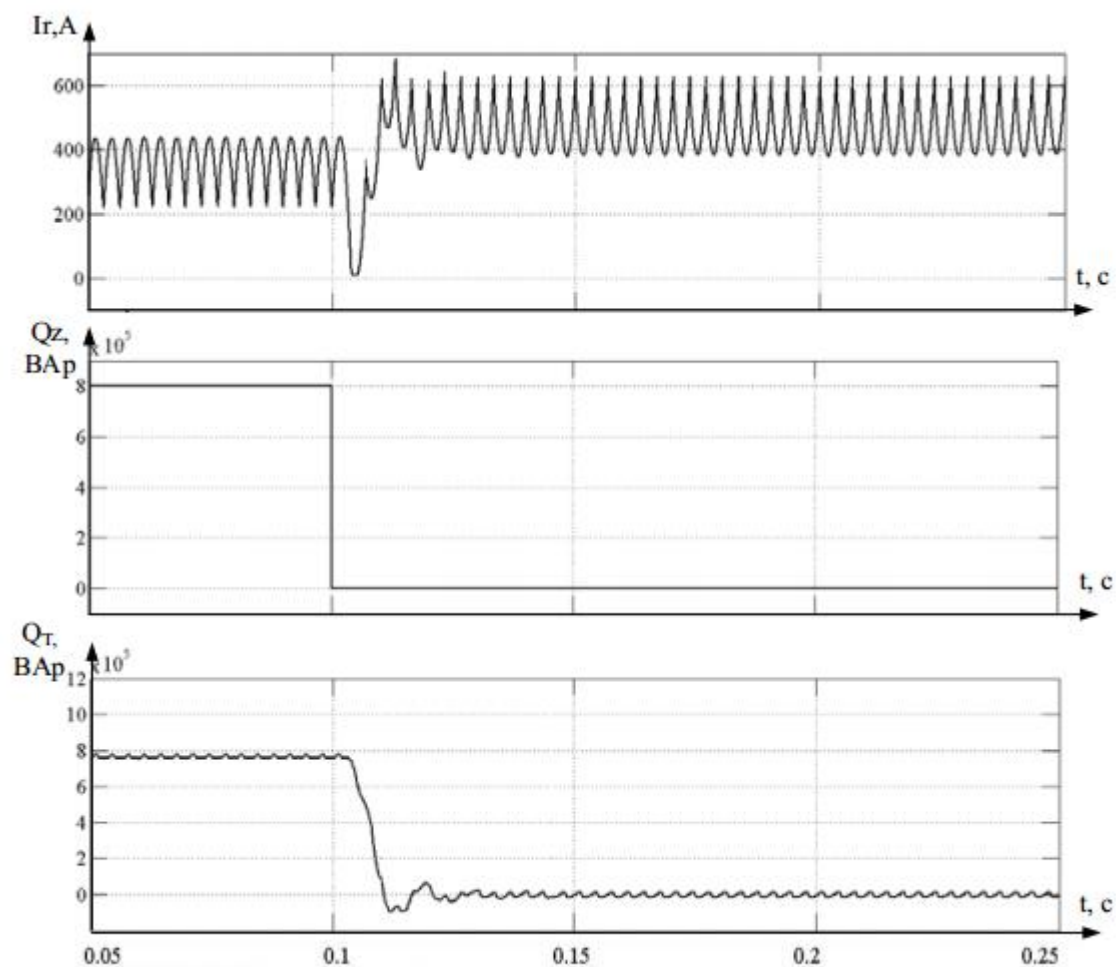


Рис. 3.12. Перехідні процеси при зміні знака реактивної потужності навантаження з + на –

На наведених осцилограмах відпрацювання заданого збільшення струму відбувається за кілька тактів роботи низькочастотного каналу.

Застосування запропонованого алгоритму керування двоканальним компенсатором, а також системи керування за прогнозом, призводить до поліпшення динамічних характеристик компенсатора, при зміні заданої величини реактивної потужності в мережі живлення і при змінах реактивної потужності, що споживається або генерується навантаженням.

3.2. Дослідження роботи двоконтурної системи керування компенсатором

На рис. 3.13 представлена MATLAB модель напівпровідникового компенсатора, підключеного до мережі живлення паралельно нелінійному навантаженню, створена і апробована в пакеті MATLAB 7.0 з додатковим контуром нечіткого регулювання за рівнем вищих гармонік струму мережі живлення.

Модель, крім описаних вище блоків, включає контур регулювання рівнем амплітуди окремо обраної гармоніки струму мережі живлення. Зазначений контур керує рівнем напруги на ємнісному накопичувачі компенсатора за допомогою нечіткого Fuzzy-контролера. На перший вхід нечіткого контролера надходить сигнал датчика напруги на конденсаторі накопичувача. На другий вхід контролера надходить сигнал, що відповідає поточному рівню амплітуди обраної гармоніки струму мережі живлення (в даному випадку сьомої гармоніки), отриманий за допомогою блоку вимірювача амплітуд і віднесений до значення рівня амплітуди першої гармоніки мережі живлення або поточному рівню коефіцієнта гармонік струму мережі живлення. Вихідний сигнал регулятора, утворений за допомогою процедури нечіткого висновку, описаної в підрозділі 2.2 другого розділу, визначає необхідний рівень напруги на конденсаторі накопичувача для забезпечення необхідного рівня амплітуди обраної гармоніки мережі живлення, або коефіцієнта гармонік в цілому.

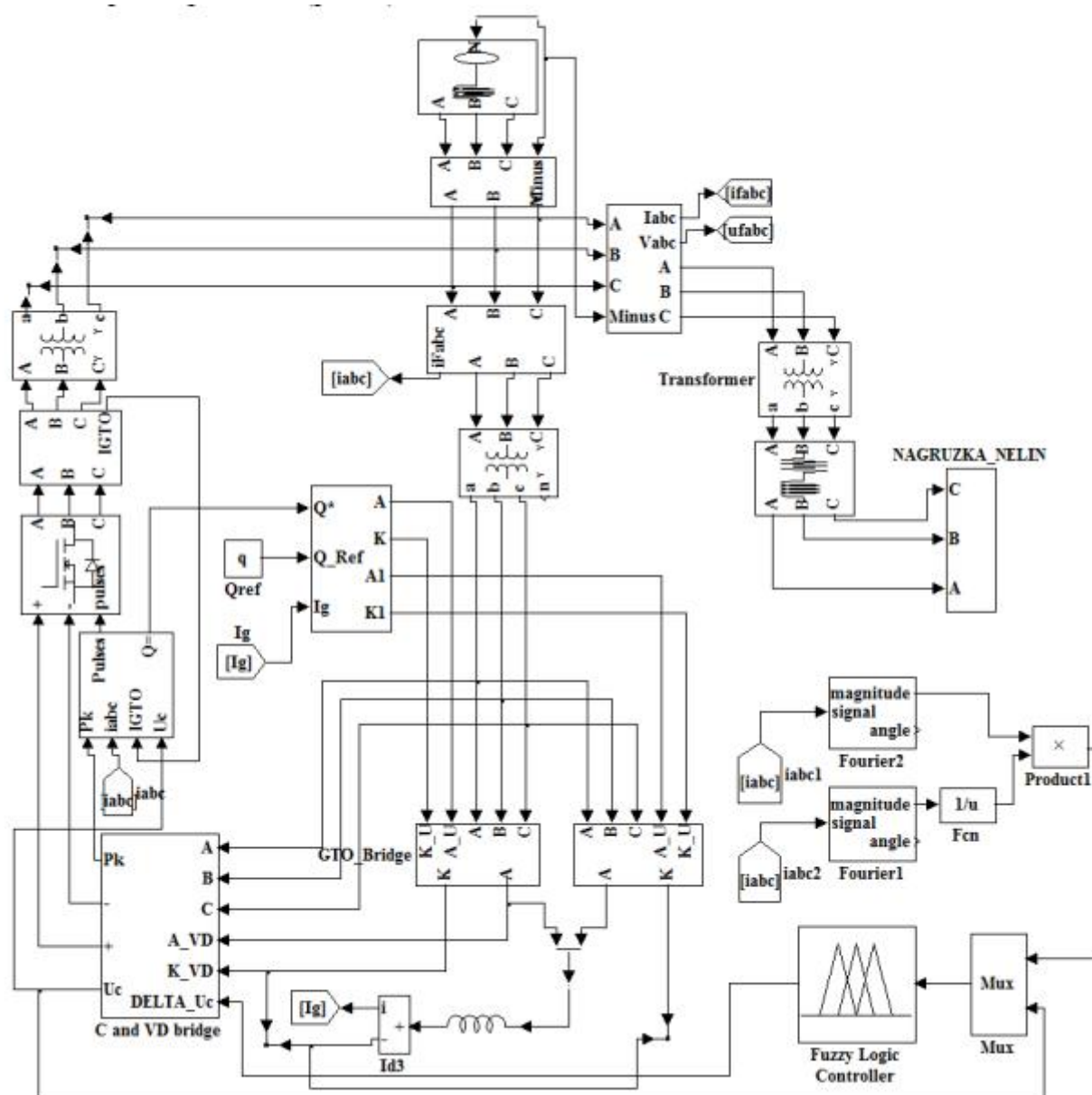


Рис. 3.13. MATLAB модель компенсатора з контуром нечіткого регулювання вищих гармонік струму

На рис. 3.14 наведені 5-а, 7-а і 11-а гармоніки струму, що генеруються формувачем в мережу живлення, без підключення компенсатора (до моменту часу t_1) і з підключенням компенсатора (після моменту часу t_1).

При підключенні компенсатора амплітуда 5-ої гармоніки знизилася на 60%, 7-ї та 11-ої - на 50%. Коефіцієнт гармонік струму мережі живлення знизився і підтримується на рівні 0,15.

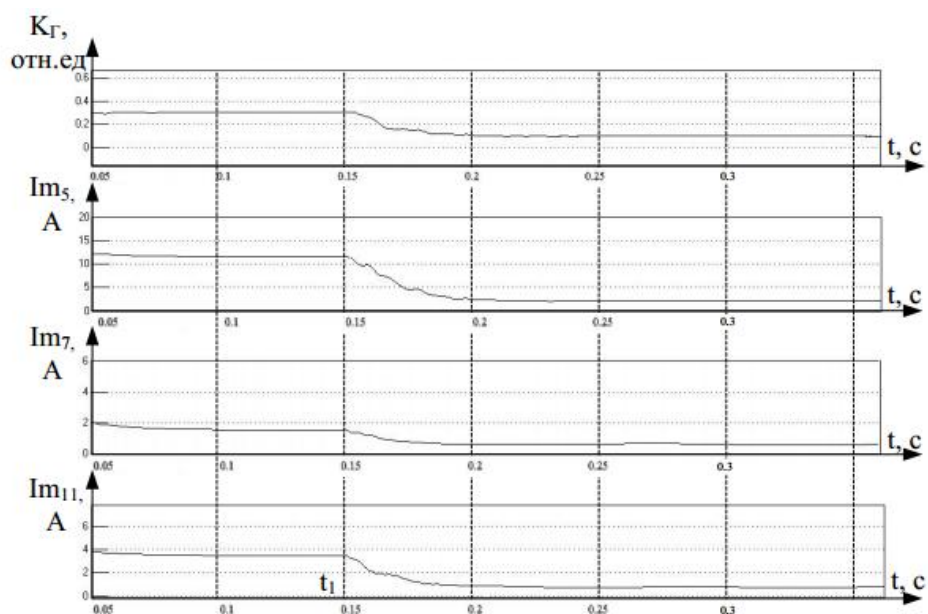


Рис. 3.14. Керування рівнями амплітуд вищих гармонік струму мережі живлення

На рис. 3.15, *а* наведено діаграму зміни напруги на конденсаторі інвертора, діаграма на рис. 3.15, *б* відповідає зміні амплітуди сьомої гармоніки струму мережі живлення. Управління рівнем амплітуди окремо взятої сьомої гармоніки струму мережі живлення, а так само приведення її до встановленого рівня, в даному випадку це 5%, відбувається при зміні напруги на конденсаторі інвертора за рахунок керуючих сигналів на виході додаткового контуру регулювання.

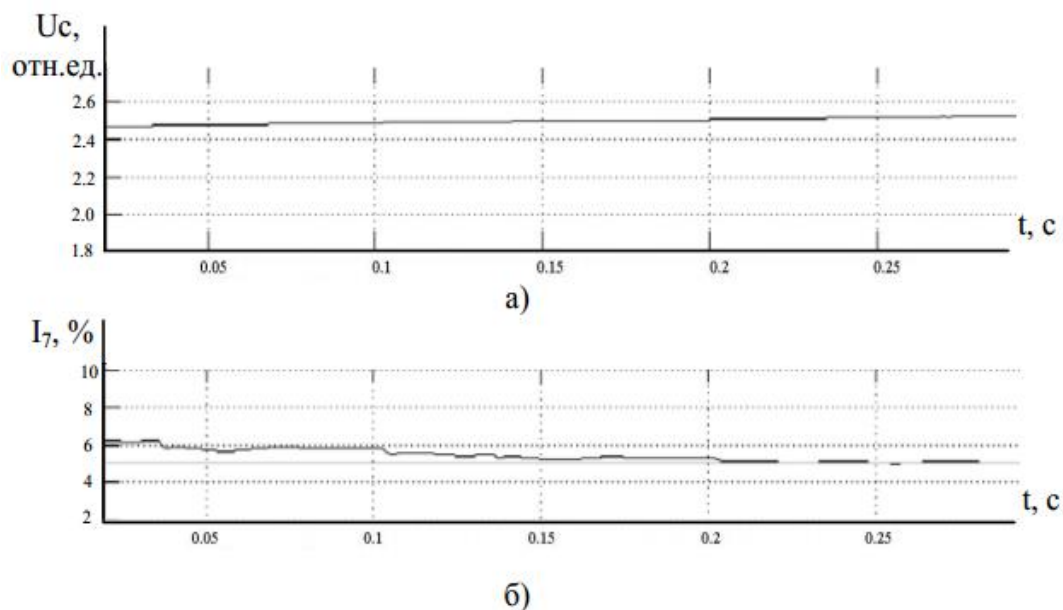


Рис. 3.15. Керування рівнем амплітуди сьомої гармоніки струму мережі живлення

струму мережі живлення від відносної напруги на конденсаторі накопичувача U_C^* , яка визначається як відношення величини напруги на конденсаторі до амплітуди лінійної напруги на вторинній обмотці трансформатора живлення випрямного блоку.

Отримані за допомогою моделювання графічні залежності (рис. 3.17), а також їх аналіз, підтверджують зроблені теоретичні висновки розділу 2 про наявність діапазону, при якому не доцільно подальше підвищення значення напруги на конденсаторі накопичувача U_C метою зменшення величин окремих гармонік струму мережі живлення, через перевищення встановленої межі комутаційних перенапруг $U_{p\max}$, що необхідно враховувати при налаштуванні параметрів нечіткого контролера.

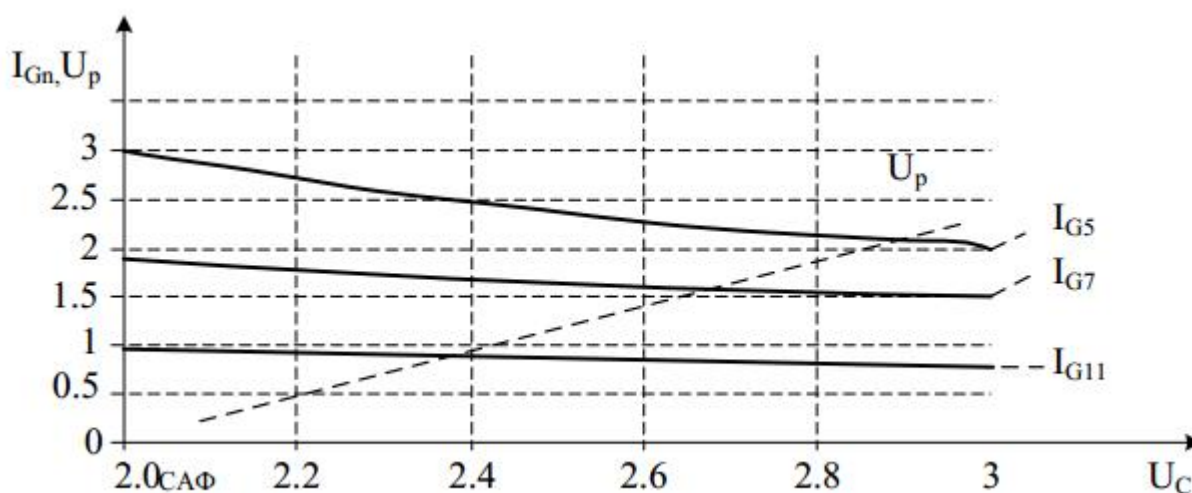


Рис. 3.17. Залежність амплітуд вищих гармонік мережевого струму та рівня комутаційних перенапруг від напруги на конденсаторі накопичувача

Запропонована система керування напівпровідниковим компенсатором з додатковим контуром нечіткого регулювання за рівнем комутаційних перенапруг дає можливість у процесі компенсації реактивної потужності зменшити генерування в мережу вищих гармонік струму в 3-5 разів, не перевищуючи при цьому встановлений рівень комутаційних перенапруг, що дорівнює 0.1 від амплітуд значення лінійної напруги на вторинній обмотці трансформатора випрямляча.

