

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеню вищої освіти – магістр
за освітньо-професійною програмою
«Кіберфізичні системи в промисловості, бізнесі та транспорті»

зі спеціальності

174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

тема роботи:

*«Нечітка система керування компенсуючим пристроєм у системі
електропостачання металургійного підприємства»*

Виконав ст. гр. АКІТР-24-2м	_____	Кобилянський А. С.
Керівник	_____	Савицький О. І.
Нормоконтроль	_____	Маринич І. А.
Завідувач кафедри	_____	Рубан С. А.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Магістр

Спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри: к.т.н. Рубан С.А.

« 15 » травня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра

студентові групи АКІТР-24-2м Кобилянському Антону Сергійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Нечітка система керування
компенсуючим пристроєм у системі електропостачання металургійного
підприємства»

затверджено наказом по університету № 258с від 13.05.2025 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 01.12.2025 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 95с., додатки,
презентація у Microsoft PowerPoint (15 слайдів) в електронному та друкованому
вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-3

доц. Савицький О. І.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>10.03.25</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>15.04.25</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>18.06.25</i>
4	<i>Розділ 3</i>	<i>19.08.25</i>
5	<i>Висновки</i>	<i>15.10.25</i>
6	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>20.11.25</i>
7	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>28.11.25</i>
8	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>01.12.25</i>

6. Дата видачі завдання: 24.12.2024р.

Керівник _____ /Савицький О. І./

7. Запевнення: Я, Кобилянський Антон Сергійович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Здобувач _____ / Кобилянський А. С./

АНОТАЦІЯ

Кобилянський А. С. Нечітка система керування компенсуючим пристроєм у системі електропостачання металургійного підприємства : кваліфікаційна робота магістра : 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2025. 80 с.

Метою роботи є вивчення та розробка методів, структур та алгоритмів, що реалізують автоматичне керування компенсуючим пристроєм у системі електропостачання зі змінним навантаженням.

У першому розділі показано, що на металургійних підприємствах використовується велика кількість спотворюючих електроприймачів, режими роботи яких призводять до відхилень і коливань напруги, асиметрії, несинусоїдальності і низької до коефіцієнта потужності. Електричні мережі та інші споживачі найбільше страждають від електродугових печей та прокатних станів.

В другому розділі розроблено імітаційну модель системи електропостачання цеху металургійного підприємства з дуговою сталеплавильною піччю та статичним тиристорним компенсатором. В результаті при різкозмінному навантаженні не вдається стабілізувати рівень напруги і коефіцієнта потужності. Отже, можна говорити про неефективну роботу ПІ-регулятора і необхідності оптимізації алгоритмів управління компенсуючим пристроєм.

В третьому розділі за результатами аналізу можливих способів опису печі був обраний метод, згідно з яким електродугова піч описується за схемою електрозаміщення як трифазне активно-індуктивне навантаження зі змінними опорами R_d і X_L . Для порівняння в моделі системи управління СТК розглядається використання нечіткого регулятора з висновком Сугено з вхідними змінними e , de/dt , $Step\ TSC$ і вихідною змінною B . Результати моделювання показали, що нейрорегулятор Сугено гірше справляється з компенсацією різкозмінного навантаження, ніж нейрорегулятор Мамдані, так як спостерігається висока коливальність сигналів V_{meas} і $\cos\varphi$.

Ключові слова

АЛГОРИТМ, ДУГОВА СТАЛЕПЛАВИЛЬНА ПІЧЬ, НЕЙРОРЕГУЛЯТОР, СТАТИЧНИЙ ТИРИСТОРНИЙ КОМПЕНСАТОР, МАМДАНІ, СУГЕНО

ANNOTATION

Kobylianskyi A. S. Fuzzy Control System of a Compensating Device in the Power Supply System of a Metallurgical Enterprise : Master's Qualification Thesis : 174 – Automation, computer-integrated technologies, and robotics. Kryvyi Rih. Kryvyi Rih National University, 2025. 75 p.

The aim of this work is to study and develop methods, structures, and algorithms that implement automatic control of a compensating device in a power supply system with variable load.

The first chapter shows that metallurgical enterprises use a large number of nonlinear electrical consumers, whose operating modes lead to voltage deviations and fluctuations, asymmetry, waveform distortion, and a low power factor. Electric networks and other consumers are most affected by electric arc furnaces and rolling mills.

In the second chapter, a simulation model of the power supply system of a metallurgical plant workshop with an electric arc furnace and a static thyristor compensator was developed. As a result, under rapidly changing load conditions, it is not possible to stabilize the voltage level and power factor. Therefore, it can be concluded that the PI controller operates inefficiently, and there is a need to optimize the control algorithms of the compensating device.

In the third chapter, based on the analysis of possible methods for describing the furnace, a method was chosen according to which the electric arc furnace is represented by an equivalent circuit as a three-phase active-inductive load with variable resistances R_D and X_L . For comparison, in the control system model of the static thyristor compensator (STC), the use of a fuzzy controller with Sugeno inference is considered, with input variables e , de/dt , $Step\ TSC$ and output variable B . The simulation results showed that the Sugeno neuro-controller performs worse in compensating for rapidly changing loads than the Mamdani neuro-controller, as there is a higher oscillation of the V_{meas} and $\cos\varphi$ signals.

Keywords:

ALGORITHM, ELECTRIC ARC FURNACE, NEURO-CONTROLLER, STATIC THYRISTOR COMPENSATOR, MAMDANI, SUGENO

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	10
1.1 Показники якості електроенергії та їх вплив на оснащення промислових підприємств.....	10
1.2 Специфіка експлуатації електрообладнання металургійного підприємства.....	16
1.3 Ефективність заходів, що проводяться на металургійних підприємствах щодо підвищення якості електроенергії.....	18
1.4 Шляхи підвищення якості електроенергії в точці підключення металургійного підприємства.....	23
Висновки за розділом.....	25
РОЗДІЛ 2 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СТК В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ.....	27
2.1 Розробка імітаційної моделі системи електропостачання металургійного підприємства.....	27
2.2 Розробка математичної моделі дугової сталеплавильної печі.....	30
2.3 Дослідження впливу змінного навантаження на мережі живлення в системі без компенсатора.....	36
2.4 Синтез параметрів класичного регулятора в системі керування статичним тиристорним компенсатором.....	39
Висновки за розділом.....	50
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СТАТИЧНИМ ТИРИСТОРНИМ КОМПЕНСАТОРОМ.....	52
3.1 Синтез нечіткого регулятора в системі керування статичним тиристорним компенсатором за алгоритмом Мамдані.....	52
3.2 Синтез нечіткого регулятора за алгоритмом Мамдані з додатковою вхідною змінною.....	58

3.3 Синтез нечіткого регулятора в системі управління статичним тиристорним компенсатором за алгоритмом Сугено.....	67
Висновки за розділом.....	72
ВИСНОВКИ.....	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	77

ВСТУП

На більшості сучасних промислових підприємств в технологічних процесах беруть участь електричні пристрої, які можна охарактеризувати як спотворюють електроприймачі. Їх вплив на електромережі призводить до зниження якості електроенергії і, як наслідок, впливає на роботу електроустановок інших споживачів. Це проявляється в зниженні ККД і терміну служби, а також некоректної експлуатації технічних пристроїв.

Нормативні значення показників якості електроенергії встановлені ГОСТ 32144. З вини споживачів відбувається погіршення таких показників, як відхилення напруги, мерехтіння, асиметрія і несинусоїдальна напруга. Найбільший внесок у зниження якості електроенергії вносять так звані енергоємні виробництва. Серед них можна виділити металургійні підприємства, на частку яких, за різними даними, припадає від 15 до 30% електроенергії, що споживається промисловістю. Ситуація ускладнюється тим, що в технологічних процесах металургії задіяні установки, які вважаються «найгіршими» електроприймачами: дугові печі, прокатні стани, електроприводи різних кранів, покажчики повороту, конвеєри, агломашини та ін.