Результати моделювання підтвердили доцільність використання двоканального напівпровідникового компенсатора з додатковим контуром нечіткого регулювання при вирішенні завдань поліпшення електромагнітної сумісності нелінійних навантажень з мережею живлення, поліпшення якості споживаної електроенергії, зменшення втрат і збільшення надійності роботи перетворювача.

Застосування додаткового контуру регулювання рівня окремої гармоніки дає можливість адаптації запропонованої цифрової системи керування в змінних умовах енергосистеми.

3.3. Методика вибору параметрів цифрового fuzzy-регулятора

Важливим завданням є налаштування параметрів нечіткого регулятора, від яких залежить вихідний керуючий сигнал. Параметричний синтез fuzzy-регулятора пропонується здійснювати шляхом оптимізації діапазонів зміни вхідних та вихідного параметрів НР, а також параметрів функцій належності нечітких термів, за допомогою яких оцінюються входи та вихід НР. Шляхом математичного моделювання замкнутої системи автоматичного керування з цифровим нечітким регулятором при певних вхідних впливах необхідно визначити такі значення параметрів fuzzy-регулятора, які дозволять забезпечити необхідну якість регулювання контрольованих параметрів об'єкта.

Для вибору оптимальних параметрів налаштування цифрового НР запропоновано використовувати математичні методи оптимізації цільових функцій. При оптимізації параметрів цифрового нечіткого регулятора в даній системі автоматичного керування слід визначити параметри, що варіюються, а також цільову функцію, в якості якої виступає контрольований параметр об'єкта. Оптимальні параметри відповідають мінімальному значенню цільової функції, а мінімізація цільової функції автоматично призводить до оптимізації перехідних процесів у системі керування.

Таким чином, як цільова функція виступає контрольований параметр – амплітуда обраної гармоніки струму мережі живлення k_i , за величиною якого також можна зробити висновок про ефективність використання fuzzy-регулятора, а в якості параметрів, що варіюються, задані граничні значення діапазону зміни вхідного параметра fuzzy-регулятора – напруги на конденсаторі накопичувача ФКП U_{cmin} та U_{cmax} , а також граничні значення діапазону зміни вихідного параметра – керуючого сигналу δU_{cmin} та δU_{cmax} .

На параметри, що варіюються, накладаються обмеження, формуючи так звані штрафні функції:

$$a < U_{cmin} < b, \quad c < U_{cmax} < d,$$

$$a1 < \delta U_{cmin} < b1, \quad c1 < \delta U_{cmax} < d1,$$

причому $a, a1, \dots, d, d1$ задаються користувачем, виходячи з знань про можливі діапазони зміни значень змінних, що використовуються, а цільову функцію необхідно мінімізувати в процесі моделювання $k_i = k_{imin}$. Виходячи з отриманих раніше знань про об'єкт регулювання, напруга на конденсаторі накопичувача обмежена знизу умовою комутації GTO тиристорів і дорівнює 1.05 від амплітудного значення лінійної напруги на вторинній обмотці трансформатора випрямляча. Верхня межа напруги на конденсаторі накопичувача, що вибирається з умови забезпечення допустимого значення коефіцієнта гармонік струму мережі живлення, дорівнює подвоєному амплітудному значенню лінійної напруги на вторинній обмотці трансформатора випрямляча.

Варіювання параметрів fuzzy-регулятора та обчислення цільової функції відбувається у єдиному процесі моделювання. Цільову функцію не визначено, якщо хоча б одне з цих обмежень буде порушено. Для вирішення завдань оптимізації налаштувальних параметрів регулятора доцільно застосування методів, що дозволяють ефективно вирішувати оптимізаційні завдання, в яких функції обмежень і цільова функція обчислюються в єдиному обчислювальному процесі і мають обмежені області визначення простору параметрів, що варіюються.

Перспективним є підхід, що зводить систему параметричних та критеріальних обмежень до векторної цільової функції та полягає в оптимізації цієї функції модифікованими методами оптимізації векторних цільових функцій. При цьому доцільно використовувати лабораторію моделей та методів оптимізації систем автоматичного керування в пакеті MATLAB та його розширення – пакет імітаційного моделювання Simulink.

Постановка задачі векторної оптимізації параметрів регулятора полягає у формуванні векторної функції $F(x)$ із двома проекціями:

$F_1(x)$ – кількість виконаних обмежень,

$F_2(x)$ – векторна функція наступного загального вигляду:

$$F_2(x) = (F_1(x), F_{i+1}(x), \dots, F_M(x)),$$

де $x \in R^n$, n – число параметрів, що варіюються, m – розмірність векторної функції. Векторна функція $F_2(x)$ складається з $m-1$ штрафних функцій та останнього критерію – цільової функції. Для ефективного застосування цієї векторної функції кожна її складова повинна бути визначена у всьому просторі параметрів, що варіюються, в іншому випадку її необхідно довизначити деякою функцією штрафу. Кожну проекцію цієї функції необхідно мінімізувати з урахуванням пріоритету проекцій.

Пошук оптимальних параметрів регулятора виконується відповідно до алгоритму, наведеному на рис. 3.18 і заснований на використанні методу деформованого багатогранника Нелдера-Міда в блоці обчислення поточних значень параметрів параметрів нечіткого регулятора.

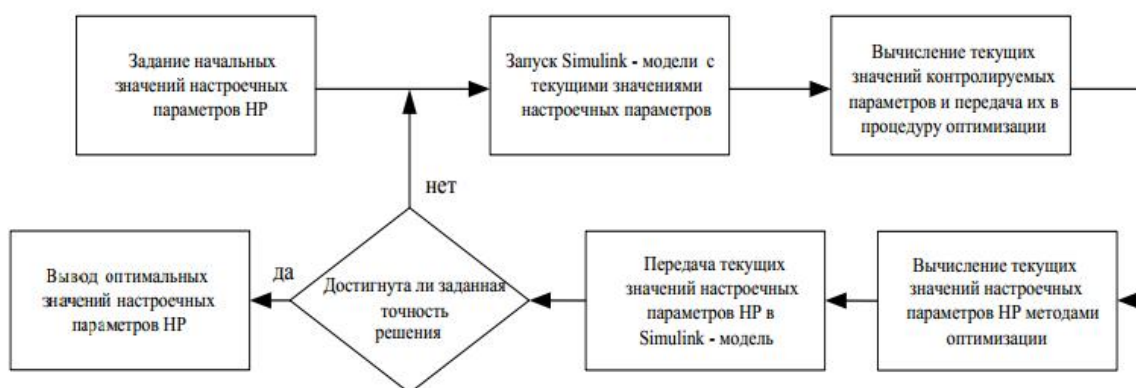


Рис. 3.18. Алгоритм оптимізації настроювальних параметрів регулятора

У результаті вирішення поставленої задачі параметричного синтезу НР за допомогою векторних методів оптимізації цільових функцій були отримані оптимальні параметри НР, наведені в таблиці 3.1. У процесі моделювання автоматизованої системи керування компенсатором неактивних складових повної потужності, при отриманих оптимальних налаштуваннях fuzzy-регулятора відбувається встановлення напруги на конденсаторі інвертора на рівні, при якому амплітуда сьомої гармоніки струму мережі живлення I_{m7} не перевищує 5% від рівня амплітуди першої гармоніки I_{m1} .

Таблиця 3.1. Оптимальні параметри регулятора

Оптимізаційний параметр	U_{cmin} $x1$	U_{cmax} $x2$	δU_{cmin} $x1 * 0.001$	δU_{cmax} $x2 * 0.001$
значення, відн. од.	1900	3100	1,9	3,1

Рис. 3.19 і 3.20 ілюструють хід процесу оптимізації значень параметрів, що варіюються, на площині і в просторі відповідно.

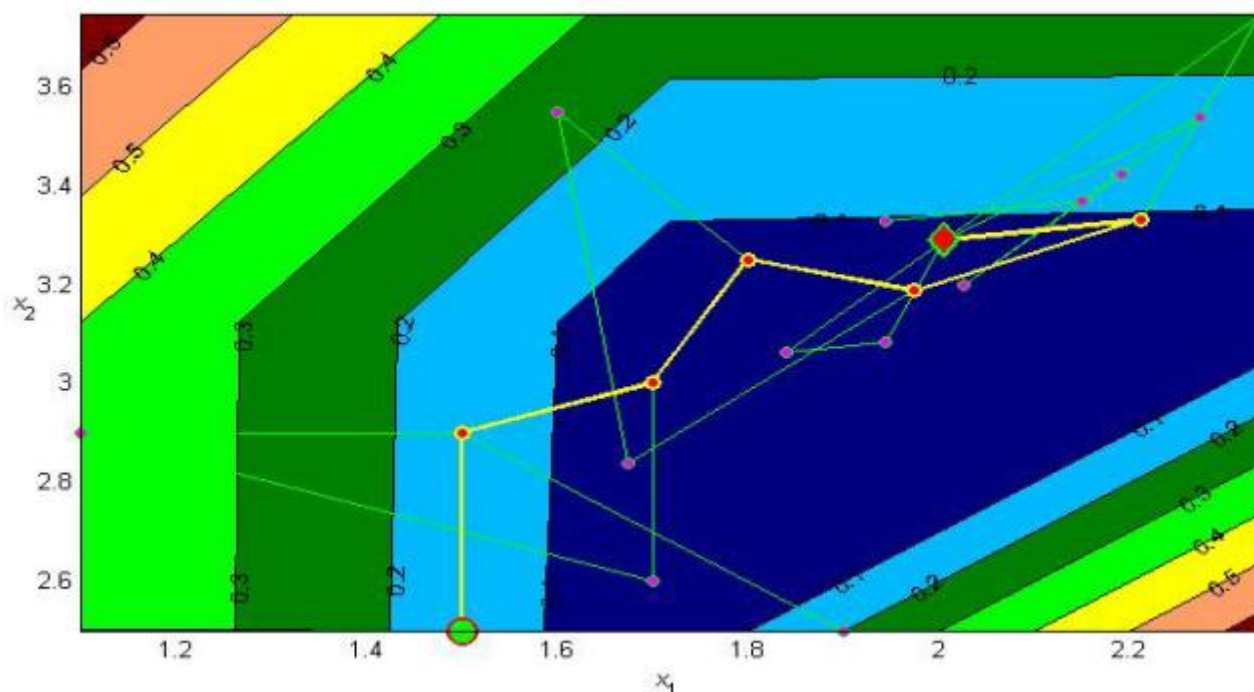


Рис. 3.19. Залежність ступеня порушення не виконаного обмеження в порядку пріоритету від параметрів, що варіюються, на площині

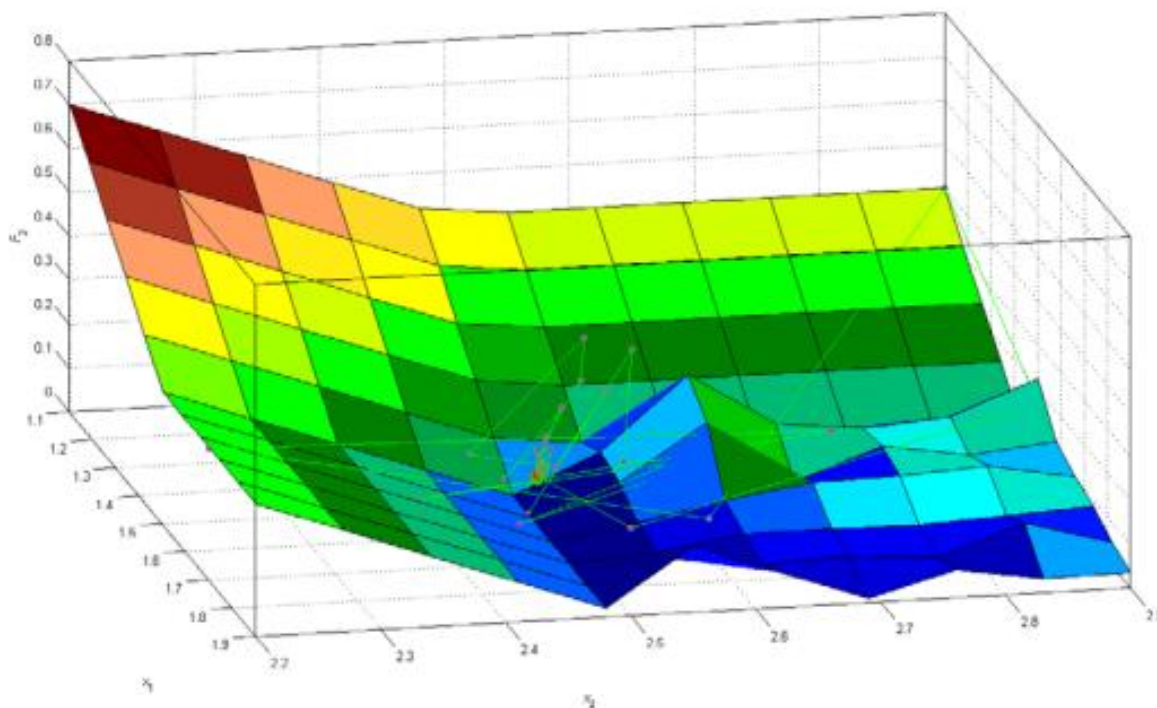


Рис. 3.20. Залежність ступеня порушення не виконаного обмеження у порядку пріоритету від змінних параметрів у просторі

У таблиці 3.2 значення x_1 і x_2 відповідають граничним значенням діапазону зміни вхідних параметрів fuzzy регулятора, $F1$ – кількість виконаних обмежень у порядку пріоритету, $F2$ – цільова функція, або ступінь порушення не виконаного обмеження в порядку пріоритету, H – крок методу, Ni – номер ітерації, Nf – кількість обчислень цільової функції, Nb – кількість кращих точок пошуку.

Таблиця 3.2. Хід процесу оптимізації

Ni	Nb	Nf	H	$F1$	$F2$	x_1	x_2	Дія
0	1	1	0,4	2	0,0564	1,5	2,5	початок
0	1	2	0,4	1	0,2	1,9	2,5	поч. багатогр.
0	2	3	0,4	2	0,0336	1,5	2,9	поч. багатогр.
1	2	4	0,4	0	0,4	1,1	2,9	відображення
1	2	5	0,4	2	0,0378	1,7	2,6	стискання
2	3	6	0,4	2	0,0298	1,7	3	відображення
2	4	7	0,4	2	0,0297	1,8	3,25	розтягування
3	4	8	0,65	0	0,05	1,6	3,55	відображення
3	4	9	0,65	2	0,0326	1,675	2,8375	стискання
4	5	10	0,415	2	0,0285	1,975	3,1875	відображення
4	5	10	0,415	2	0,0285	1,975	3,1875	кінець

Таким чином, модифіковані методи оптимізації векторних цільових функцій дозволяють вирішити завдання параметричного синтезу fuzzy-регулятора і знаходження оптимальних параметрів налаштування fuzzy-регулятора, при яких можливе забезпечення ефективного управління як рівнем амплітуд окремо взятих гармонік струму живильної мережі, так і коефіцієнта гармонік в цілому.

3.4. Поліпшення енергетичних характеристик компенсатора неактивних складових повної потужності

На підставі проведеного аналізу енергетичних показників формувача, методів регулювання показників якості з використанням неактивних складових повної потужності, запропоновано використовувати багатофункціональний компенсатор неактивних складових повної потужності (фільтрокомпенсуючий пристрій), призначений для придушення (фільтрації) вищих гармонік струму, що генерується формувачем в мережу живлення складової основної гармоніки мережевого струму.

Подібний компенсатор може бути побудований за схемою з одним каналом компенсації неактивних складових повної потужності, який є інвертором напруги, що виконує функції силового активного фільтра, однак, з метою мінімізації втрат потужності та забезпечення оптимальних умов роботи силового обладнання за умови підтримки на заданому рівні параметрів електричної енергії мережі живлення та поліпшення електромагнітної сумісності формувача з мережею живлення, запропонована двоканальна структура силової схеми фільтрокомпенсуючого пристрою (ФКП) з поділом виконуваних функцій окремими каналами, що відрізняється за частотою комутації силових ключів і швидкодії. Силова схема такого пристрою (рис. 3.21) є компенсованим керованим випрямлячем (ККВ). Низькочастотний канал представлений мостовим випрямлячем на тиристорах GTO і призначений для компенсації середньої реактивної потужності мережі живлення, а високочастотний канал являє собою інвертор напруги, що виконує функції силового активного фільтра.

Принцип підключення формувача та ФКП до мережі живлення показаний на 3.22.

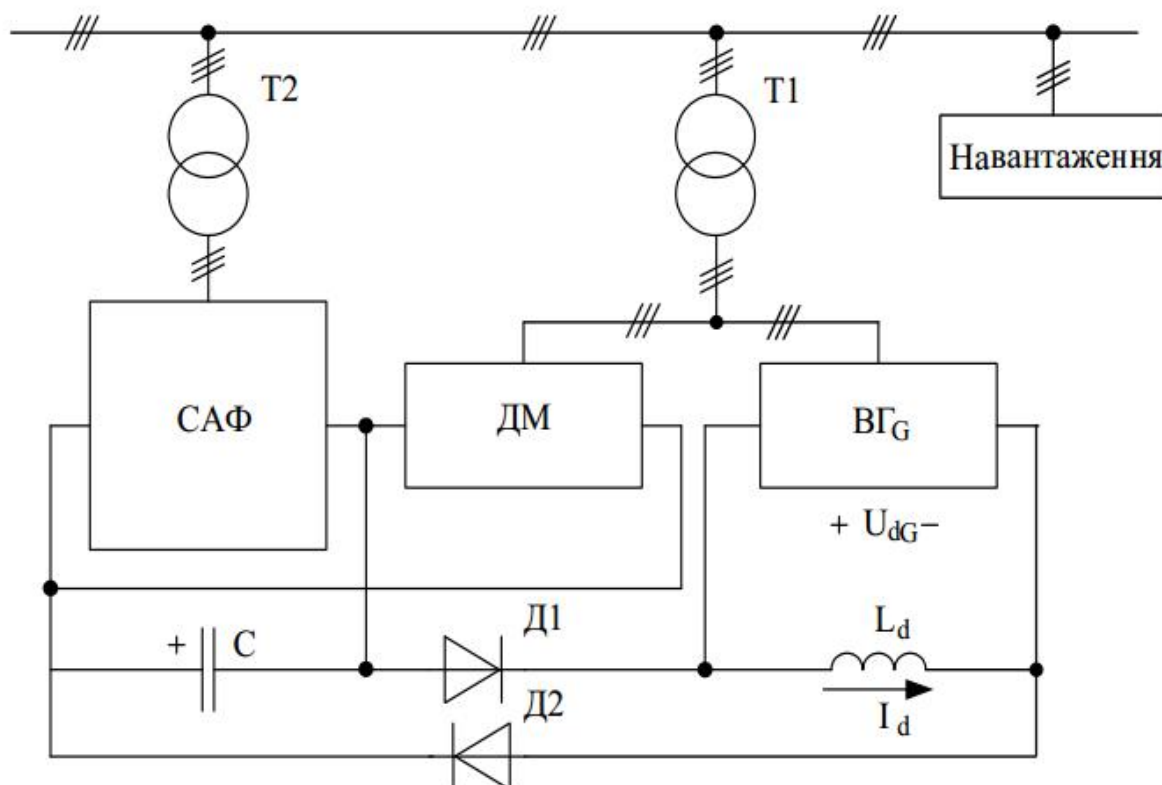


Рис. 3.21. Фільтрокомпенсуючий пристрій

Високу якість регулювання параметрів якості електричної енергії мережі живлення забезпечує запропонована цифрова прогнозно-гістерезисна система керування фільтрокомпенсуючим пристроєм, побудована на основі прогнозу стану системи на наступному інтервалі дискретності. Дана система керування має канал керування інвертором напруги і канал керування випрямлячем і забезпечує максимальний коефіцієнт корисної дії ФКП за підтримки допустимого рівня середньої реактивної потужності мережі живлення.

Розрахунок прогнозованих процесів у компенсаторі реалізується за допомогою сучасних теорій потужності шляхом обчислення середнього та миттєвого значень активної та реактивної потужності у точці підключення ФКП до мережі живлення. Застосування сучасних теорій миттєвої потужності для розрахунку параметрів електричної енергії мережі створює умови для ефективного вирішення проблеми якості електричної енергії в точці підключення

ФКП до мережі живлення і забезпечення високих динамічних характеристик ФКП.

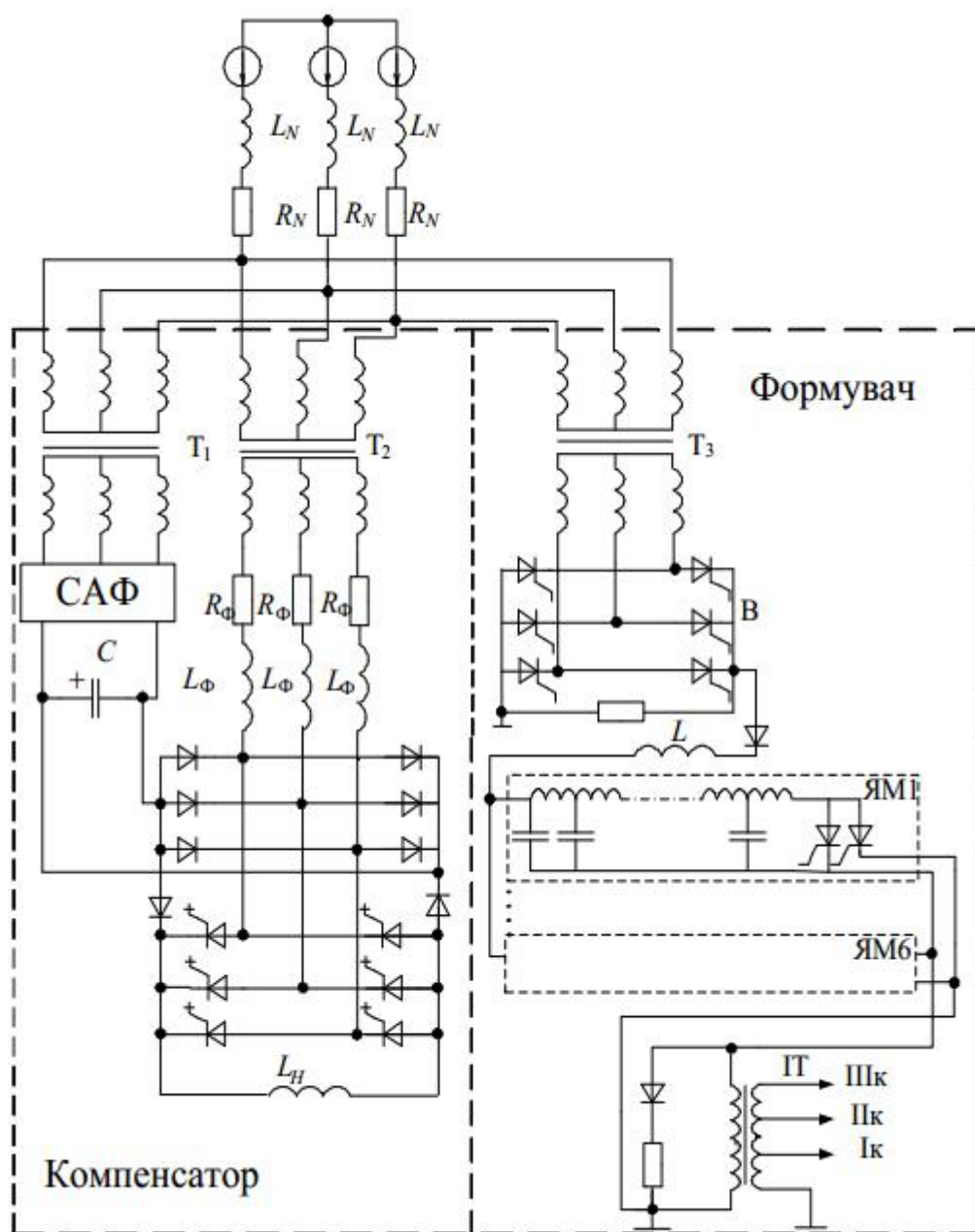


Рис. 3.22. Принцип підключення формувача та ФКП до мережі живлення

Моделі фільтрокомпенсуючого пристрою та формувача, представлені на рис. 3.23, створені та апробовані у пакеті Matlab 7.0.

Як впливає з вищесказаного, основними параметрами, за величиною яких можна зробити висновок про ефективність використання запропонованої структури ФКП для поліпшення електромагнітної сумісності формувача з

мережею живлення, є коефіцієнт гармонік струму, що генеруються формувачем в мережу живлення, коефіцієнт потужності формувача і ФКП в точці їх підключення до мережі живлення.

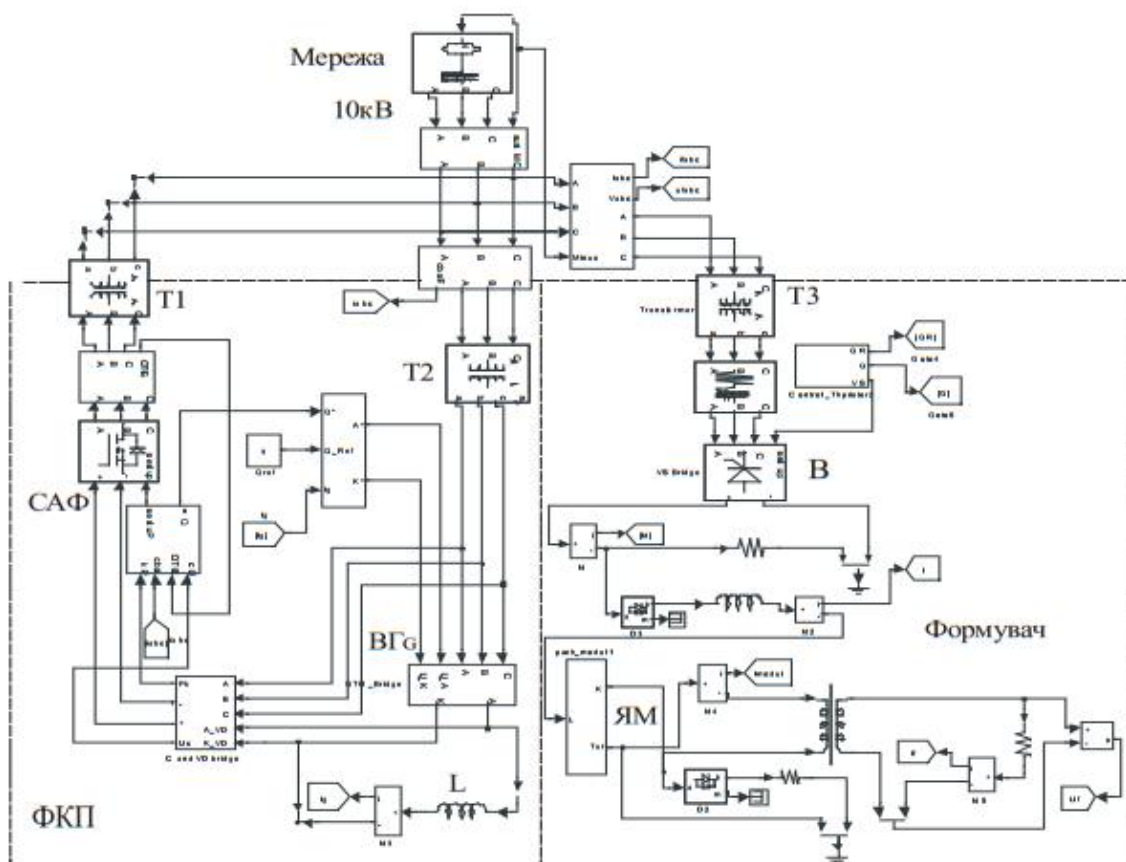


Рис. 3.23. Matlab - моделі фільтрокомпенсуючого пристрою та формувача

Як видно із діаграм на рис. 3.24, у момент часу t_1 , тобто при підключенні ФКП, зміна реактивної потужності Q у точці підключення формувача до мережі живлення знизилася на 90 %, а коефіцієнт потужності в точці підключення компенсатора реактивної потужності та формувача до мережі підтримується на рівні 0,98. На рис. 3.25 наведені 1-а, 5-а, 7-а і 11-а гармоніки струму, що генеруються формувачем в мережу живлення, без підключення ФКП (до моменту часу t_1) і з підключенням ФКП (після моменту часу t_1). При підключенні ФКП амплітуда 5-ої гармоніки знизилася на 60%, 7-ї та 11-ої - на 50%. Математичне моделювання показало, що при включенні компенсатора реактивної потужності в мережу живлення, відбувається деяке зниження першої гармоніки струму формувача зондувальних імпульсів, що позитивно впливає на коефіцієнт корисної

дії формувача, обумовлюючи ефективність компенсації реактивної потужності, що споживається формувачем з мережі живлення.

Результати моделювання підтвердили доцільність використання двоканального компенсатора при вирішенні завдань поліпшення електромагнітної сумісності формувачів потужних зондувальних імпульсів з мережею живлення, поліпшення якості споживаної електроенергії, зменшення втрат і збільшення надійності роботи формувачів.

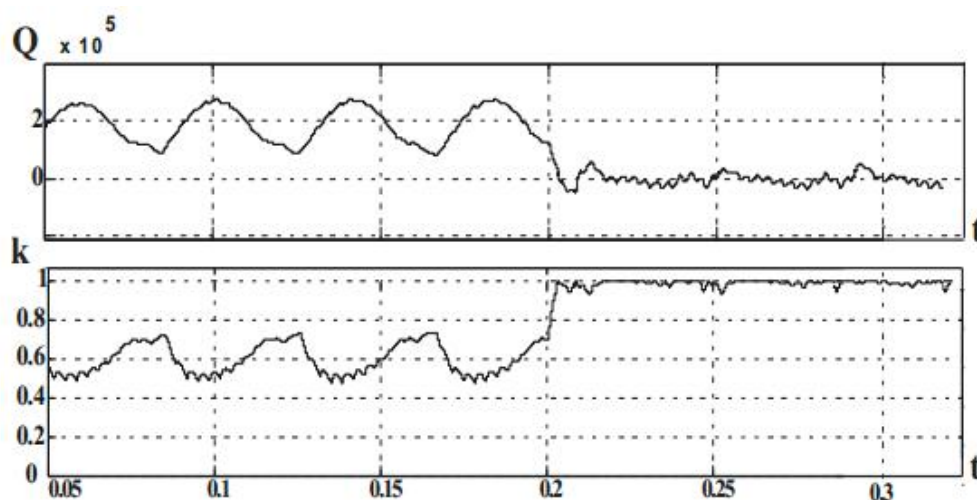


Рис. 3.24. Енергетичні характеристики формувальника

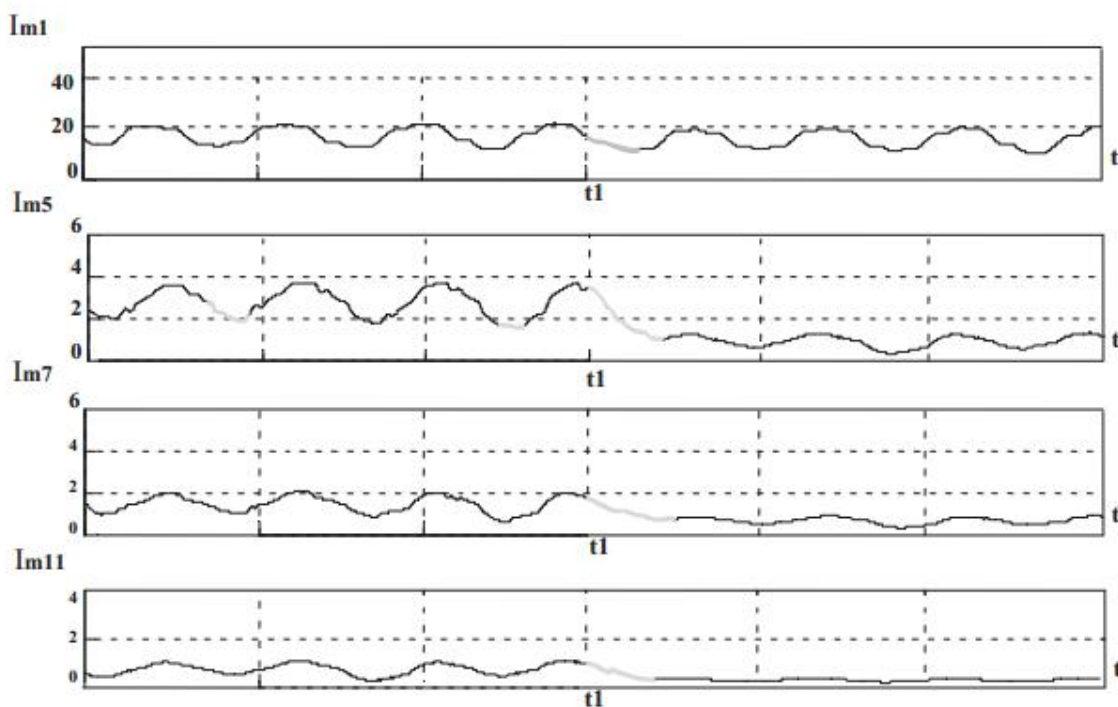


Рис. 3.25. Зміна амплітуд вищих гармонік струму, що генеруються формувачем в мережу живлення

Створені системи керування двоканальним фільтрокомпенсуючим пристроєм засновані на сучасних теоріях потужності та реалізують ідеї керування за прогнозом, що забезпечує досягнення високої швидкодії системи в цілому, керування в реальному масштабі часу та забезпечення необхідних результатів.