В даний час вирішення проблеми якості електроенергії здійснюється в декількох напрямках. Одним з яких є оптимізація алгоритмів компенсаторів з метою підвищення швидкості і стабільності регулювання.

Актуальність теми. Проблема зниження якості електроенергії перерахованими приймачами давно виявлена і для її вирішення використовуються технічні пристрої, які прийнято називати компенсаторами реактивної потужності. До таких приладів відноситься розглянутий в даній роботі статичний тиристорний компенсатор (СТК). Крім підтримки високого коефіцієнта потужності в системі електропостачання, сучасні напівпровідникові компенсатори дозволяють фільтрувати гармонійні складові, вирівнювати баланс трифазної системи і стабілізувати напругу. Однак,

незважаючи на багаторічний досвід використання компенсуючих пристроїв з різною схемотехнікою, на даний момент можна сказати, що існуючі пристрої не в повній мірі справляються з поставленими завданнями.

Особливо яскраво це проявляється при компенсації впливу таких приймачів, як дугові печі, які характеризуються як різко змінне навантаження, або прокатні стани, для яких характерні періодичні скачки і розряди активної потужності. При компенсації впливу на мережу більш «спокійних» в порівнянні з ними електроприймачів може спостерігатися ефект накладення спотворень, коли безпосередньо в точках підключення окремих приладів за допомогою компенсаторів вдається підтримувати рівень показників якості електроенергії в межах допустимих значень, але в загальних мережах спотворення підсумовуються і показники виходять за рамки норм. Таким чином, роботи з підвищення якості електроенергії в точці підключення того чи іншого електроприймача продовжують залишатися актуальними.

Мета та завдання дослідження. На основі аналізу вітчизняної та зарубіжної літератури можна зробити певні висновки та сформулювати мету і завдання дослідження.

Метою роботи є вивчення та розробка методів, структур та алгоритмів, що реалізують автоматичне керування компенсуючим пристроєм у системі електропостачання зі змінним навантаженням.

Для досягнення мети роботи необхідно вирішити такі завдання:

- розробити імітаційну модель системи електропостачання з електроприймачем, що спотворює, і компенсуючим пристроєм;
- дослідити вплив змінного навантаження на параметри роботи;
- синтезувати параметри класичного регулятора компенсуючого пристрою в системі зі змінним навантаженням, а також оцінити ефективність роботи системи управління компенсуючим пристроєм;
- виконати структурно-параметричний синтез системи керування компенсуючим пристроєм з використанням апарату нечіткої логіки;
- дослідити нечітку систему управління компенсуючим пристроєм.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених завдань були використані методи теорії електричних кіл та теорії електромагнітних процесів у системах електропостачання, методи теорії нечіткої логіки, імітаційного моделювання, сучасна теорія управління.

Отримані практичні та теоретичні результати можуть бути використані при модернізації системи електропостачання з різкозмінним навантаженням, що містить компенсуючий пристрій, або при проектуванні нового компенсуючого пристрою.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Показники якості електроенергії та їх вплив на оснащення промислових підприємств

З моменту створення енергетичних систем однією з найважливіших проблем стало забезпечення надійного та ефективного електропостачання споживачів, тому велика увага приділяється питанням електромагнітної сумісності обладнання та якості електричної енергії в точках приєднання промислових підприємств. У контексті розвитку технологій ця проблема продовжує залишатися актуальною, оскільки більшість сучасних технологічних установок можна віднести до спотворюючих електроприймачів, які чинять негативний вплив на показники якості електроенергії (ПХЕ).

Якість електроенергії регламентується в ГОСТ 32144, згідно з яким встановлюються і нормуються показники, пов'язані з характеристиками джерела живлення. За тривалістю відхилення характеристик напруги від номінальних значень поділяють на довготривалі зміни характеристик і випадкові події електричної енергії оцінюється більшою мірою за показниками, що описують тривалі зміни характеристик напруги. До них відносяться: девіація частоти Δf , відхилення напруги $\delta U_{()}$ і $\delta U_{(*)}$, короточасні дози P_{st} і тривалого P_{lt} мерехтіння, коефіцієнти гармонічної складової $K_{U(n)}$ і сумарний коефіцієнт гармонічної складової K_U , коефіцієнти несиметрії напруги на оберненій K_{2U} і нулевій послідовностей K_{0U} .

Відхилення частоти визначається різницею між значеннями основної частоти напруги f_m і номінальної частоти $f_{nom} = 50 \text{ Гц}$

$$\Delta f = f_m - f_{nom}.$$

У синхронізованих системах електроживлення Δf не повинна перевищувати $\pm 0,2 \text{ Гц}$, але допускаються короточасні відхилення до $\pm 0,4 \text{ Гц}$,

для ізолюваних систем - ± 1 Гц і ± 5 Гц відповідно.

Частота напруги в електричних мережах визначається швидкістю обертання генераторів. Однак будь-який дисбаланс між споживаною і виробленою потужністю призводить до зміни швидкості обертання роторів турбіни і, відповідно, зміни частоти мережі. Вплив цього показника на електрообладнання в основному проявляється в зниженні активної потужності в системі і зміни швидкості обертання асинхронних двигунів, що в свою чергу призводить до зниження продуктивності обладнання і збоїв в технологічному процесі [3, 14]. Так як при цьому знижується продуктивність обладнання на самій електростанції, то без регулювання цього показника ситуація може погіршитися і з'явиться ефект «частотної лавини», що в свою чергу може привести до «сходження напруги лавини» [6].

Позитивні відхилення напруги δU_0 і негативні $\delta U_{(*)}$ характеризують повільні зміни напруги і визначаються виразами

$$\delta U_{()} = \left[\frac{U_0 - U_{m()}}{U_0} \right] \cdot 100;$$

$$\delta U_{(*)} = \left[\frac{U_{m(*)} - U_0}{U_0} \right] \cdot 100.$$

де $U_{m()}$ і $U_{m(*)}$ - значення напруги живлення, менше U_0 і більше U_0 , усереднені за інтервал часу 10 хвилин, U_0 - номінальна напруга (або узгоджена напруга в мережах середньої та високої напруги). Значення δU_0 і $\delta U_{(*)}$, не повинні перевищувати 10%. Для споживачів електричної енергії значення показників $\delta U_{()}$ і $\delta U_{(*)}$ можуть встановлюватися ресурсопостачальною організацією, але значення показників визначається таким чином, щоб в точках передачі електроенергії виконувалися норми ГОСТ 32144 [34].

Відхилення рівня напруги від номінального значення навіть у допустимих межах призводить до зниження продуктивності, збільшення споживання і скорочення терміну служби практично всіх типів електроприймачів, що не може не позначитися на якості технологічних процесів [1, 3,8].

У [8, 10] представляють результати досліджень впливу відхилення

напруги в межах допустимих значень на продуктивність обладнання і виробіток на різних промислових підприємствах. Наприклад, на метизово-металургійному комбінаті зниження напруги більш ніж на 5% призводить до значного зниження продуктивності вальцювальних машин, збільшення більш ніж на 5% призводить до зниження якості продукції. Інший приклад говорить: «При відпалі заготовок з кольорових металів в печах опору загальною потужністю 675 кВт в разі зниження напруги на 7% технологічний процес тривав 5 годин замість 3 годин при номінальній напрузі. При зниженні напруги на 10% і більше технологічний процес був неможливий».

Коливання і одноразові швидкі зміни напруги призводять до появи мерехтіння. Короткочасна (вимірюється в інтервалі 10 хвилин) доза флікера P_{st} не повинна перевищувати значення 1,38, а тривала (в інтервалі 2 години) доза P_{lt} не повинна перевищувати значення 1.

Як правило, негативний вплив мерехтіння розглядається в контексті його впливу на освітлювальне обладнання і, відповідно, зір людини. Однак в [10] наведені наступні приклади впливу коливань напруги: зниження якості роботи багатоточкового зварювального апарату опору, встановленого на автомобільному заводі при збільшенні мерехтіння до 10%; зупинка синхронних двигунів, руйнування сердечників індукційних плавильних печей і поява дефектів у виробі високочастотних нагрівальних агрегатів при одночасному підключенні до загальної шини високочастотних перетворювальних установок, дугових і індукційних печей; порушення стабільного режиму роботи системи управління при підключенні печей опору до живлення через тиристорні перетворювачі і т.д.