3.5. Мікропроцесорна реалізація fuzzy-регулятора системи керування двоканальним компенсатором

Для реалізації fuzzy-регулятора системи керування двоканальним компенсатором неактивних складових повної потужності існують такі можливі рішення. Перший – апаратна реалізація нечіткого мікроконтролера, що входить до складу fuzzy-регулятора, другий – його програмно-апаратна реалізація.

Апаратна реалізація нечіткого мікроконтролера fuzzy-регулятора може бути виконана з використанням:

- мікроконтролерів спеціального призначення;
- мікроконтролерів загального призначення з апаратною підтримкою нечіткої логіки.

Нижче наведено апаратні процесори нечіткої логіки, можливі для використання у складі fuzzy-регулятора системи керування двоканальним компенсатором:

- ST52 Duallogic (STMicroelectronics) – сімейство 8-бітових мікроконтролерів, що містять в одному корпусі традиційне обчислювальне ядро, ядро для fuzzy-обчислень та периферійні схеми. Підтримує спеціальний набір інструкцій для роботи з нечіткою логікою та дозволяє визначати декілька незалежних наборів правил для різних алгоритмів.

– ST62 (STMicroelectronics) – 8-бітовий мікроконтролер з вбудованою, одноразово програмованою пам'яттю для автомобільної промисловості, продовження сімейства Duallogic. Розширений температурний діапазон (від -40° до +125°C), гарантований термін зберігання даних для пам'яті EPROM та EEPROM не менше 20 років.

– 68HC12 (Motorola) – fuzzy-мікроконтролер, що базується на ядрі Motorola 68HC11 і містить спеціальні функції нечіткої логіки. Призначений для використання з програмним пакетом fuzzy TECH та дозволяє збільшити швидкість виконання додатків, створених у цьому пакеті, до 15 разів та компактність коду до 6 разів у порівнянні з реалізацією на звичайному ядрі 68HC11.

– VY86C570 (Togai InfraLogic) – fuzzy-співпроцесор, 12-бітове ядро FCA (Fuzzy Computational Acceleration), 4Kx12 біт пам'яті OCTD (Observation, Conclusion, & Temporary Data), пам'ять RB (Rule Base), та інтерфейсна логіка в одному корпусі.

– SAE 81C99 (Siemens) – fuzzy-процесор, здатний виконувати вісім програмованих алгоритмів, обробляти 256 вхідних змінних та формувати до 64 вихідних значень максимум за 16384 правилами. Може використовуватися як окремий пристрій або як співпроцесор для 8 і 16-розрядних мікроконтролерів. Швидкість роботи – 10 мільйонів правил за секунду.

В силу того, що апаратна реалізація, за наявності таких переваг як швидкість та зручність роботи, не завжди може бути доступна (через малу поширеність та високу ціну), можлива також програмна реалізація fuzzy-регулятора системи управління двоканальним компенсатором на основі мікроконтролерів загального призначення (AVR, PIC, MSP, ARM). В даному випадку, можливе використання таких програмних засобів:

– використання спеціальної «нечіткої» бібліотеки, яка надає необхідну «нечітку» API (Free Fuzzy Logic Library, fuzzyCLIPS);

– використання спеціальних «конструкторів» нечітких систем та подальша трансляція в код програми мікроконтролера (Matlab, Matematica, CubiCalc, RuleMaker, FuziCalc, FuzzyTech);

– використання спеціалізованих програмних засобів, що дозволяють відразу генерувати код з нечіткою системою під будь-який мікроконтролер.

До загальних переваг програмної реалізації можна віднести простоту використання і високу доступність (через високу поширеність мікроконтролерів

Мікропроцесорна реалізація алгоритму керування двоканальним компенсатором з контуром регулювання гармонік струму мережі живлення зображена на рис. 3.27.

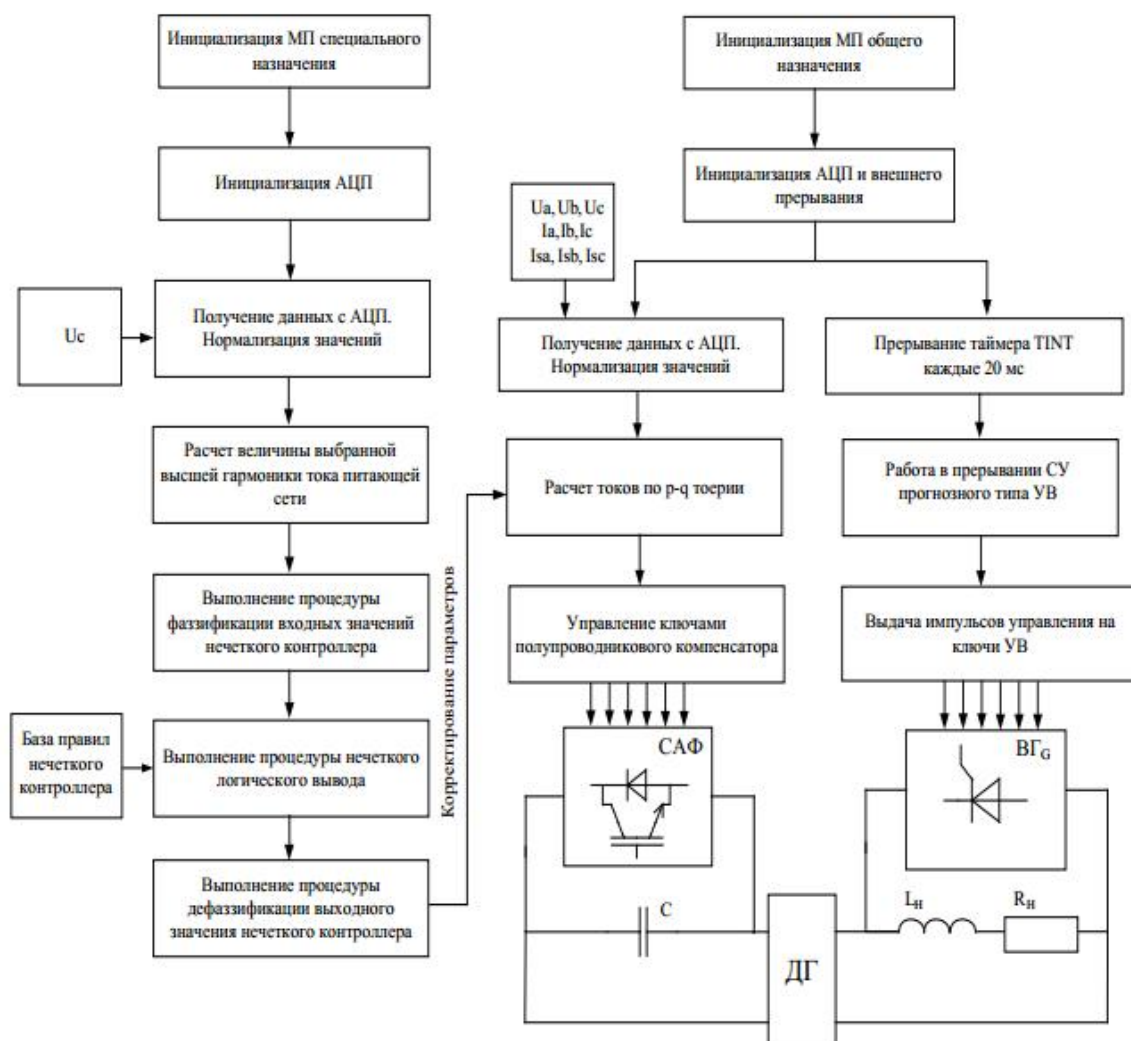


Рис. 3.27. Мікропроцесорна реалізація алгоритму управління двоканальним компенсатором з контуром регулювання гармонік струму мережі живлення

Після ініціалізації мікропроцесора загального призначення та АЦП, мікропроцесор працює в основному циклі програми: отримання даних – розрахунок параметрів – видача керуючих впливів. Мікропроцесор TMS320C2812 має тактову частоту 150 МГц. Основна частина процесорного часу відводиться на керування інвертором компенсатора, частота управління ключами якого знаходиться в діапазоні 15 кГц - 30 кГц. Розрахунок струмів завдань до роботи

інвертора двухканального напівпровідникового компенсатора виконується з урахуванням $p-q$ чи $p-q-r$ теорій потужності.

Керування ключами випрямляча двоканального компенсатора виконується з частотою, що дорівнює частоті мережі живлення. Після ініціалізації мікропроцесора загального призначення та АЦП мікропроцесор працює в циклі управління ключами інвертора компенсатора. Перехід на керування ключами випрямляча виконується через переривання кожні 20 мс.

Як мікроконтролер спеціального призначення, з апаратною підтримкою нечіткої логіки, був обраний мікроконтролер 68HC12 фірми Motorola.

Команди нечіткої логіки мікроконтролерів сімейства 68HC12/912 забезпечують виконання низки специфічних операцій, які дозволяють реалізовувати на базі вибраного мікроконтролера додатковий контур регулювання рівня окремо взятої вищої гармоніки струму мережі.

На рис. 3.28 представлена реалізація структури системи нечіткого виведення fuzzy-регулятора додаткового контуру регулювання за рівнем окремо взятої вищої гармоніки струму мережі живлення в програмі Fuzzy Tech. На відміну від системи Matlab програма fuzzyTECH є спеціалізованим засобом, який дозволяє розробляти та досліджувати різноманітні нечіткі моделі в графічному режимі, а також перетворювати їх на програмний код однією з мов програмування з можливістю подальшої реалізації у програмованих мікроконтролерах. У центрі графічного інтерфейсу знаходиться вікно редактора проекту (ProjectEditor), де відображається структура системи нечіткого виведення у вигляді прямокутників змінних і блоків правил. Редактор проекту є основним засобом, який використовується для візуалізації загальної структури та швидкого доступу до різних інструментів для редагування властивостей систем нечіткого виведення у графічному режимі. Редактор проекту програми fuzzyTECH дозволяє візуалізувати структуру всього проекту та графічно уявити відносини між компонентами проекту.

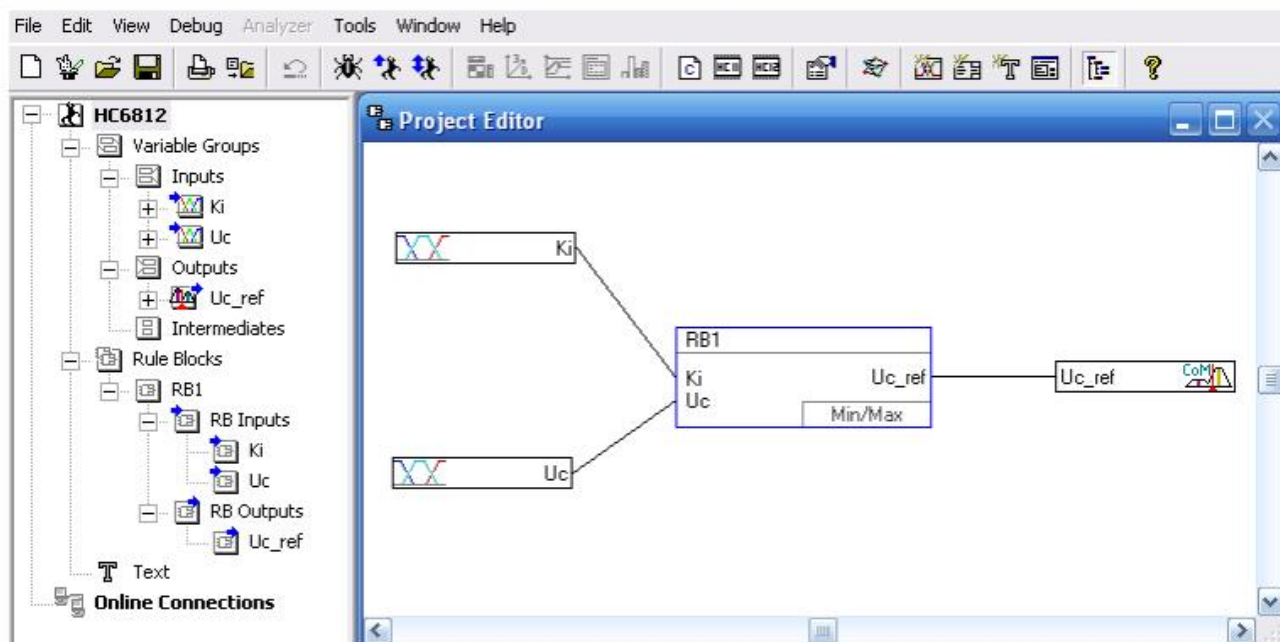


Рис. 3.28. Структура системи нечіткого виведення у програмі Fuzzy Tech

Вигляд графічного вікна табличного редактора блоку правил системи нечіткого виведення зображено на рис. 3.29.