Поодинокі швидкі зміни напруги є наслідком різкої зміни навантаження і характеризуються швидким переходом від одиничного значення напруга до іншого. Зазвичай такі зміни відбуваються в межах 4 – 5% від номінального значення, а коли рівень перевищує 10%, «їх класифікують як провали напруги або перенапруги» [2]. Вплив перепадів напруги на електрообладнання проявляється як вплив на чутливі до перешкод елементи і може призвести до

поломок обладнання [3].

Підключення споживачів з нелінійним навантаженням призводить до появи несинусоїдальної напруги. Допустимі значення несинусоїдальних значень встановлені в [2]. Значення $K_{U(n)}$ залежать від напруги в мережі і номера гармонійної складової. Нормально допустимі значення коефіцієнтів $K_{U(n)}$ для перших 21 гармонійної складових наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. – Коефіцієнти гармонічних складових $K_{U(n)}$

Порядок гармонійної складової n	Значення коефіцієнтів гармонійних складових Напруги $K_{U(n)}$, % U_1			
	Напруга електричної мережі, кВ			
	0.38	6 – 25	35	110 – 220
2	2	1.5	1	0.5
3	5	3	3	1.5
4	1	0.7	0.5	0.3
5	6	4	3	1.5
6	0.5	0.3	0.3	0.2
7	5	3	2.5	1
8	0.5	0.3	0.3	0.2
9	1.5	1	1	0.4
10	0.5	0.3	0.3	0.2
11	3.5	2	2	1
12	0.2	0.2	0.2	0.2
13	3	2	1.5	0.7
14	0.2	0.2	0.2	0.2
15	0.3	0.3	0.3	0.2
16	0.2	0.2	0.2	0.2
17	2	1.5	1	0.5
18	0.2	0.2	0.2	0.2
19	1.5	1	1	0.4
20	0.2	0.2	0.2	0.2
21	0.2	0.2	0.2	0.2

Значення непарних гармонійних складових, які не кратні 3 для $n = 23$ і вище, відповідають значенням при $n = 19$, кратні 3 для $n = 27$ і вище відповідають значенням при $n = 21$. Значення парних гармонійних складових для $n = 16$ і вище відповідають значенням при $n = 12$. Допустимі значення визначаються в 1,5 рази збільшеними нормально допустимими значеннями.

Значення коефіцієнтів K_U залежать від напруги мережі. Нормально допустимі і гранично допустимі значення наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. – Коефіцієнти сумарних гармонійних складових K_U

Значення нормальних (макс.) допустимих коефіцієнтів Складові гармонічної напруги K_U , %			
Напруга електричної мережі, кВ			
0.38	6 – 25	35	110 – 220
8 (12)	5 (8)	4 (6)	2 (3)

При несинусоїдальній напрузі в системі електропостачання з'являються додаткові втрати активної потужності, які особливо виражені в генераторах, двигунах, трансформаторах і конденсаторах. Додаткові втрати призводять до перегріву обмоток, інтенсифікують процес старіння ізоляції, впливають на похибку вимірювальних приладів і знижують якість випрямлення струму при роботі вентильних перетворювачів [3, 8].

Асиметрія напруги в трифазній системі обумовлена нерівномірним навантаженням по фазах. Тривала асиметрія виникає в результаті асиметричних коротких замикань, обривів проводів і т. Д. Довготривала асиметрія з'являється в результаті асиметрії в елементах електричних мереж (поздовжня асиметрія) або нерівномірності фазного навантаження у споживачів електричної енергії (поперечна асиметрія) в результаті використання потужних однофазних або потужні асиметричні трифазні електроприймачі [8].

Аналіз асиметрії в трифазній системі виконується шляхом визначення прямої, оберненої і нульової послідовностей напруг за допомогою методу симетричних компонент. Згідно з нормативами, встановленими в [2], коефіцієнти несиметрії напруги для обернених послідовностей K_{2U} і нуля K_{0U} не повинні перевищувати 2%, але можливі короточасні перевищення до 4%.

В результаті асиметрії відбувається зниження реактивної потужності в конденсаторних батареях і, отже, знижується ефективність їх використання, з'являються сильні вібрації обертових частин синхронних машин, що може привести до руйнування конструкції машини, скорочення терміну служби трансформаторів і т.д [9].

З метою підвищення енергоефективності підприємств особлива увага

повинна бути приділена і тому показнику, який враховує реактивну складову споживаної потужності. Цей показник не описаний в [2], але є важливим, оскільки впливає на енергозбереження та енергоефективність підприємства [4]. У [6] зазначено: «Практично всі показники якості електроенергії по напрузі залежать від реактивної енергії, споживаної промисловими електроприймачами. Тому якість електроенергії необхідно розглядати в прямому зв'язку з питаннями компенсації реактивної потужності». В результаті протікання реактивної потужності в системі електропостачання відбувається зниження рівня напруги у вузлах і збільшення втрат активної потужності в системі [2, 4, 9].

Для оцінки реактивної складової потужності використовують коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ або коефіцієнт реактивної потужності $\tan\varphi$, які визначаються за такими виразами

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}, \quad \tan\varphi = \frac{Q}{P},$$

де S - повна потужність, P - активна складова потужності, Q - реактивна складова потужності.

У таблиці 1.3 наведені допустимі діапазони коефіцієнта реактивної потужності за нормативами, встановленими в [3], і розрахований за ними діапазон $\cos\varphi$.

Таблиця 1.3 – Діапазони допустимих значень $\tan\varphi$ і $\cos\varphi$.

Рівень напруги в точці живлення споживача електричної енергії	$\tan\varphi$	$\cos\varphi$
110 кВ	0 – 0.5	0.89 – 1
35 кВ	0 – 0.4	0.92 – 1
1 – 35 кВ	0 – 0.4	0.92 – 1
менше 1 кВ	0 – 0.35	0.94 – 1

З наведених прикладів видно, що зниження якості електроенергії негативно позначається на терміні служби і режимах роботи електрообладнання промислових підприємств навіть при дотриманні норм. Тому доцільно використовувати пристрої, що дозволяють компенсувати

негативний вплив спотворюючих електроприймачів на електричні мережі та інших споживачів електричних енергій

1.2 Специфіка експлуатації електрообладнання металургійного підприємства

Будь-яке металургійне підприємство, з точки зору споживання електроенергії, можна розглядати як споживача, що значно погіршує якість електричної енергії в точці приєднання до загальної мережі. Це пов'язано з наявністю великої кількості спотворюють електроприймачів, що беруть участь в технологічному процесі. Співвідношення навантаження між ними згідно з [6] виглядає наступним чином:

– Електродвигуни	72%;
– Електротермічні приймачі	11%;
– Випрямлячі	11%;
– Зварювальні апарати	3%;
– Освітлення	3%.

У цьому розподілі більша його частина присвячена електродвигунам, які використовуються практично на кожній ділянці металургійного виробництва: в електроприводах прокатних станів, металургійних кранах, агломашинах, конвеєрах і талях, механізмах завантаження печей, поворотних і рухомих механізмах і т.д. А їх вплив на якість електроенергії оцінюється в сукупності як вплив одного механізму, в якому вони використовуються [9]. Найбільшою мірою цей ефект проявляється при роботі прокатних станів, яку можна охарактеризувати як ударну (циклічну різко чергується) навантаження [8], що викликає прогин напружень, несинусоїдальність і низький коефіцієнт потужності [3]. Збільшенню частки гармонійних складових сприяє застосування для роботи двигунів постійного струму вентильних перетворювачів, які в разі ударних навантажень також призводять до провалів

і коливань напруги [7, 9].