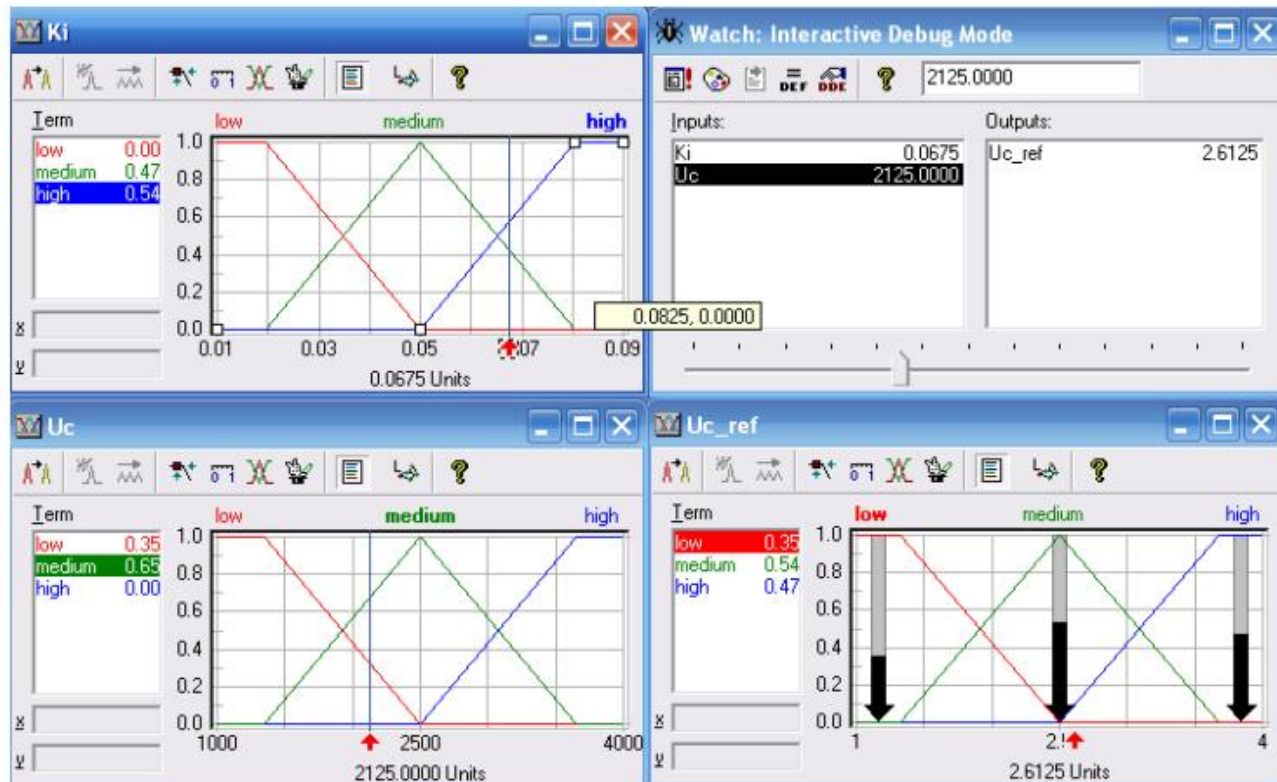


Рис. 3.29. Зовнішній вигляд робочого інтерфейсу програми fuzzyTECH у режимі налагодження проекту

Зовнішній вигляд робочого інтерфейсу програми fuzzyTECH у режимі налагодження проекту зображено на рис. 3.30.

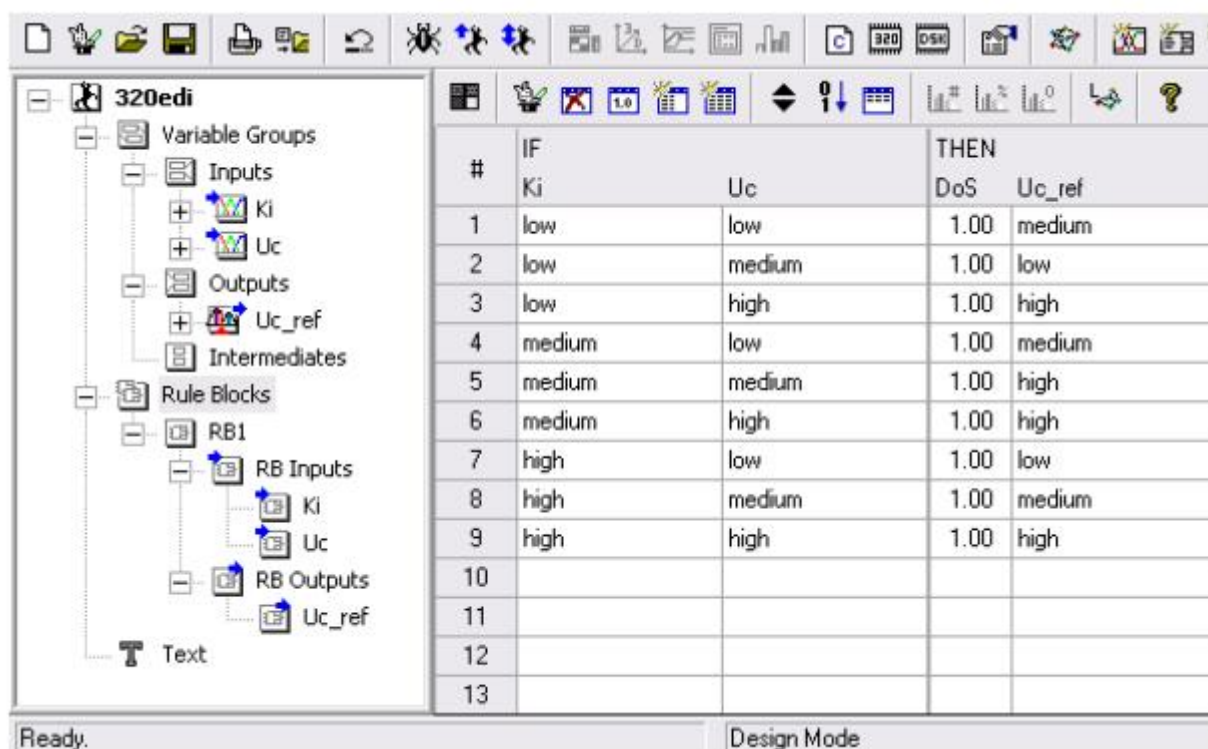


Рис. 3.30. Вікно табличного редактора блоку правил Fuzzy Tech системи нечіткого висновку

Для загального аналізу аналізованої нечіткої моделі можна скористатися графічним вікном перегляду поверхні нечіткого виводу на площині та графічним вікном перегляду тривимірної поверхні нечіткого виводу, показаним на рис. 3.31.

Дана поверхня нечіткого виведення дозволяє встановити залежність значень вихідної змінної від значень вхідних змінних нечіткої моделі системи управління краном. Ця залежність може бути основою для програмування контролера або апаратної реалізації відповідного нечіткого алгоритму управління у формі відповідної таблиці рішень.

Програма fuzzyTECH дозволяє здійснити програмну реалізацію fuzzy-регулятора контуру регулювання гармонік струму мережі живлення, на основі мікроконтролера нечіткої логіки Motorola 68HC12.

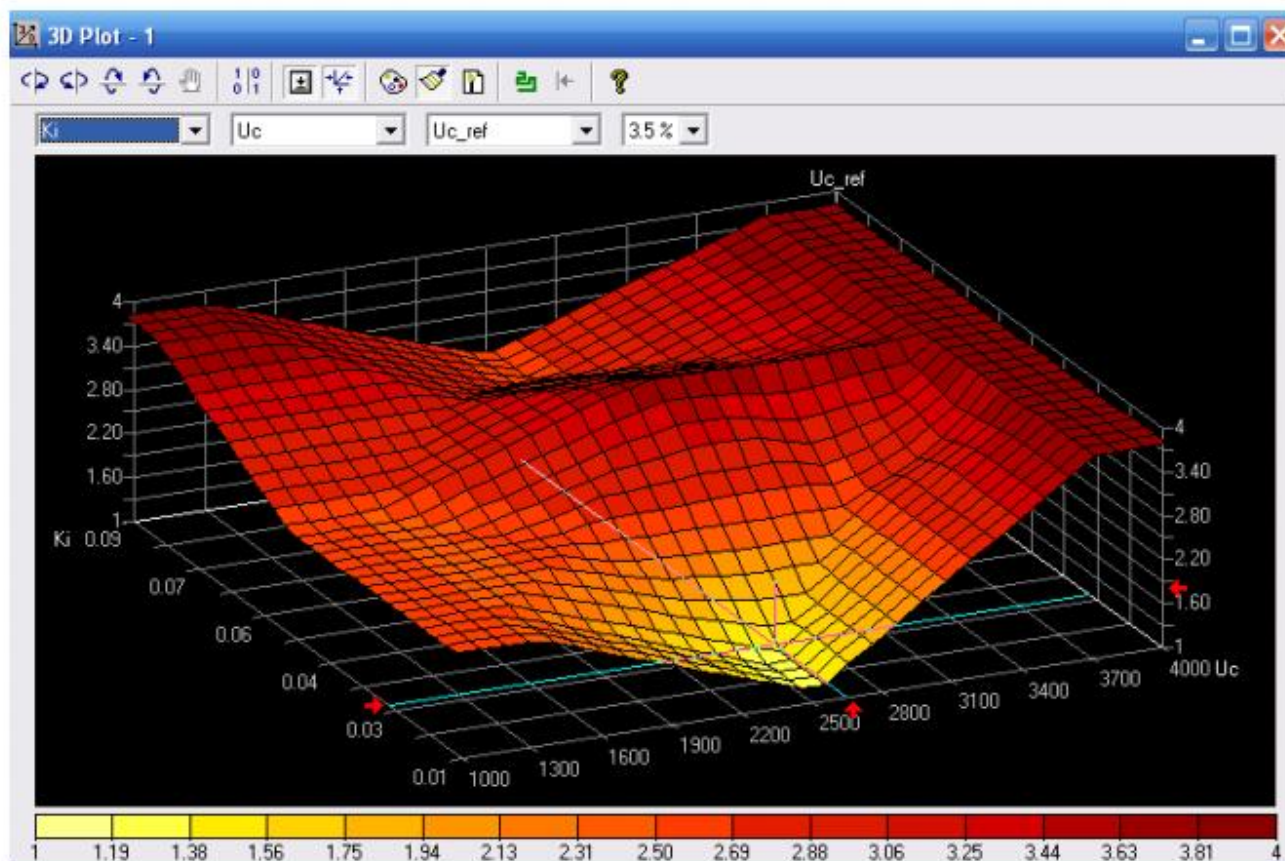


Рис. 3.31. Тривимірна поверхня нечіткого виводу

Використовуючи нечітку базу знань, що лежить в пам'яті, наведену в розділі 2, мікропроцесор вирішує завдання управління з використанням нечіткої логіки, виконуючи 3 основні процедури:

- фазифікацію – перетворення даних, що надійшли, у значення нечітких входних змінних за допомогою відповідних трапецієдальних функцій, характеристики яких вибираються з бази знань;
- обробку нечітких входних змінних за допомогою комплексу логічних правил, що обираються з бази знань;
- дефазифікацію – перетворення нечітких вихідних змінних на двійкові значення результатів обробки.

Висновки до розділу 3

1. Підтверджено доцільність побудови системи керування та регулювання компенсатора неактивних складових повної потужності з додатковим контуром нечіткого регулювання за рівнем комутаційних перенапруг і амплітуд вищих гармонік струму мережі живлення, застосування якої дає можливість у процесі компенсації реактивної потужності зменшити генерування в мережу вищих гармонік у 3-5 разів, не перевищуючи при цьому встановленого рівня комутаційних перенапруг, що дорівнює 0.1 від амплітудного значення лінійної напруги на вторинній обмотці трансформатора випрямляча.

2. Результати математичного моделювання в середовищі Matlab підтвердили правильність вибору методики керування і переваги цифрової прогностичної системи керування двома вентильними групами низькочастотного каналу компенсатора.

3. Застосування запропонованої методики керування низькочастотним каналом компенсатора дозволяє забезпечити високі динамічні характеристики компенсатора за умов зміни характеру навантаження. При цьому відпрацювання заданого збільшення струму відбувається за кілька тактів роботи низькочастотного каналу.

4. Виконано оптимізацію настроювальних параметрів нечіткого регулятора, при яких можливе забезпечення ефективного керування як рівнем амплітуд окремо взятих гармонік струму мережі, так і коефіцієнта гармонік в цілому. Наведені настроювальні параметри fuzzy-регулятора забезпечують встановлення напруги на конденсаторі інвертора на рівні, при якому амплітуда обраної сьомої гармоніки струму мережі живлення I_{m7} не перевищує 5% від рівня амплітуди першої гармоніки I_{m1} , амплітуда імпульсу комутаційного перенапруження не перевищує 0,096 від амплітудного значення на вторинній обмотці трансформатора низькочастотного каналу, коефіцієнт гармонік струму мережі живлення не перевищує 0.08.

5. Результати моделювання підтверджують високу ефективність застосування компенсатора неактивних складових повної потужності при

вирішенні завдань поліпшення електромагнітної сумісності формувачів потужних зондувальних імпульсів з мережею живлення.

6. Коефіцієнт гармонік струму, в точці підключення формувача імпульсів позитивно впливає на коефіцієнт корисності, споживаної формувачем з мережі живлення.

7. Здійснено мікропроцесорну реалізацію fuzzy-регулятора системи управління двоканальним компенсатором на базі мікроконтролера нечіткої логіки Motorola 68HC12.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Загальні положення

Метою даного розділу є виявлення діючих на людину при роботі на об'єкті небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які в певних випадках можуть привести до травм і професійних захворювань.

Специфічна особливість роботи на морському транспорті, різноманітність технічних засобів і висока насиченість ними сучасних суден вимагають глибоких і твердих знань в області охорони праці, що дозволяють попередити нещасні випадки і професійні захворювання моряків, а також швидко і вміло орієнтуватися в складних умовах морського плавання [41].

Вплив виробничого середовища в процесі трудової діяльності обумовлюється:

- ступенем механізації, автоматизації, герметичності обладнання;
- характером праці;
- санітарними умовами праці (забруднення повітря пилом або газами, шум, вібрація, різні випромінювання).

Суднова електроенергетична система призначена для вироблення, передачі і розподілу між споживачами електроенергії, складається з великої кількості різноманітних технічних засобів та пристроїв, які несуть з собою практично весь комплекс небезпек і шкідливостей, в тій чи іншій мірі загрожують здоров'ю людини.

При проектуванні суднових пристроїв і систем необхідно керуватися нормативними документами. Ці документи регламентують конкретні вимоги безпеки, що враховують призначення судна і його устаткування [41, 43].

У разі неполадок з автоматизацією вахтове місце електромеханіка переноситься з містка в ЦПУ, тому нижче проведений аналіз умов праці обслуговуючого персоналу в приміщеннях, де розміщується проектоване електрообладнання і з'являються шкідливі фактори, що впливають на персонал.

Не менш важливим завданням є охорона навколишнього середовища. Тому

необхідно виявити джерела забруднення навколишнього середовища судном і визначити заходи для ліквідації джерел забруднення.

4.2. Аналіз умов праці вахтового електромеханіка в приміщенні ЦПУ

Приміщення ЦПУ знаходиться в безпосередній близькості з машинним відділенням. Тому при розгляді шкідливих факторів необхідно враховувати джерела, що знаходяться не тільки в ЦПУ, але і в машинному відділенні [43].

Джерелом шкідливих факторів в приміщенні ЦПУ є розподільні мережі і кабелі, які викликають:

- електромагнітні випромінювання;
- підвищену пожежонебезпеку;
- можливість ураження електричним струмом.

У свою чергу машинне відділення, через наявність в ньому головного і допоміжного двигунів, генераторів, вентиляторів, насосів, є джерелом вібрації і шуму, а також створює небезпеку теплового травматизму та інших перерахованих вище факторів.

Можна сказати, що з втратою автоматизації класу AUT 1, судно переходить на автоматизацію AUT 2 з вахтою електромеханіка в приміщенні ЦПУ.

Приміщення ЦПУ призначене для установки в ньому контрольно-вимірювальних приладів, органів управління ГЕУ, ДГА, ГРЩ. ЦПУ повинен бути надійно захищений від впливу джерел надлишкового тепла, підвищених шумів і вібрацій, обладнаний системою кондиціонування повітря, так як в ньому постійно знаходиться вахтовий електрик.

ЦПУ є щит з похило розташованими панелями; висота з боку робочого місця становить 700 мм, що зручно для роботи.

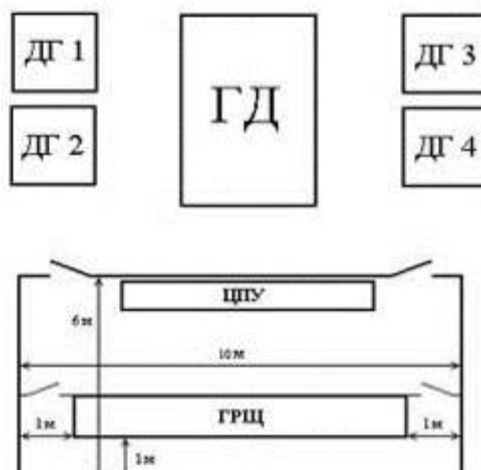


Рис. 4.1. Схема приміщення ЦПУ

ЦПУ відноситься до спеціальних електричних приміщень, тобто двері закриваються на замок і відкриваються назовні; проводиться постійна вентиляція; в такому приміщенні виключена можливість концентрації газів, парів води, мастила і палива, кислотних випарів. З передньої сторони ГРЩ є прохід шириною більше 2 м, а з заднього боку – 1 м, з обох сторін встановлені діелектричні поручні. Простір позаду ГРЩ з відкритими струмоведучими частинами, обмежена і забезпечено дверима.

4.2.1. Електробезпека при експлуатації електростанції

Електробезпека займає особливе місце серед інших питань безпеки та охорони праці, так як ураження електричним струмом нерідко призводить до смертельного результату. Ураження електричним струмом відбувається при зіткненні людини з струмоведучими частинами електричної установки, що знаходиться в цей момент під напругою. Нерідко причинами нещасних випадків є несправність ізоляції, внаслідок чого, нетоковедучі частини установок (корпус) можуть опинитися під напругою [41].

При огляді електричних машин необхідно звертати особливу увагу на стан опору ізоляції машини і її грілок; на з'єднання проводів і кабелів; на огорожу струмоведучих і огорожувальних частин; на наявність і справність заземлення.

При проектуванні СЕС необхідно передбачити заходи безпеки людини, оцінюючи можливу величину струму, що проходить через тіло людини, в разі дотику до струмоведучих частин установки, що знаходяться під напругою. На судні лінійна напруга $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$, мережа трифазного змінного струму з ізолюваною нейтраллю. дані генератора: МСК-103-4 ($P = 200 \text{ кВт}$, $U = 400 / 230 \text{ В}$, $n = 1500 \text{ об / хв}$, $\text{ККД} = 90.5\%$).

ЦПУ за характером приміщення відноситься до приміщень з підвищеною небезпекою. Згідно з вимогами Правил Регістру на судні передбачені заходи щодо запобігання небезпеки ураження електричним струмом, до них відносяться:

- електрообладнання в ЦПУ виконано в морському виконанні;
- контроль опору ізоляції проводиться мегомметром та ПКІ;
- двері ГРЩ, кришки РЩ, блоків автоматики забезпечені захисним блокуванням;
- на ГРЩ встановлені поручні з діелектричного матеріалу;
- струмопровідні шини, заземлюючі з'єднання пофарбовані у відповідні кольори;
- заземлені металеві частини електрообладнання;
- приміщення ЦПУ забезпечено знаком небезпеки;
- є в наявності ізолюючі засоби захисту;
- діелектричні рукавички, інструменти з ізолюваними рукоятками, діелектричні черевики;
- підлога в ЦПУ біля ГРЩ покрита спеціальними гумовими килимками.

4.2.2. Заходи щодо захисту рідких і газоподібних речовин від статичної електрики

Електризація відбувається тим інтенсивніше, чим вище електричний опір рідини або менше їх електрична провідність. Рідини виявляють сильну електризацію, коли електрична провідність їх не перевищує 10^{-9} Ом*см . Низькокиплячі вуглеводні електризується слабкіше, ніж висококиплячі. Наявність

в нафтопродуктах неелектропровідних домішок, газів, повітря значно посилює їх електризацію.

Інтенсивність електризації прямо пропорційна швидкості подачі рідкого нафтопродукту. Швидкість накопичення зарядів, що утворюються при перекачуванні нафтопродуктів, становить від одного до декількох мікрокулонов на 1 л.

Найбільша електризація спостерігається в трубопроводах, виготовлених з низьковуглецевих сталей. Шорсткість поверхні трубопроводів призводить до завихрень рідини при її русі, через що посилюється електризація нафтопродукту.

Як показує практика, електризація рідини виникає і посилюється лише в деяких найбільш сприятливих для електризації місцях (клапани, насоси, зміни перетину трубопроводу). На інших ділянках електризована рідина або втрачає свої заряди, або тільки зберігає отриманий заряд. Знаючи витрату нафтопродукту, кількість перекачаного продукту в одиницю часу і величину опору, можна з достатньою практичною точністю визначити потенціал в вольтах, що виникає на приймальній ємності:

$$V = Q \cdot R = q \cdot M \cdot R,$$

де q - швидкість електризації або заряд електрлізуємості продукту, Кл / л;

M - кількість перекачаного продукту, л;

R - опір струмопровідного з'єднання між ємністю і наповнювачем, Ом.

Для попередження накопичення статичної електрики необхідно:

- не допускати забруднення нафтопродуктів колоїдними розчинними матеріалами (гумою, асфальтом і ін.);
- видаляти залишки води після очищення ємностей і трубопроводів;
- вентилювати ємності з нафтопродуктами для видалення вибухонебезпечної суміші горючих речовин з повітрям.

При наповненні ємностей слід завантажувальні труби доводити до днища. Завантаження виробляти через отвори з великим поперечним перерізом, не допускаючи дотику струменя рідини зі стінками ємності з поверхнею рідини. При завантаженні в порожню ємність, а також якщо випускається отвір

завантажувального патрубку неможливо занурити в рідину заповнення слід проводити зі швидкістю, що не перевищує 0,5-0,7 м / с.

Введення до складу нафтопродуктів антистатичних присадок підвищує їх електропровідність, а отже, послаблює небезпечні прояви статичної електризації.

Зливні гумові шланги з металевими наконечниками для наливу в бочки повинні бути заземлені мідним дротом, оповитий по шлангу зовні з кроком 0,1 м або пропущеного всередині, з припаюванням одного кінця до металевих частин продуктопроводу, а іншого - до наконечника шланга. Наконечники шлангів повинні застосовуватися з металу (бронза, алюміній), що не дає іскри при ударі.

Відбір проб рідин з ємностей (резервуарів) під час їх заповнення або спорожнення забороняється. Відбір проб слід проводити лише після того, як рідина прийде в спокійний стан.

4.2.3. Небезпеки механічного та теплового травматизму

Можливість отримання травм механічного та теплового характеру в ЦПУ пов'язано з недотриманням техніки безпеки при експлуатації електрообладнання. За вимогами Регістру передбачені засоби захисту від механічного та теплового травматизму - огорожувальні пристрої від попадання людини в небезпечну зону. Так як ЦПУ та інші приміщення судна схильні хитавиці, то приміщення повинні бути обладнані поручнями. Тепловий травматизм пов'язаний з наявністю нагрітих частин. За ДСТУ 12.4.026-93 використовуються попереджувачі знаки небезпеки.

4.2.4. Пожежна безпека

За ступенем пожежонебезпеки приміщення ЦПУ відповідає категорії П - пожежонебезпечна. За статистичними даними основні причини пожеж в приміщеннях СЕУ в процентному співвідношенні складають:

- несправність або перевантаження електророзподільних пристроїв і кабельних мереж - 25%;

- несправність ГА і газових траків двигунів - 20%;
- займання палива і масла від нагрітих поверхонь або під дією відкритого полум'я - 25%;
- ремонтні роботи (зварювання, газорізання і нагрів) і порушення правил технічної експлуатації - 30%.

Найбільших збитків можуть принести пожежі, що охоплюють значну частину одного або декількох приміщень.

Причинами займання можуть бути:

- однофазне замикання через залишковий опір;
- електрична дуга;
- коротке замикання.

Для підтримки високої пожежної безпеки необхідно контролювати стан ізоляції СЕС в цілому, а також вибірково. З цією метою на судні використовується прилад типу ПКІ, а також передбачається чітке виконання правил техніки безпеки, тобто наявність відповідного обладнання та підтримання його в порядку.

Пожежна безпека повинна забезпечуватися як в робочому, так і в аварійному стані об'єкта. Для виявлення пожежі застосовується система з тепловими сповіщувачами - легкозаймистими вставками, як найбільш дешева і зручна. Так як в ЦПУ знаходяться струмопровідні шини та кабелі, а також комутаційна апаратура, то для гасіння пожежі застосовується система вуглекислотного пожежогасіння.

Для гасіння пожеж в ЦПУ використовуються первинні засоби пожежогасіння (вогнегасник - пінний хімічного типу ОХП - 10, вуглекислотні типу ОУ - для гасіння електроустановок під напругою).

На перекриттях між ПУ і розташованими над ним приміщеннями встановлена ізоляція протипожежна типу А -15, тобто захист виконано відповідно до вимоги Правил Регістру.

Прокладка кабелів по верхній палубі в районі вантажних танків передбачена в сталевих трубах, що захищають їх від механічних пошкоджень. Кріплення трас

кабелів виконано за допомогою кабельних підвісок, одиночних кабелів на скобах-мостах; в місцях можливих пошкоджень кабелі захищені металевими кожухами або прокладені в трубах. Прохід кабелів через водо- і газонепроникні переборки і палуби здійснюється через кабельні коробки, ущільнюються компаундом або через індивідуальні сальники.

Металеві корпуси електричних машин і апаратів, що працюють при напрузі понад 30 В, електрично з'єднані з корпусом судна за допомогою заземлюючих перемичок з міді або латуні. Передбачене заземлення корпусу судна на береговий заземлюючий пристрій.

4.2.5. Мікроклімат і шкідливі домішки в приміщенні ЦПУ

Мікрокліматичні умови в приміщенні ЦПУ визначаються ГОСТ12.1.005 - 88, які встановлюють загальні санітарно - гігієнічні вимоги до температури, вологості, швидкості руху повітря.

У приміщенні ЦПУ переважаючим шкідливим фактором є надмірне тепловиділення. Воно виникає від безпосередньої близькості машинного відділення, де встановлені генератори і дизелі. Повітря в приміщенні також містить такі шкідливі домішки, як вуглеводні ($\text{ГДК} = 5 \text{ мг / л}$), що усувається роботою припливно-витяжної вентиляції. Також в приміщенні ЦПУ встановлена система кондиціонування повітря, яка забезпечує нормовані параметри стану повітряного середовища і система електроопалення з використанням низькотемпературних нагрівачів.

4.2.6. Вібрація і шум

Машинне відділення через наявність в ньому двигунів, генераторів і допоміжних механізмів є джерелом вібрації і шуму. Вібрація і шум шкідливо впливають на здоров'я людей, і погіршує умови праці. Вібрація, в свою чергу, може привести до порушення нормальної роботи механізмів, приладів та іншого

обладнання.

Рівень шуму регламентується санітарними нормами ДСН 3.3.6.037 - 99, а загальні вимоги безпеки по ГОСТ 12.1.003 - 85. Для зниження шуму, що виникає при роботі ДГА, використовуються звукоізолюючі переборки між ЦПУ і МВ, для ефективності вона покрита звукопоглинальним матеріалом. При цьому рівень шуму не повинен перевищувати норм. Обсяг автоматизації судна відповідає класу А1. Воно обладнується системами автоматизації в обсязі, що дозволяє виробляти дистанційне автоматизоване управління головними механізмами. ЦПУ обладнаний пристроями індикації та аварійно-попереджувальною сигналізацією.

Для локалізації структурних шумів огорожувальні конструкції ЦПУ виконуються із застосуванням шумоізолюючих покриттів, а також проводиться герметизація дверей, отворів в місцях проходу кабелів і труб.

Параметри вібрації на судах нормуються відповідно до вимоги ДСН 3.3.6.039 - 99, а загальні вимоги безпеки по ГОСТ 12.1.012 - 90.

Обмеження поширення вібрацій від джерел в приміщенні ЦПУ досягається за допомогою віброізолюючих засобів, до яких відносяться віброізолюючі фундаменти, гнучкі патрубки, прокладки з гуми і пластмаси. Для віброізоляції механізмів використовуються амортизатори типу АКСС - І. Для захисту організму людини від шкідливого впливу вібрації в приміщенні ЦПУ застосовуються такі засоби: вібродемпфуючі килимки з мілкопористої гуми.

4.2.7. Освітлення

Для нормальної роботи обслуговуючого персоналу в приміщенні ЦПУ потрібно безперервне штучне освітлення в будь-який час доби, з оптимальною освітленістю. У приміщенні ЦПУ освітлення здійснюється комбінованим способом. Крім рівномірного освітлення (загального) всього приміщення робочі поверхні додатково висвітлюються окремими світильниками (місцеве освітлення).

У Правилах Регістру вказується мінімальна освітленість. Додаткові вимоги, що пред'являються до штучного освітлення:

- рівномірна освітленість робочих місць;
- стабільність напруги мережі;
- відсутність різних тіней на робочих поверхнях;
- обмеження сліпучої дії;
- обмеження відбивного блиску.

В залежності від призначення застосоване на судах електричне освітлення підрозділяється на наступні системи:

- загальне освітлення (рівномірне або локалізоване);
- комбіноване, що складається із загального та місцевого;
- переносне освітлення, як різновид місцевого, що забезпечує підвищення освітленості на робочих місцях під час огляду і ремонту обладнання.

Згідно "Норм штучного освітлення" на судах морського флоту мінімальна освітленість в приміщеннях ЦПУ на шкалах приладів при освітленні люмінесцентними лампами становить 300 лк.

4.2.8. Шкідливі випромінювання

Так як в сферу обслуговування електромеханіка входить все електрообладнання судна, то частина робочого часу він може знаходитися під електромагнітним випромінюванням.

Застосовувані на судні засоби радіозв'язку і радіонавігації, є джерелами потужних електромагнітних випромінювань. Електромагнітні поля радіочастот несприятливо впливають на здоров'я екіпажу. Суднові радіостанції є джерелами високочастотного випромінювання (ВЧ), а радіолокаційні станції - джерелами надвисокочастотного випромінювання (НВЧ).

Біологічний ефект впливу електромагнітних полів визначається інтенсивністю випромінювання (щільністю потоку енергії), частотою коливань, спрямованістю електромагнітного потоку в просторі, відстанню між випромінювачем і людиною, а також індивідуальними особливостями організму.

Найбільш надійним і допустимим засобом захисту від шкідливого впливу

електромагнітних випромінювань є екранування джерел випромінювання та об'єктів, що захищаються.

Для екранування робочих місць застосовуються екрани з листового матеріалу товщиною не менше 0,5 мм. Оглядові вікна та інші отвори в перегородках і подволоки екрановані густою металевою сіткою з розмірами вічок, що не перевищують 0,1 довжини хвилі.

Всі фідерні лінії, що несуть струм по робочих контурах, кабелі виконані коаксіальним проводом, що виключає необхідність їх екранування.

4.3. Розрахунок освітлення в ЦПУ

У разі класу автоматизації AUT 1 запуск головного двигуна можливий з містка, але не виключені випадки несення ваhti в приміщенні ЦПУ. Для визначення необхідної кількості світильників в ЦПУ зробимо розрахунок використовуючи наступну залежність:

$$N = \frac{E_n \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{n \cdot F_{\text{л}} \cdot \eta \cdot \gamma},$$

де E_n - рівень мінімальної освітленості для приміщення ГРЩ ($E_n = 300\text{лк}$);

S - площа приміщення ($S = 60 \text{ м}^2$);

K_3 - коефіцієнт запасу для люмінесцентних ламп ($K_3 = 1,3$);

Z - коефіцієнт нерівномірності освітлення ($Z = 1$);

n - кількість ламп в одному світильнику ($n = 2$);

$F_{\text{л}}$ - світловий потік лампи світильника (для типу ЛБ40 $F_{\text{л}} = 2480\text{лм}$);

η - коефіцієнт використання світлового потоку ($\eta = 0,9$);

γ - коефіцієнт нерівномірності освітлення ($\gamma = 0,8$).

$$N = \frac{300 \cdot 60 \cdot 1,3 \cdot 1}{2 \cdot 2480 \cdot 0,9 \cdot 0,8} = 6 \text{ світильників.}$$

Таким чином, в приміщенні ЦПУ необхідно розмістити 6 світильників для забезпечення мінімально допустимого рівня освітленості. Також є необхідним розміщення джерел місцевого освітлення - настільних ламп на деяких панелях і

письмових столах.

План розміщення світильників наведено на рис. 4.2.

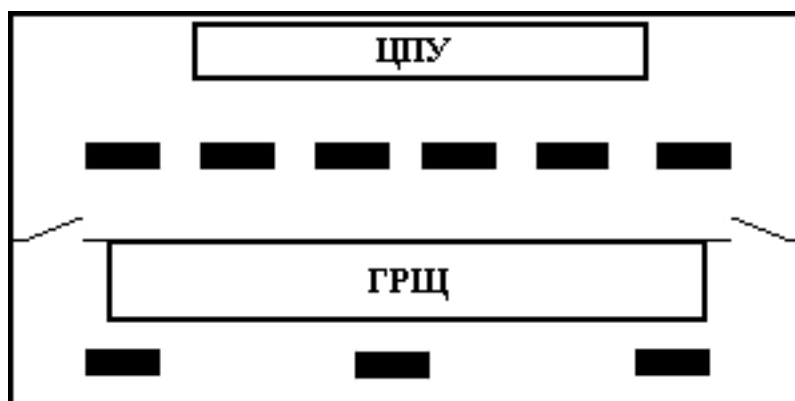


Рис. 4.2. План розміщення світильників в ЦПУ

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

5.1. Джерела забруднення навколишнього середовища

У 1972 р в ООН прийнято поняття забруднення гідросфери – це введення людиною прямо або побічно речовин або енергії в морське середовище, в результаті якого завдається шкода живим ресурсам моря, виникає небезпека для здоров'я людей, перешкода морської діяльності, погіршується якість морської води, зменшуються її корисні властивості.