До електротермічних приймачів відносяться різні типи електродугових печей: дугові печі, індукційні печі і печі опору. Найбільш потужними з них є електродугові печі (ДСП), які характеризуються як електроприймачі з різко змінним характером навантаження, і їх вплив на живильні мережі проявляється в відхиленнях і коливаннях напруги, появі мерехтіння, несинусоїдальності і асиметрії [7, 9, 16, 23]. Найбільше зниження якості електроенергії проявляється в початковий період плавки, коли в піч вводиться максимальна потужність, так як цей період характеризується частими короткими замиканнями і обривами дуги [15].

У зв'язку з характером роботи і меншою потужністю, інші типи дугових печей мають менший вплив на загальну мережу, але тим не менше також вимагають установки компенсаційних пристроїв.

За аналогією з дуговими печами можна розглянути і зварювальні апарати, так як вони плавлять метал за допомогою електричної дуги. Використання інверторів і випрямлячів для забезпечення зварювальних робіт призводить до появи несинусоїдальності; застосування зварювального трансформатора – для зниження коефіцієнта потужності до 0,3 – 0,7. Крім того, запалювання електричної дуги відбувається в довільні моменти часу, тому їх також можна охарактеризувати як споживачів з нерівномірним і несиметричним навантаженням.

У порівнянні з дуговими печами, інші теплові системи мають менший вплив на якість електроенергії. Цей ефект може проявлятися, наприклад, в низькому коефіцієнті потужності (0,1 – 0,6) при використанні індукційних печей. Для підвищення цього показника використовуються компенсатори реактивної потужності, що встановлюються паралельно або послідовно з котушкою індуктивності печі. У разі однофазних печей нагріву опору можуть спостерігатися асиметрії, які частково усуваються ретельним фазним навантаженням.

Поряд з іншим електрообладнанням, що використовується на

промисловому підприємстві, освітлювальні прилади впливають на якість електроенергії, так як для освітлення в основному використовуються різні види газорозрядних ламп, пускові пристрої яких містять випрямлячі, інвертори, а також дроселі для забезпечення стабільної роботи лампи. При цьому коефіцієнт потужності може бути знижений до значення 0,5 [21]. В останні кілька років на зміну люмінесцентним лампам прийшли світлодіодні лампи з імпульсним блоком живлення. Діодні джерела світла характеризуються низьким енергоспоживанням і не містять токсичних речовин. Однак нелінійність світлодіодних джерел призводить до появи гармонійних складових напруги [13, 14].

1.3 Ефективність заходів, що проводяться на металургійних підприємствах щодо підвищення якості електроенергії

Аналізуючи види обладнання, що використовується в металургійній промисловості, можна зробити висновок, що найбільший вплив на якість електроенергії мають електродугові печі і прокатні стани. Інші типи електроприймачів не мають такого значного негативного впливу на живильних мережах, тому для зниження їх впливу на ПХЕ встановлюють групові або централізовані компенсаційні пристрої [8]. Залежно від характеру навантаження, створюваних спотворень і потужності електроустановки можуть застосовуватися різні види компенсуючих пристроїв: конденсаторні установки, шунтуючі реактори, фільтрокомпенсуючі пристрої, синхронні двигуни і т. д. [9, 11].

Для навантаження, яка споживає велику потужність і різко змінюється з часом, потрібні більш складні компенсаційні пристрої. Добре зарекомендували себе в якості таких пристроїв статичні тиристорні компенсатори (СТК) [9, 14, 15]. Багаторічний досвід їх використання на підприємствах металообробної промисловості доводить ефективну роботу СТК для стабілізації напруги, зниження мерехтіння, зменшення гармонійних складових і асиметрії,

підвищення коефіцієнта потужності. Приклад стабілізації рівня напруги при роботі ДСП наведено в [5] і наведено на рисунку 1.1.

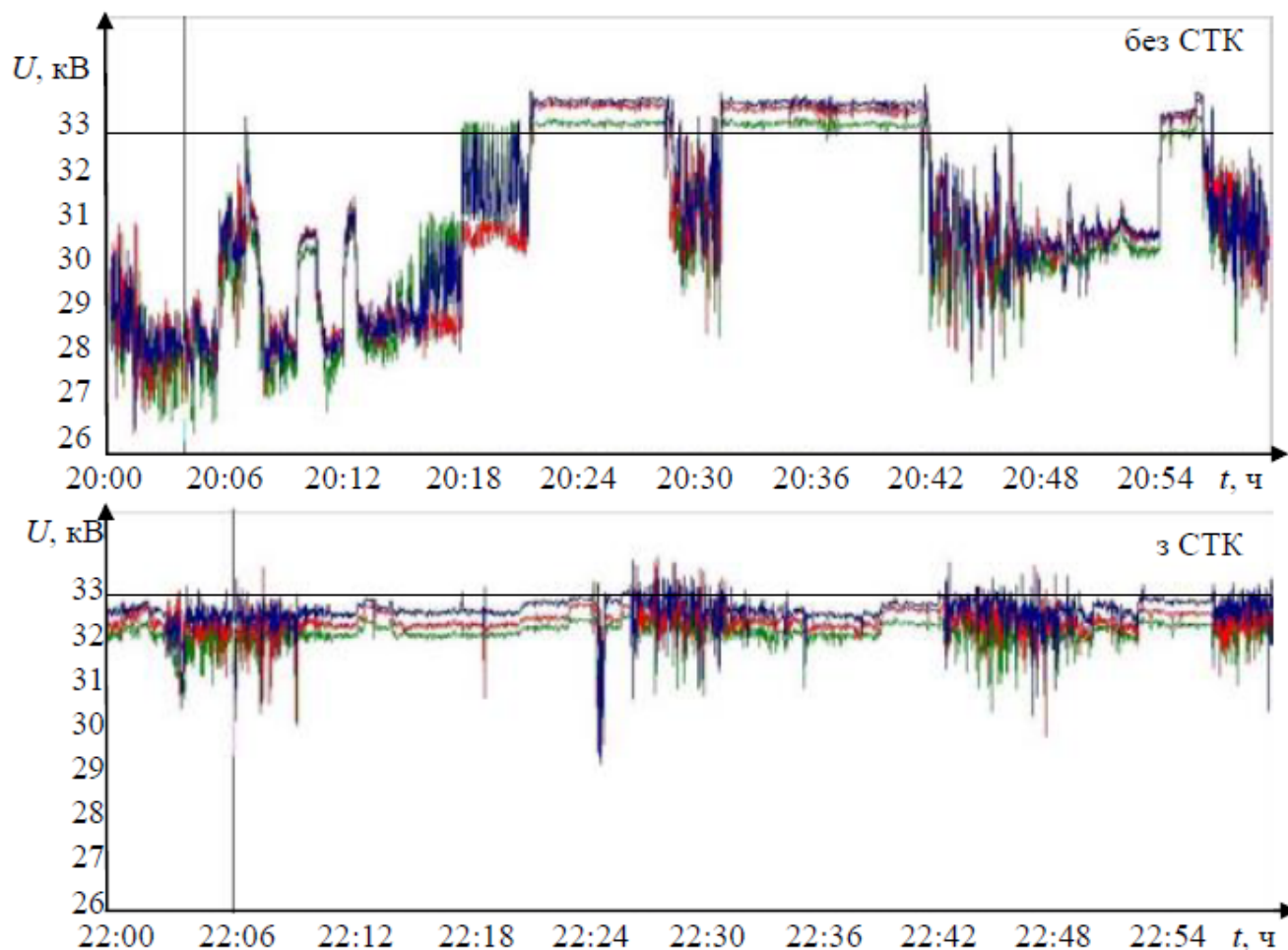
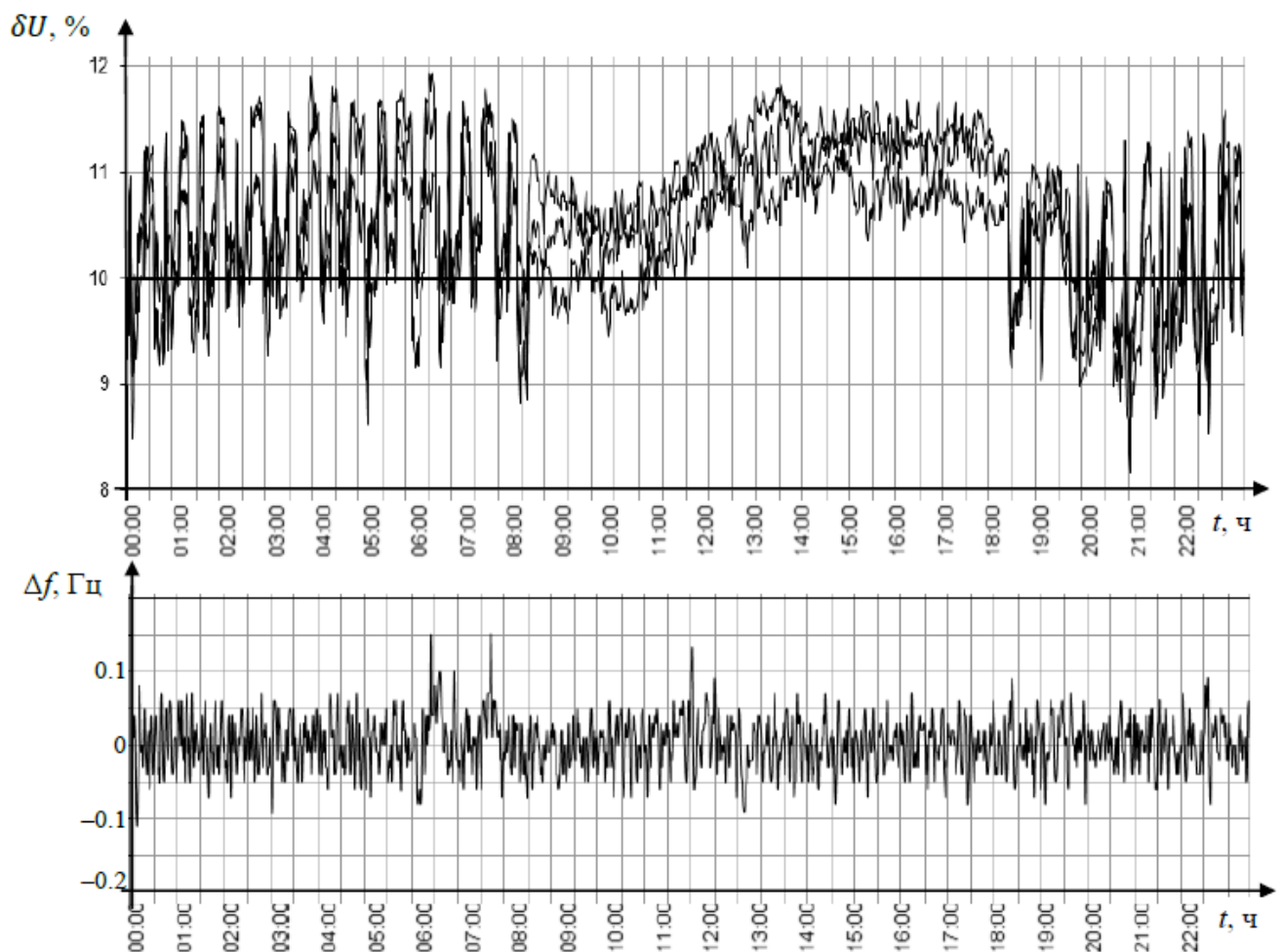