Частка антропогенного впливу на світовий океан по речовинах: Cd - 50%, Hg - 70%, Нафта - 88%, Pb - 92%, Пестициди - 100%.

Речовини розподіляються по океану нерівномірно. Велика частина залишається в прибережній зоні і впливає на екологію внутрішніх морів і поверхностних розділів. Частина речовин осідає на дно, що може привести до повторного забруднення [44].

Для екології моря суховантаж в першу чергу представляється як основне джерело забруднення нафтопродуктами. Крім цього в процесі експлуатації на суховантажі виникають додаткові джерела забруднення такі як: вихлоп від спалювання палива, льяльні води, детергенти, тверді відходи (картон, ганчір'я, пластик, скло та ін.).

Під впливом поверхневого натягу води нафтопродукти покривають водойми тонкою плівкою, забруднюючи величезні простори. Нафта знищує, перш за все, фітопланктон, яким харчується зоопланктон, який є кормом риб. Нафта негативно впливає на фізіологічні процеси, викликає незворотні зміни в тканинах і органах морських птахів і великих морських тварин.

Нафтова плівка на поверхні моря істотно впливає на процеси обміну тепловою енергією, вологою і газами між океаном і атмосферою, що несприятливо позначається на кліматі Землі і балансі кисню в атмосфері.

Джерелами забруднення навколишнього середовища є технологічні процеси та недосконале очищення відходів від цих процесів, основним завданням являється

розробка безвідходних або маловідходних технологій, використання сучасних транспортних засобів, впровадження організаційних заходів з екологічної безпеки, таких, наприклад, як плата за викиди в атмосферу та гідросферу, продаж квот на викиди в навколишнє середовище, раціональне розміщення підприємств, з урахуванням щільності населення та інше [...].

Саме через надмірні забруднення (речовинні та неречовинні) якість життя різко погіршилася – знизилася народжуваність, зросли захворюваність, смертність як в міському, так і сільському середовищах. Екологічний стан тепер позначають як катастрофічний через прояви глобальних, тобто поширених повсюдно, проблем. Катастрофа (з грец. – загибель, руйнування) – результат дії певних чинників, сил, через які об'єкт руйнується так, що його відновлення неможливе. Сформувалися антропогенні катастрофи – це негативні природно-техногенні зміни природного середовища, довкілля – біосфери, викликані дією чинників якісного та кількісного характеру, породжених господарською діяльністю людей. Результати таких катастроф впливають на людей, тваринний і рослинний світ, навколишнє середовище в цілому.

Забруднення – це різноманітні фактори. По-перше – речовинні: хімічні, біологічні (віруси, бактерії, нижчі цвілеві гриби та їхні токсини – отрути). По-друге – неречовинні, або фізичні, на які на відміну від речовинних (хімічних, біологічних) не можна вплинути. Це звуки, шуми, вібрації; різноманітні випромінювання: світлові – випромінювання електричних полів біля ліній електропередач, електромагнітні – радіохвилі від теле- та радіостанцій, радіоактивні. А також психічні – нецензурна лайка, образи. Джерелами речовинного забруднення є викиди промисловості, сільського господарства, побутового сектору, автомобільного транспорту, які містять токсичні хімічні речовини. Тому всі види забруднень оцінені за ступенем їх дії на людину і розроблені нормативи, критерії оцінки їх впливу на здоров'я.

Важливою умовою нормування є необхідність враховувати вміст забруднюючих речовин в природному середовищі. Основні загальнодержавні екологічні нормативи – це гранично допустима концентрація (ГДК) та гранично

допустимий викид (ГДВ) для речовин, які можуть потрапити в природне середовище з різноманітних джерел – промислових, сільськогосподарських, побутових.

Неречовинні шкідливі фактори теж мають певні максимальні значення, перевищення яких неприпустиме. Це гранично допустимий рівень (ГДР). Їх ще позначають як параметричні забруднювачі – різноманітні випромінювання: світлові, теплові, радіоактивні. Якщо природне значення вмісту або рівня небезпечних речовин перевищені, то довкілля – природне, промислове, міське, побутове вважається забрудненим. Отже, не можна, щоб в результаті будь-якої вказаної діяльності перевищувалися цифрові значення екологічних нормативів.

Важливим показником є гранично допустиме екологічне навантаження (ГДЕН), яке характеризує витривалість, стійкість середовища до забруднень, до руйнування екологічної системи. Окрім цього виділяють обмежуючі нормативи – допустима остаточно кількість (ДОК) шкідливої речовини в їжі або в урожаї під час його збору, в природному середовищі – атмосфері, воді, ґрунті.

Всі хімічні сполуки, забруднювачі природного середовища, за їх шкідливим впливом на здоров'я людини утворюють чотири класи небезпеки. Основу такої класифікації становлять значення гранично допустимої концентрації (ГДК) речовин. Одиниці виміру: у повітрі – міліграм на кубічний метр (мг/м^3), у воді, будь-яких рідинах – міліграм на літр (мг/л), в ґрунтах і продуктах харчування – міліграм на кілограм речовини (мг/кг).

За величинами ГДК хімічні забруднення розділяють на чотири класи. Перший клас небезпечних речовин – речовини, концентрації яких знаходяться в межах від 0,1 мг і менше – навіть мільярдні частки їх дуже токсичні. Це надзвичайно небезпечні речовини, наприклад, сполуки важких металів – ртуті, свинцю, кадмію, нікелю; радіоактивних елементів – торію, урану, радію, а також органічні речовини – бензопірен, діоксин, поліциклічні вуглеводні (нафталін, фенатрен), які є канцерогенами, і багато інших, у тому числі навіть деякі лікарські препарати.

Другий клас - дуже небезпечні речовини, ГДК яких знаходяться в межах від 0,1 до 1 мг. До них належать багато лікарських препаратів, наприклад більшість антибіотиків (алергени, деякі з них навіть канцерогени), кислоти, луги.

Третій клас – небезпечні речовини, ГДК яких знаходяться в межах від 1 до 10 мг. Наприклад, багато препаратів побутової хімії – розчинники фарб, емалі, синтетичні миючі засоби і навіть звичний пил на вулицях і шляхах, у побуті.

Четвертий клас – речовини відносно небезпечні для нашого здоров'я. Їх ГДК – від 10 мг і більше, але це не означає, що вони повністю нешкідливі. Це більшість харчових продуктів, які можуть негативно впливати на здоров'я людини – сприяти виникненню алергічних реакцій.

Всі речовини за результатом небезпечності їх впливу на організм людей, тварин, рослин у свою чергу об'єднують в класи – ксенобіотики, мутагени, канцерогени, тератогени.

Ксенобіотики (грец. ксенос – чужий, біо – життя) – речовини, які шкодять життю, руйнують його, порушують природні біохімічні реакції в організмі людини, викликають несумісні з життям процеси. Зараз у світі застосовують понад 300 тис. різноманітних речовин, які використовують в різних галузях діяльності людей – у промисловості, зокрема хімічній, сільському господарстві, медицині, побуті. Всього відомо близько 2 млн речовин – неорганічних, органічних.

Багато серед них канцерогенів (лат. канцер – рак, грец. генос – породжувати) – сприяють розвитку ракових захворювань; мутагенів (лат. мутаціо – змінювати); тератогенів (грец. тератос – чудовисько, потвора). Це спирт етиловий – алкоголь, дим цигарки, сигарети, який містить близько 5 тис. речовин, небезпечних для клітини, а отже і для життя, у тому числі і радіоактивних. Надзвичайно небезпечним у складі диму є органічна речовина – діоксин – надсильний канцероген.

Труднощі нормування вмісту ксенобіотиків в продуктах рослинного походження в тому, що різні види рослин по-різному стійкі до одних і тих же речовин. Стійкість залежить від місця збору, від багатьох екологічних факторів,

які можуть бути лімітуючими. Одна і та ж рослина, тварина по-різному стійкі до тих або інших речовин – отрутохімікатів, добрив. Окрім цього, різні фізіологічні процеси у рослинах неоднаково чутливі до забруднюючих речовин.

Для багатьох речовин характерний синергічний ефект (грец. син – разом), коли токсичність однієї речовини різко підсилюється в присутності іншої. Це явище називають ефектом сумації шкідливої дії – синергізмом і його необхідно враховувати при нормуванні вмісту і надходженні забруднюючих речовин у довкілля. Ефект сумації проявляють фенол, ацетон, валеріанова, капронова та масляна кислоти, озон, діоксид азоту, формальдегід і багато інших.

До основних шкідливих забруднювачів належить монооксид вуглецю – чадний газ (отруєння крові) – 70%, незгоріле пальне (вуглеводні – загальне отруєння) – 20%, оксиди азоту (отруєння крові, руйнівники озоносфери) – близько 10%. Дуже шкідливий етилований бензин, який містить високотоксичні сполуки свинцю, з яких 70% потрапляє у повітря, а з нього (близько 40%) в організм людини – легені, кров, сприяючи захворюванням, в тому числі і онкологічним. На поверхню землі їх випадає 30%, що призводить до забруднення поверхневих вод, рослин. Через це не можна розташовувати городи, сади, пасовища уздовж автомобільних шляхів. Один автомобіль для спалювання 1 л бензину використовує 200 л кисню, якого вистачило б для дихання однієї людини протягом двох з половиною діб. Окрім цього, кожна автотранспортна одиниця за 1 км шляху виділяє в середньому 30 г чадного газу, який утилізується дуже повільно (головним чином грибами), 4 г оксидів азоту і 2 г отруйних вуглеводнів. Великої шкоди завдають літаки, космічні ракети, які викидають у великих кількостях крім вище названих речовин ще й аерозолі, які руйнують озоносферу, викликають появу смогу в повітрі.

Небезпеку становлять біологічні об'єкти, особливо генетично модифіковані (штучне введення генів інших організмів) і звичайні – мікроорганізми, отруйні рослини, тварини, деякі гриби.

Крім речовинної небезпеки, про яку нас попереджають органи чуттів, існує неречовинна, або польова, чи параметрична небезпека, яку створюють

різноманітні випромінювання, що органи чуттів не сприймають (окрім світла). Наприклад, крім хімічного смогу (дими, аерозолі, які містять шкідливі речовини – канцерогени, алергени, ксенобіотики), існує також і невидимий електромагнітний смог (забруднення довкілля шкідливими випромінюваннями), який є не менш небезпечним, ніж хімічний – за рахунок електромагнітних випромінювань (мобільний зв'язок, теле-, радіостанції).

Неречовинні, або фізичні забруднювачі – це звуки, шуми, вібрації, електричний струм, різноманітні випромінювання – світлове, теплове, ультрафіолетове, радіоактивне та багато інших. Їх дію на організми людей, тварин, рослин визначають гранично допустимі рівні (ГДР), перевищення значень яких, як і ГДК – неприпустиме, бо шкодить всьому живому. Слід знати, що для кожного організму характерна своя певна межа витривалості до ГДК речовин, або ГДР до неречовинних факторів.

5.2. Заходи з охорони навколишнього середовища

Охорона водних об'єктів світового океану і живих / неживих ресурсів, також користування ними регулюється міжнародними та національними актами [44].

Міжнародна конвенція по запобіганню забрудненню моря (ПЗМ) з судів MARPOL 73/78 має 6 додатків:

- 1) Правило по ПЗМ нафтою (прийнято 02.10.83);
- 2) Правило по ПЗМ шкідливими речовинами, що перевозяться наливом (06.04.87);
- 3) Правило по ПЗМ шкідливими речовинами, що перевозяться в тарі, упаковці (01.07.92);
- 4) Правило по ПЗМ стічними водами (не прийнято);
- 5) Правило по ПЗМ сміттям (31.12.88);
- 6) Правило по ПЗ атмосферного повітря (20.05.05).

Конвенцією MARPOL 73/78 визначено, що відстійні танки на суховантажі

призначаються для збору і обробки в них нафтовмісних сумішей, що утворюються при промиванні вантажних і зачисних трубопроводів, зачистці брудних вантажних танків від води, що надійшла в них у результаті промивання вантажної системи, видаленні з вантажних танків залишків брудного баласту, слив якого за борт в зв'язку з великим вмістом нафти в ньому заборонено, а також при митті вантажних танків і паливних цистерн, зачистці льял вантажного насосного відділення; відкачування льяльних вод з машинно-котельного відділення. Відмиту і відстояну в танку нафту слід здавати на берег, або використовувати на судні шляхом залучення в вантаж або в паливо для суднової енергетичної установки. При відсутності приймальних споруд зливати за борт можна тільки відстояну від нафти воду (з нижніх шарів відстійних цистерн). Промивні води, містять миючі хімпрепарати, повинні здаватися тільки на приймальні споруди.

Після закінчення зливу з відстійних танків необхідно зробити відповідні записи в журналі нафтових операцій.

У нашій країні для запобігання забруднення поверхні моря в портах побудовані спеціальні приймальні пристрої для прийому від судів нафтовмісних залишків, забрудненої води, відходів і сміття.

Питання регулювання забруднення довкілля електромагнітним полем і контролю джерел зазвичай вирішують профільні державні установи, які слідкують за зв'язком, телекомунікаціями, енергетикою і природоохоронні організації. Так в США, це Агентство з охорони навколишнього середовища (US Environment Protection Agency), у Німеччині – Міністерство з охорони навколишнього середовища проживання і ядерної безпеки (Bundes Ministeriumfur Umwelt, Naturschutzund Reaktorsicherheit), Нідерланди Міністерство будівництва, територіального планування і охорони навколишнього середовища та інші.

Основний спосіб захисту від можливого шкідливого впливу електромагнітних полів від дії ліній електропередач – створення охоронних зон шириною від 15 до 30 метрів в залежності від напруги ЛЕП. Цей захід вимагає

відчуження великих територій і виключення їх із користування у деяких видах господарської діяльності.

Рівень напруженості електромагнітних полів знижують також за допомогою встановлення різних екранів, зокрема і зелених насаджень, вибору геометричних параметрів ЛЕП, заземлення тросів та інших заходів.

У стадії розробки перебувають проекти заміни повітряних ліній ЛЕП на кабельні і підземної прокладки високовольтних ліній.

Для захисту населення від неіонізуючих електромагнітних випромінювань, створюваних радіотелевізійними засобами зв'язку й радіолокаторами, також використовується метод захисту відстанню. Для цього утворюють санітарно-захисну зону, розміри якої мають забезпечити гранично припустимий рівень напруженості поля. Короткохвильові радіостанції великої потужності (понад 100 кВт) розміщують далеко від житлової забудови, поза межами населених пунктів.

Державні стандарти по нормуванню допустимих рівнів впливу електромагнітних полів входять до групи Системи стандартів безпеки праці - комплекс стандартів, що містять вимоги, норми і правила, вкладені у забезпечення безпеки, збереження здоров'я дитини і працездатності людини під час праці. Вони є загальними документами, що включають:

- вимоги з видами відповідних небезпечних і шкідливих чинників;
- гранично допустимі значення параметрів і характеристик.

Підприємства та установи, які використовують джерела ЕМП, повинні проводити поточний санітарний нагляд за об'єктами, здійснювати організаційно-методичну роботу з підготовки спеціалістів та інженерно-технічний нагляд. Ще на стадії проектування повинне бути забезпечене таке взаємне розташування опромінюючих та опромінюваних об'єктів, яке б зводило би до мінімуму інтенсивність опромінення. Потрібно зменшити імовірність проникнення людей і тварин у зони з високою інтенсивністю ЕМП, скоротити час перебування під опроміненням. Потужність джерел випромінювання мусить бути мінімально допустимою.

Важливе значення мають інженерно-технічні методи захисту: колективний, локальний та індивідуальний. Колективний захист спирається на розрахунок поширення радіохвиль в умовах конкретного рельєфу місцевості. Економічно найдоцільніше використовувати природні екрани – складки місцевості, лісонасадження, нежитлові будівлі. Встановивши антену нагорі, можна зменшити інтенсивність поля, яке опромінює населений пункт, у багато разів.

При захисті від випромінювання екраном повинне враховуватись затухання хвилі при проходженні через екран (наприклад, через лісову смугу). Для екранування можна використовувати рослинність. Спеціальні екрани у вигляді відбивальних щитів дорогі і використовуються дуже рідко.

Локальний захист дуже ефективний і використовується часто. Він базується на використанні радіозахисних матеріалів, які забезпечують високе поглинання енергії випромінювання у матеріалі та віддзеркалення від його поверхні. Для екранування шляхом віддзеркалення використовують металеві листи та сітки з доброю провідністю. Захист приміщень від зовнішніх випромінювань можна здійснити завдяки обклеюванню стін металізованими шпалерами, захисту вікон сітками, металізованими шторами. Опромінення у такому приміщенні зводиться до мінімуму, але віддзеркалене від екранів випромінювання перерозповсюджується в просторі та потрапляє на інші об'єкти.

Існує велика кількість радіопоглинальних матеріалів як однорідного складу, так і композиційних, котрі складаються з різнорідних діелектричних та магнітних речовин. З метою підвищення ефективності поглинаюча поверхня екрана виготовляється шорсткою, ребристою або у вигляді шипів.

Радіопоглинальні матеріали можуть використовуватись для захисту навколишнього середовища від ЕМП, яке генерується джерелом, що знаходиться в екранованому об'єкті. Крім того, радіопоглиначами для захисту від віддзеркалення личкуються стіни безлунких камер – приміщень, де випробовуються випромінювальні пристрої. Радіопоглинальні матеріали використовуються при високих навантаженнях, потужних системах.

Рекомендації щодо захисту від дії електромагнітних полів та випромінювань:

1. Необхідно виключити тривале перебування в місцях підвищеного рівня магнітного поля промислової частоти;
2. Ліжко для нічного відпочинку максимально видаляти від джерел тривалого опромінення, відстань до розподільних шаф, силових електрокабелів повинне бути 2,5...3 метри;
3. При необхідності встановити підлоги з електропідігріванням вибирати системи зі зниженим рівнем магнітного поля;
4. При придбанні побутової техніки необхідно звертати увагу на оцінку про відповідність приладу вимогам "Міждержавних санітарних норм допустимих рівнів фізичних факторів при застосуванні товарів народного споживання у побутових умовах";
5. Використовувати прилади з меншою потужністю;
6. Розміщувати електричні прилади на деякій відстані один від одного й видалення їх від місця відпочинку.

Витрати на охорону природи регулюються податковим кодексом України. З 1 січня 2011 р. згідно Податкового кодексу в Україні запроваджується екологічний податок який справлятиметься за фактичні обсяги викидів у атмосферне повітря та скидів у водні об'єкти забруднюючих речовин, розміщення відходів, фактичного обсягу утворення та тимчасового зберігання радіоактивних відходів.

Україна не має чіткої законодавчої бази саме для електромагнітного забруднення навколишнього середовища і на даний час воно регулюється санітарними нормами.

Назріла нагальна потреба ефективного і прискореного розв'язання в нашій країні завдань екологічної безпеки соціально-економічного розвитку та переведення національної економіки на модель сталого й екологобезпечного функціонування вже в найближчій перспективі.

Головна мета сучасного етапу національної політики - суттєве поліпшення стану навколишнього середовища України в антропосфері, соціосфері, техносфері, біосфері, атмосфері, гідросфері, літосфері та інших компонентів, створення екологоекономічних передумов для сталого або збалансованого розвитку нашої держави.

Виділяється 7 пріоритетів:

- забезпечення екологічної безпеки ядерних об'єктів і радіаційного захисту населення та довкілля;
- мінімізація впливу наслідків аварії на ЧАЕС;
- поліпшення екологічного стану річок, зокрема, басейну Дніпра та якості питної води;
- стабілізація і поліпшення екологічної ситуації в містах та промислових центрах Донецько-Придніпровського регіону;
- будівництво нових та реконструкція чинних потужностей комунальних очисних каналізаційних споруд;
- запобігання забрудненню Чорного та Азовського морів, поліпшення їхнього екологічного стану;
- формування збалансованої системи природокористування;
- збереження біологічної та ландшафтної різноманітності. Стратегічні напрями державної політики на найближчі роки:

Безпека в антропосфері: екологізація всіх сфер життєдіяльності населення в контексті національної безпеки України, реалізація концепції екологічної освіти, впровадження системи професійної екологічної підготовки державних службовців і керівників та інше.

Безпека в соціосфері: вдосконалення законодавчої бази, гармонізація екологічного законодавства з європейським, підсилення екологічної складової в загальному процесі переходу країни до сталого розвитку; недопущення неконтрольованого ввезення в Україну екологічно небезпечних технологій, речовин, матеріалів, генетично модифікованих продуктів тощо.

Безпека техносфери: вдосконалення та поширення інформації про стан об'єктів підвищеної небезпеки, запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, підвищення ступеня захисту населення та інше.

Безпека атмосфери: пом'якшення впливу глобальних змін клімату, транскордонної міграції забруднень на стан повітряного басейну України; впровадження екологічно безпечних технологій, поліпшення екологічного стану повітря в містах і промислових центрах.

Безпека гідросфери: запровадження інтегрованого управління водними ресурсами, прискорення переходу до управління водокористуванням за басейним принципом; поліпшення екологічного стану річок та підземних вод України, якості питної води.

Отже, Україна має різноманітний природно-ресурсний потенціал та вирізняється ландшафтним різноманіттям. Але сьогодні потрібно усвідомити необхідність зберегти гідні умови життя для майбутніх поколінь.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання створення енергоефективного багатофункціонального двоканального напівпровідникового компенсатора неактивних складових повної потужності з швидкодією цифрової системи управління та регулювання, заснованої на сучасних теоріях потужності, методах нечіткої логіки та прогнозних обчислень.

У цьому отримано такі основні наукові результати.

1. На основі системного аналізу способів та пристроїв компенсації неактивних складових повної потужності обґрунтовано актуальність створення багатофункціональних енергоефективних компенсаторів неактивних складових повної потужності, що дозволяють успішно вирішувати проблему компенсації реактивної потужності, що генерується або споживається навантаженням, фільтрації вищих гармонік струму.

2. Розроблено методики побудови швидкодіючої цифрової багатоконтурної системи управління та регулювання двоканальним компенсатором, з використанням сучасних теорій потужності, нечітких обчислень та ідей управління за прогнозом, а також алгоритми управління низькочастотним каналом компенсатора при зміні характеру навантаження, що забезпечують високі динамічні характеристики компенсатора. Запропонована система управління забезпечує підтримку коефіцієнта потужності навантаження з компенсатором не нижче 0.98 і зниження амплітуд вищих гармонік струму мережі живлення на 50-60%.

3. Розроблено fuzzy-регулятор у складі системи управління компенсатором, застосування якого дає можливість у процесі компенсації реактивної потужності зменшити генерування в мережу вищих гармонік струму, не перевищуючи при цьому встановленого рівня комутаційних перенапруг. Розроблено методику вибору настроювальних параметрів fuzzy-регулятора на основі методів багатовимірної оптимізації.

4. Розроблено мікропроцесорну систему управління двоканальним компенсатором на основі процесора загального призначення серії TMS та реалізації контуру регулювання гармонік струму мережі живлення на основі процесора спеціального призначення 68HC12 фірми Motorola. Розроблено спеціальне програмне забезпечення код мовами C та Assembler.

5. Отримані результати є закінченими для використання при розрахунку параметрів силової схеми компенсатора неактивних складових повної потужності, розроблення структури мікропроцесорної системи керування та регулювання, створення алгоритмів керування в реальному масштабі часу та їх програмної реалізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ EN 50160:2014. «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності» Режим доступу: <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diialnosti/elektroenergiya/yakist-elektropostachannya/yakist-elektrichnoyi-energiyi>
2. Рогальський Б. С. Про визначення економічно доцільних обсягів споживання реактивної енергії / Б.С. Рогальський, С.О. Кузмінська, А.В. Праховник и др. // ПРОМЕЛЕКТРО. - 2004. - №6. - С.8-13.
3. Рябчинский М. В. Регулятор качества электроэнергии на базе активного фильтра / М. В. Рябчинский // Электротехника. - 2000. - №7. - С.37-40.
4. Вагин Г.Я. Рекомендации по построению систем электроснабжения промышленных предприятий с учетом электромагнитной совместимости электроприемников / Г.Я. Вагин, А.А. Севостьянов // ПРОМЭЛЕКТРО. - 2004. - №1. - С.31-36.
5. Вагин Г. Я. Компенсация реактивной мощности в электрических сетях предприятий с резкопеременной нагрузкой / Г.Я. Вагин, А.А. Севостьянов // ПРОМЕЛЕКТРО. - 2004. - №4. - С.42-46.
6. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники / Г.С. Зиновьев. - Новосибирск: НГТУ. - 2003. - 664 с.
7. Рябчинский М. В. Регулятор качества электроэнергии на базе активного фильтра / М. В. Рябчинский // Электротехника. - 2000. - №7. - С.37-40.
8. Аникин В.В. Метрологическое обеспечение контроля и определения показателей качества электрической энергии. Современное состояние и перспективы развития / В.В. Аникин, А. С. Давыдов // Український метрологічний журнал. - 2004. - Вып.2. - С.43-48.

9. Жаркин А. Ф. Анализ энергопотребления импульсного источника электропитания электронной техники / А. Ф. Жаркин // Технічна електродинаміка. - Київ: ІЕДНАНУ. -2002. -№1. - С. 21-26.
10. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 160 с.
11. Розанов Ю.К. Современные методы улучшения качества электроэнергии / Ю. К. Розанов // Электротехника. - 1998. - №3. - С.29-34.
12. Волков И. В. Новая концепция построения силовых цепей частотно-регулируемых асинхронных электроприводов / И.В. Волков // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕДНАНУ. - 1999. - №4. - С.34-38.
13. Рогальський Б. С. Про визначення економічно доцільних обсягів споживання реактивної енергії / Б.С. Рогальський, С.О. Кузмінська, А.В. Праховник и др. // ПРОМЕЛЕКТРО. – 2004. -№6 . - С.8-13.
14. Жаркин, А.Ф. Нормативные и технические аспекты обеспечения стандартных характеристик напряжения в системах электроснабжения Украины / Жаркин А. Ф., Новский В. А., Палачев С. А. // Вестник Национального технического университета «ХПИ». Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. - Харьков: НТУ «ХПИ». - 2012. - № 52 (958). - С. 76-83.
15. Чиженко А. И. О балансе реактивной мощности в цепи трехфазного ИРМ с трансформаторно-конденсаторными узлами коммутации / А. И. Чиженко // Технічна електродинаміка. - Київ: ІЕДНАНУ. -2000. - , №3. -С.8-14.
16. Шидловский А. К. Транзисторные преобразователи с улучшенной электромагнитной совместимостью / Шидловский А. К., Козлов А. В.- Киев: Наукова думка, 1993. - 172 с.
17. Шидловский А. К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А.К. Шидловский, А.Ф. Жаркин. – К.: Наукова думка. – 2005. – 210 с.

18. Бирюлин В.И. Генерация высших гармоник тока и напряжения газоразрядными лампами при регулировании питающего напряжения / В.И. Бирюлин, О.Н. Ларин // ПРОМЭЛЕКТРО, 2006. - №2. - С.27-32.
19. S.Fryze, "Active, Reactive and Apparent Power in Non-Sinusoidal Systems", Przegląd Electrot.. – № 7. - 1931. - P. 193-203.
20. Маевский О.А. Энергетические показатели вентильных преобразователей / О.А. Маевский. – М.: Энергия, 1978. – 360 с.
21. John E. Dickerson and Julie A. Dickerson "Fuzzy Network Profiling for Intrusion Detection", Iowa State University. September, 2001.
22. H.Akagi, Y.Kanazawa, A.Nabae "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three phase circuits." IPEC'83 // Int. Power Electronics Conf., Tokyo, Japan. - 1983. - P. 1375 - 1386.
23. H.Kim, F.Blaabjerg "Instantaneous power compensation in three-phase systems using p-q-r theory." IEEE Ttans.Power Electronics, vol. 17. - no 5. - 2002. - P. 701-710.
24. F.Z.Peng, J.S.Lai "Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems." IEEE Trans. Instrum.Meas. – Vol.45. - No 1. -1996. - P.293-297.
25. S. Fryze, "Wirk-Blind-und Sheinleistung mit nichtsinusformig Verlauf von Strom und Spannung", ETZ. – H. 25. -1932. - P. 26-29.
26. Sokol E. I., Domnin I.F. Microprocessor prognosis control of semiconductor converters of electric energy // Procceding of the 7 th International Power Electronic & Motion Control Conference.Volume 1. - Budapest. - 1996. - P. 303-305.
27. H.Akagi, Y.Kanazawa, A.Nabae "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components // IEEE Trans. Ind.Applicat., vol.20. - 1984. - P. 625-630.
28. IEEE Recommended practices and Reguirements for Harmonic Control in Electric Power System, IEEE Std. 519-522.

29. Домнин И.Ф. Полупроводниковые компенсаторы неактивных составляющих полной мощности: дисс. ...доктора техн. наук : 05.09.12 / Домнин Игорь Феликсович. - Х., 2008. - 299 с.

30. Домнин И.Ф. Перспективы применения полупроводниковых компенсаторов реактивной мощности в сетях электроснабжения промышленных предприятий / И.Ф. Домнин, Г.Г. Жемеров, Е.И. Сокол // Технічна електродинаміка. - Київ: ІЕДНАНУ. - 2002. - Ч.2. - Тематичний вип. - С. 37.

31. Крылов Д.С. Полупроводниковые преобразователи переменного напряжения в постоянное с близким к единице коэффициентом мощности: дисс... канд. техн. наук: 05.09.12 / Крылов Денис Сергеевич. - Х., 2003. - 186 с.

32. Жемеров Г.Г. Системы управления активными управляемыми выпрямителями, выполненные на основе современных теорий мощности / Г.Г. Жемеров, О.В. Ильина, Д.В. Тугай // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ «ХПІ». - 2004. - Вип. 43. - С. 135-141.

33. Перельмутер В. М. Цифровые системы управления тиристорным электроприводом / В. М. Перельмутер, А. К. Соловьев. - Киев: Техника, 1983. - 103 с.

34. Домнин И.Ф. Управление силовым активным фильтром в режиме компенсации реактивной мощности / И. Ф. Домнин, Д. А. Федоров // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ«ХПІ». - 2003. - С. 465-466.

35. Домнин И.Ф. Система управления фильтрокомпенсирующим устройством / И.Ф. Домнин // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕДНАНУ. – 2004. – № 4. - Тематичний вип. – С. 25.

36. Гостев В.И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления: монографія / В.И. Гостев. – Нежин: ООО Видавництво «Аспект-Поліграф». – 2009. – 416 с.

37. Малышев Н.Г. Нечеткие модели для экспертных систем в САПР / Н.Г. Малышев, Л.С. Берштейн, А.В. Боженьюк. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

38. Домнин И. Ф. Минимизация высокочастотных гармоник, генерируемых выпрямителем двухканального компенсатора неактивных составляющих полной мощности / И.Ф. Домнин, Е.А. Кайда, Л.Ф. Симонова // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ«ХПІ». – 2010. – С. 79 – 84.

39. Домнин И.Ф. Характеристики полупроводникового фильтрокомпенсирующего устройства в установившемся режиме / И.Ф. Домнин, Г.Г. Жемеров, О.И. Копачовец // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕДНАНУ. – 2003. – Ч.4. - Тематичний вип. – С.15-20.

40. Кайда Е.А. Нечеткое регулирование устройством компенсации неактивных составляющих полной мощности / Е.А. Кайда // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕДНАНУ. – 2011. – Ч. 1, Тематичний вип. – С. 184-188.

41. Гандзюк М.П. Основы охорони праці. К.: Каравела, 2005. – 408 с.

42. Закони України Про охорону праці: Закон України / Відомості Верховної Ради України. - 1992. - № 49, - Ст. 668.

43. Международная конвенція з охорони людського життя на морі - СОЛАС - 74 (SOLAS - 74), вид. 2008.

44. Международная конвенція про запобігання забруднення моря - МАРПОЛ - 73/78, вид. 2004.

45. Правила пожежної безпеки на морських суднах України, НАПБ.Б. 01.013 - 2007. - Київ: Основа, 2007.