Рисунок 1.1 – Стабілізація напруги на лінії 33 кВ сталеплавильного цеху металургійного комбінату [5]

Інші компенсаційні пристрої, такі як шунтувальні реактори з комбінацією конденсаторних батарей або синхронних компенсаторів, також можуть досягти деякого поліпшення продуктивності мережі, але в порівнянні з ними СВХ дозволяє здійснювати безперервне і більш швидке регулювання для отримання необхідних показників якості електроенергії і, відповідно, забезпечує оптимальну роботу приймачів, а також знижує витрати на їх споживання електроенергії. В якості альтернативи СТК по швидкості регулювання параметрів напруги живлення можна розглядати статичний компенсатор реактивної потужності (STATCOM). Однак висока ціна даного компенсатора не завжди виправдана для використання на промислових

підприємствах. Таким чином, з урахуванням вартості монтажу, ремонтпридатності і надійності приладу, економічний ефект від використання СТК вище, ніж у інших компенсаторів.

Тим не менш, в роботі СТК можна виявити деякі недоліки. Діаграми, наведені на рисунку 1.1, показують позитивну динаміку середніх значень розглянутих параметрів в результаті роботи СТК, але при цьому видно, що сигнали залишаються нестационарними. Це пов'язано з тим, що швидкість реакції СТК недостатня при різкій зміні параметрів навантаження. Очевидно, що такі відхилення впливають також на живильні мережі та інших споживачів електроенергії, які мають загальні точки підключення з електроприймачем, що спотворює. На рисунках 1.2 – 1.4 показані результати вимірювань ПKE, виконаних на лінії 220 кВ.



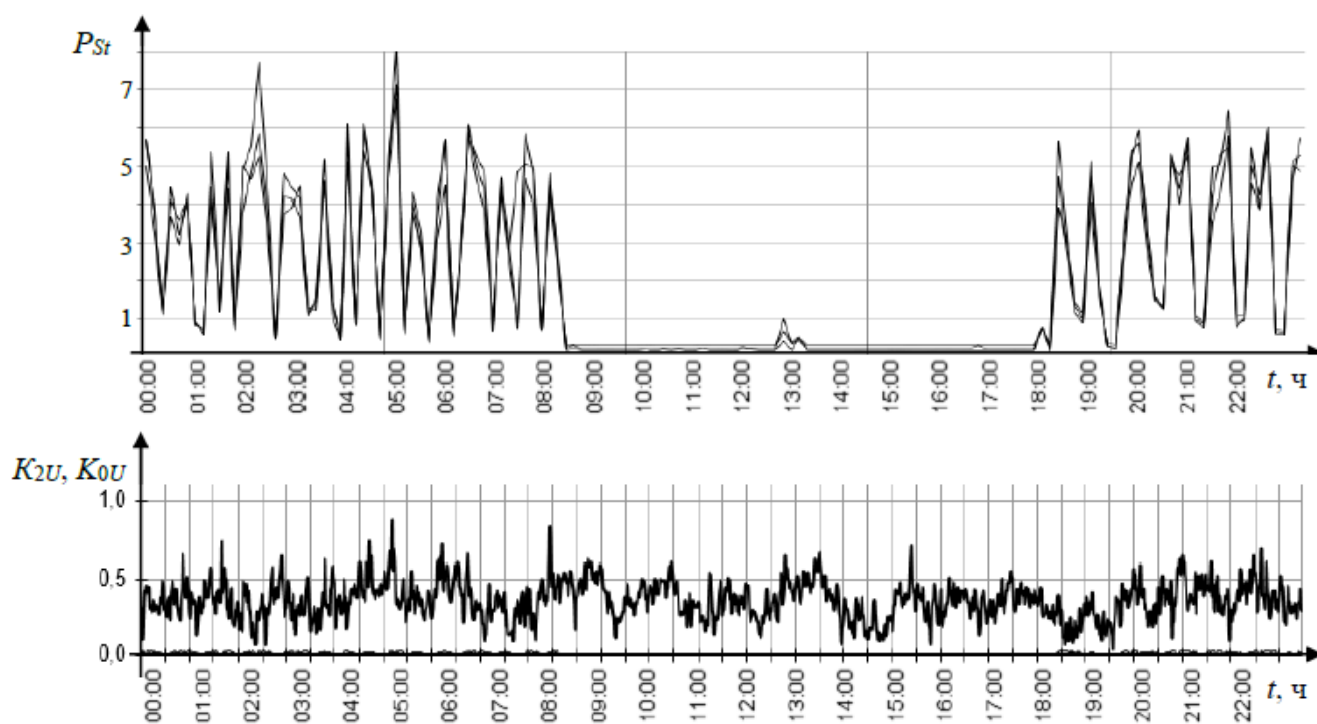


Рисунок 1.2 – Відхилення напруги і частоти, короткочасне мерехтіння дози, обернений і нульовий коефіцієнти послідовності на лінії 220 кВ

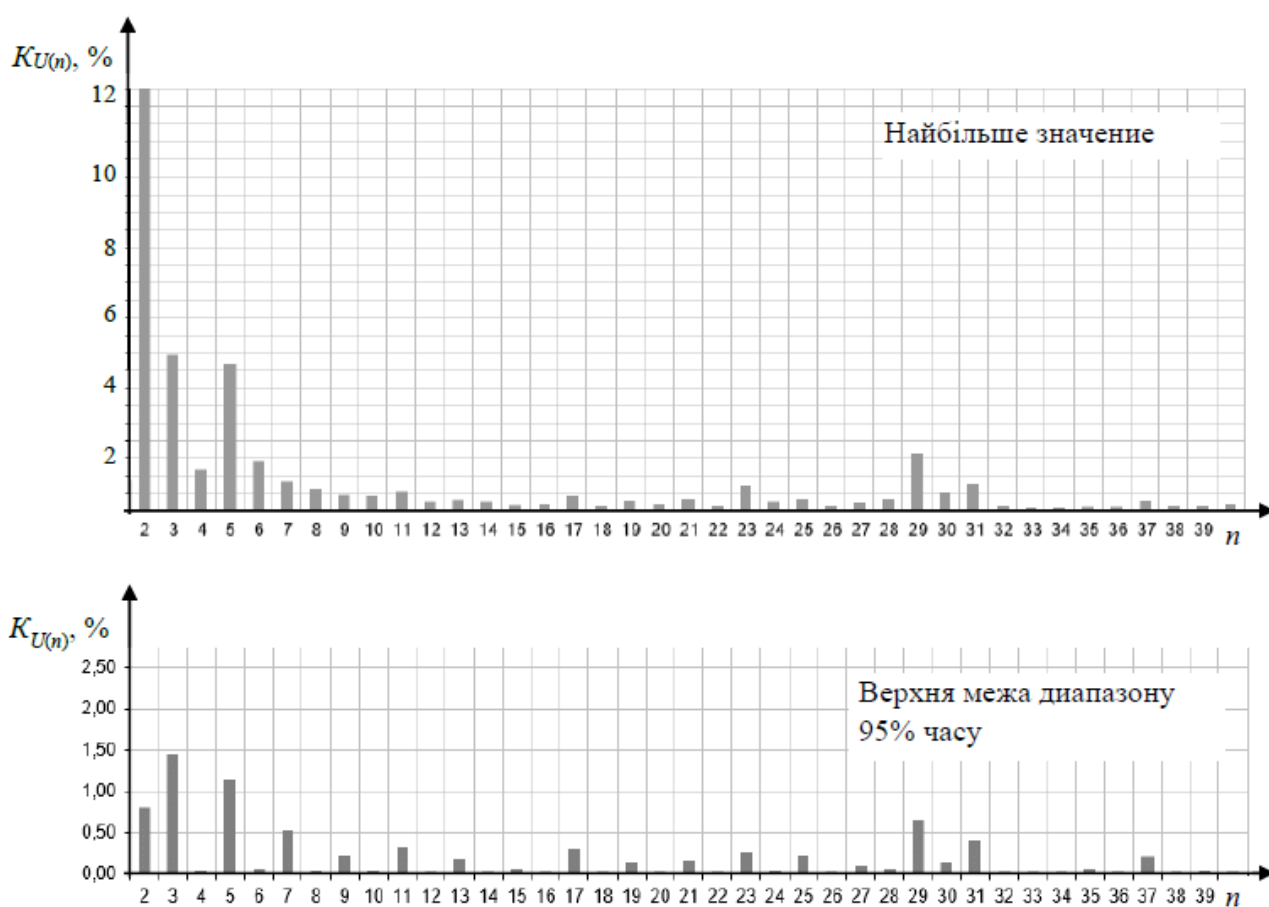


Рисунок 1.3 – Коефіцієнти гармонійних складових на лінії 220 кВ при працюючій ДСП

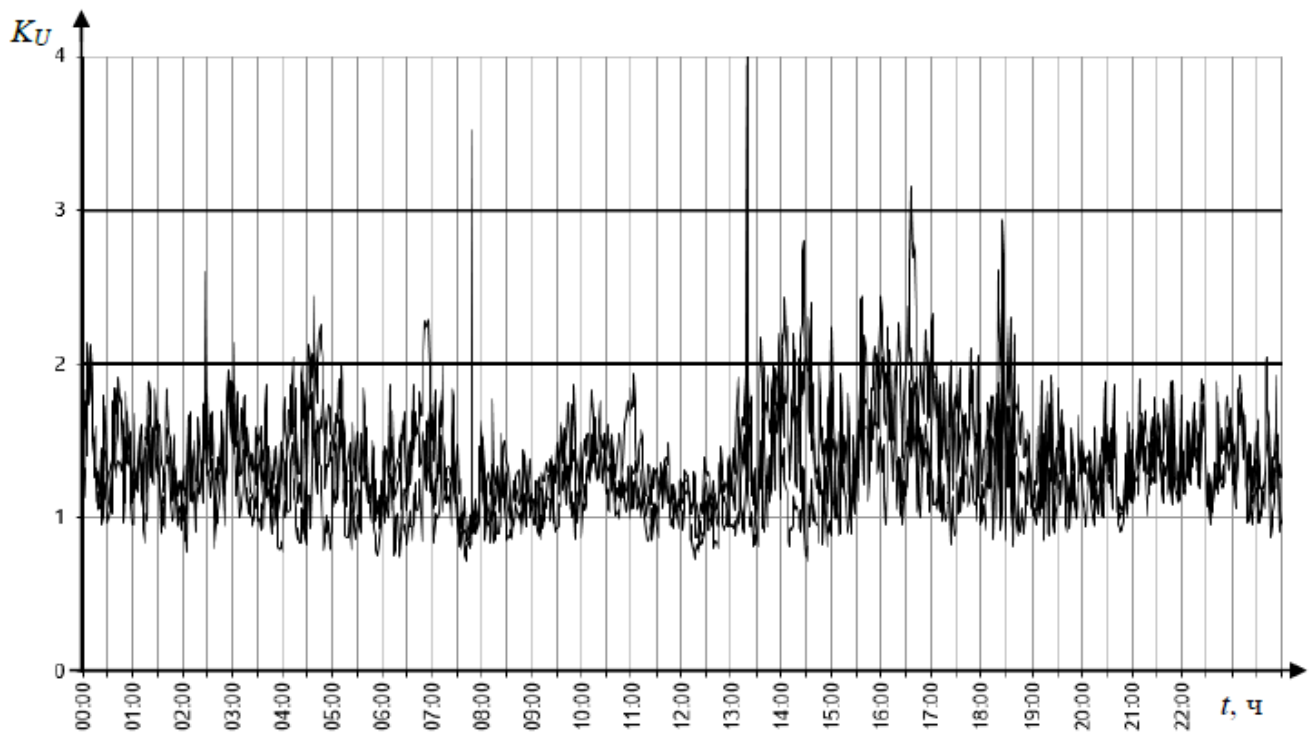


Рисунок 1.4 – Сумарний коефіцієнт гармонічних складових на лінії 220 кВ при працюючій ДСП

До лінії підключені два великих споживача. Дані були взяті під час роботи електродугової печі потужністю 120 МВт з увімкненою СТК. За результатами вимірювань можна зробити висновок, що заходи щодо поліпшення якості електроенергії, що проводяться на металургійному комбінаті, є ефективними.

Незважаючи на використання СТК для компенсації впливу ДСП на мережі, за діаграмами, наведеними на рисунку 1.2, спостерігаються сильні коливання напруги, які відповідають досить високим значенням дози мерехтіння, що перевищують допустимі більш ніж у 5 разів. При цьому можна побачити відхилення загального рівня напруги від встановленого значення на 9 – 12%, що також перевищує значення, допустимі ГОСТ 32144.

На рисунках 1.3 і 1.4 показані значення показників, що оцінюють несинусоїдальну напругу в точці приєднання металургійного заводу. За результатами порівняння значень коефіцієнтів $K_{U(n)}$ на діаграмах і в таблиці 1.1 можна побачити перевищення нормально допустимих значень для гармонік 2,

3, 5 і 29, а також значні перевищення гранично допустимих значень для гармонік 2 – 6 і 29. Порівняння значень на рисунку 1.4 і з У таблиці 1.2 наведено перевищення нормально допустимих і гранично допустимих значень сумарного коефіцієнта K_U .

При цьому слід зазначити, що вжиті на заводі заходи щодо моделювання навантаження успішно проводяться, так як коефіцієнти K_{2U} і K_{0U} , які використовуються для оцінки асиметрії в трифазній системі, не перевищують рівня, що відповідає 1/2 від нормально допустимого значення. Гарне значення для електричного приймача, такого як електричний приймач, такий як електродугова піч.

1.4 Шляхи підвищення якості електроенергії в точці підключення металургійного підприємства

Як було показано вище, проблема якості електроенергії в металургійній галузі продовжує залишатися актуальною. В даний час існує кілька підходів до вирішення цієї проблеми [8, 15]:

- оптимізація режимів роботи електроприймачів;
- модернізація схем приладів;
- оптимізація алгоритмів роботи системи управління компенсатором.

Заходи щодо оптимізації режимів роботи електроприймачів в першу чергу спрямовані на зниження енергоспоживання і підвищення економічної ефективності агрегату. Однак такий підхід також дає можливість нормалізувати показники якості електроенергії.

Наприклад, з метою підвищення економічної ефективності електродугових печей для нагріву шихти використовується теплота відпрацьованих газів та інших джерел енергії, зменшуються втрати тепла через футеровку печі, операції рафінування та нагрівання приурочені до температури нагнітання, конструкція шин печі оптимізована для зниження реактивного опору, досягається стабільне горіння електричних дуг з метою зниження

витрат на споживання електроенергії, та, В результаті знижується собівартість продукції. Але вжиті заходи також дозволяють знизити втрати активної потужності, відхилення і коливання напруги [7, 9].

Прикладами заходів щодо оптимізації режимів роботи можна назвати складання графіків паралельної дугової плавки, що дозволяє відокремити в часі найбільш складні періоди плавлення [6], поділ операцій на ливарної лінії з урахуванням паралельного включення дугової печі [13, 14], удосконалення алгоритмів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для частотних перетворювачів електроприводів прокатних станів [7, 9, 11] та інші.

Модернізація схем пристроїв передбачає використання нових апаратних рішень для існуючих систем електропостачання. Наприклад, в роботах [10, 17] показана розробка реакторно-тиристорного регулятора напруги, підключеного до первинної обмотки пічного трансформатора.

Третій спосіб поліпшення якості електроенергії в точці підключення компенсатора полягає *в оптимізації алгоритмів* роботи самого компенсатора для збільшення його швидкодії і стабілізації електромагнітних процесів [5].

Оптимальна робота будь-якого компенсуючого пристрою вимагає своєчасного контролю цього пристрою відповідно до змін електричних параметрів мережі. Залежно від типу компенсатора і поставлених завдань спосіб управління буде відрізнятися, перш за все, типом контрольного знака. Згідно з [13, 16], керуючий сигнал може бути сформований:

- за потужністю (повна, активна або реактивна);
- по напрузі в точці підключення компенсуючого пристрою;
- годинниковий пристрій для регулювання часу доби;
- технологічний алгоритм (або механізм) в залежності від режиму роботи приймачів;
- Комбінація перерахованих вище.

Для приймачів зі стаціонарним навантаженням, але низьким коефіцієнтом потужності можливе застосування нерегульованих індивідуальних компенсаційних пристроїв, які включаються і вимикаються

одночасно з електроприймачем. Однак часто більш раціональним з економічної точки зору виявляється використання компенсаторів для групи приймачів (цехів). При цьому найпростішим способом управління пристроєм є його своєчасне включення (перемикання) відповідно до добового графіка навантаження або за сигналом перемикання режимів роботи приймачів. Пристрої компенсації потужності або напруги управляються в разі нестационарної роботи електроприймачів, наприклад, електродугової печі і прокатного стану.

Електродугові печі та прокатні стани є найскладнішими електричними вимикачами, тому основна увага дослідників приділяється системам управління пристроями, які зменшують вплив цих приймачів на електромережі та інших споживачів ЕЕ. До таких пристроїв відносяться СТК і СТАТКОМ. У роботах [7, 16, 17] розглядаються різні варіанти систем управління цими компенсаторами. Однак більшість алгоритмів, реалізованих в цих СУ, засновані на класичних ПІ і ПІД контролерах [15].

В даний час встановлено, що використання штучного інтелекту в системах управління технічними пристроями дозволяє підвищити швидкодію систем управління і їх стійкість [5, 7, 15]. У той же час результати аналізу заходів щодо підвищення ЕК, представлені у пунктів 1.3, показують необхідність підвищення цих характеристик СД за допомогою компенсуючих пристроїв.

У роботах [1, 2, 4 – 6, 12] розглядається застосування нечіткої логіки в системах управління СТК і СТАТКОМ. Однак в цих роботах в основному розглядається використання компенсаторів в системах розподілу і передачі електроенергії. Алгоритми роботи таких систем управління налаштовані на збільшення пропускної здатності ліній електропередач і гасіння коливань частоти мережі, тому не відповідають вимогам, які пред'являються до пристроїв компенсації різко чергуються навантажень на металургійних підприємствах.

Висновки до розділу:

На підставі огляду літературних джерел можна зробити такі висновки:

Якість електроенергії впливає на режими роботи, якість технологічного процесу і термін служби електрообладнання промислових підприємств. Відхилення показників якості від встановлених значень призводять до негативних наслідків навіть при дотриманні норм, встановлених в ГОСТ 32144 – 2013.

На підприємствах металургійної промисловості використовується велика кількість спотворюючих електроприймачів, режими роботи яких призводять до відхилень і коливань напруги, асиметрії, несинусоїдальності і низької до коефіцієнта потужності. Електричні мережі та інші споживачі найбільше страждають від електродугових печей та прокатних станів.

Для компенсації ефекту спотворюючих електроприймачів на металургійних підприємствах застосовують різні види компенсуючих пристроїв. Однак результати вимірювань на лінії, з якої живиться металоккомбінат, свідчать про те, що прилади, які використовуються для стабілізації рівня напруги, недостатньо ефективні.

РОЗДІЛ 2

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СТК В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ

2.1. Розробка імітаційної моделі системи електропостачання металургійного підприємства

Розробка нових принципів управління системою компенсації реактивної потужності на металургійному підприємстві передбачає велику кількість експериментів. Мається на увазі вплив на параметри технологічного процесу, що не завжди прийнятно. Тому завдання розробки і вивчення принципів управління доцільно перенести в область математичного моделювання. В якості середовища моделювання була обрана система MatLab. Однією з переваг даної системи є можливість візуального моделювання з використанням готових функціональних блоків. Зокрема, в подальшому для моделювання роботи електричних пристроїв використовувалися блоки бібліотеки SimSape/SimPowerSystem.

У загальному випадку схема включення СТК в систему електропостачання підприємства така, як показано на рисунку 2.1.

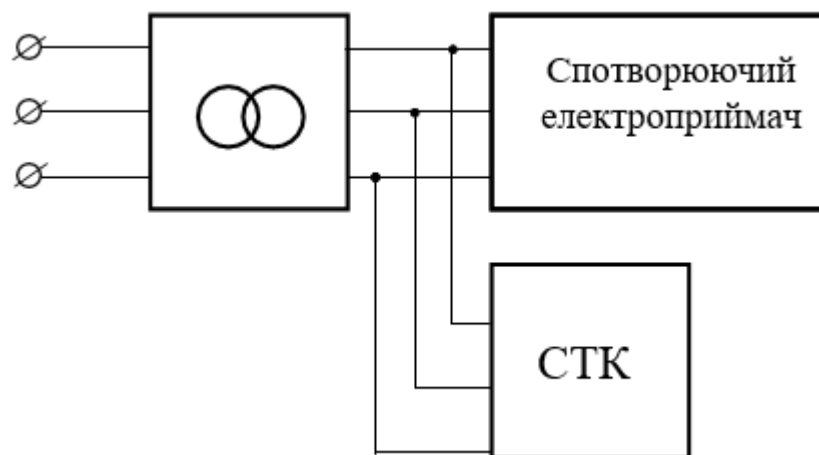


Рисунок 2.1 – Схема включення СТК

Як було показано вище, одним з центральних електроприймачів

металургійного підприємства, технологічною особливістю якого є різко змінний характер навантаження, є електродугова піч. Інтегральні характеристики негативного впливу даного виду навантаження на живильні мережі наведені в першому розділі. Але для того, щоб виявити характер зміни навантаження на конкретний показник якості електроенергії, виявити граничні значення, швидкість зміни спотворень, доцільно мати імітаційну модель системи електропостачання, яка найбільш повно враховує характерні особливості технологічного процесу плавлення. Функціональна схема імітаційної моделі системи електропостачання підприємства наведена на рисунку 2.2 [9, 10]. Живлення ДСП здійснюється від лінії напругою 220 кВ через мережевий і пічний трансформатори, як показано на функціональній схемі. Мережевий трансформатор потужністю 160 МВА знижує напругу до 35 кВ і має кілька перемикальних каскадів, основним завданням яких є підтримання необхідного рівня напруги на нижній стороні трансформатора.

Пічний трансформатор потужністю 120 МВА знижує напругу з 35 кВ до рівня, що визначається вимогами процесу плавлення і має 18 ступенів перемикання, які дозволяють змінювати напругу на зниженій стороні від 600 до 1200 В.

Стабільне горіння електричної дуги в печі забезпечується за рахунок підтримки необхідного рівня реактивного опору. Для цього в одній будівлі з трансформатором печі роблять 6-ступінчастий реактор. У імітаційній моделі реактор представлений у вигляді трифазного ряду активних і індуктивних елементів.

Імітаційна модель також враховує активно-індуктивний характер живильної лінії 220 кВ і дротової лінії між трансформаторами, а також взаємну індуктивність між шинами електродів ДСП.

В основу моделі статичного тиристорного компенсатора в MatLab лягла модель, розроблена Power System Laboratory, IREQ Hydro-Quebec (Pierre Giroux, Gilbert Sybille) [7].

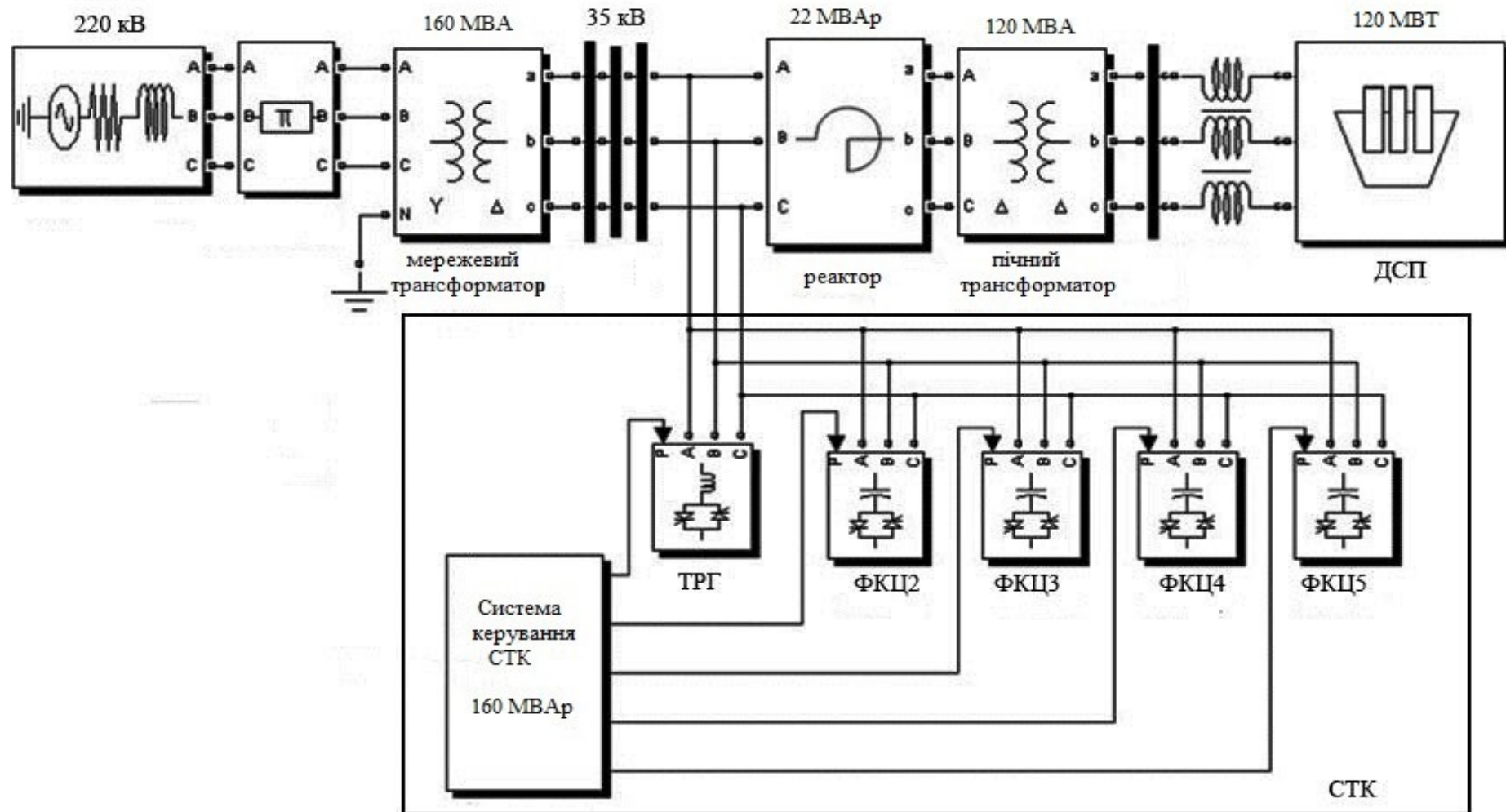


Рисунок 2.2 – Схема імітаційної моделі системи електропостачання цеху металургійного підприємства з електродуговою піччю і статичним тиристорним компенсатором

При цьому для отримання моделі, що відповідає розглянутому випадку, необхідно було збільшити число блоків фільтрокомпенсуючих ланцюгів (ФКЛ) і змінити параметри всіх агрегатів таким чином, щоб отримати необхідні значення потужності.

2.2 Розробка математичної моделі дугової сталеплавильної печі

Математичному опису процесів, що протікають в електродугових печах, приділяється велика увага і значна кількість наукових праць присвячена [8, 9, 12, 14]. Слід уточнити, що в залежності від кінцевих цілей дослідників ці описи можуть сильно відрізнятися один від одного. Пояснюється це тим, що під час плавлення металу в ДСП відбуваються процеси різної фізичної природи: термічні, хімічні, аеродинамічні, електромагнітні. Опис всіх цих процесів в одній математичній моделі призвело б до її значного ускладнення, і, як наслідок, до значних витрат машинного часу, необхідного для обробки такої моделі. Але так як всі процеси в печі взаємопов'язані, то на практиці часто вдаються до виявлення конкретних складових процесів і опису ДСП з їх допомогою.

Наприклад, в роботах І.М. Ячикова металургійний розплав розглядається як струмоведуча рідина і описується рівняннями магнітогідродинаміки для дослідження електровихрових потоків у ванні розплаву [16]. У роботі Е.М. Костилюєвої увага приділяється характеристикам магнітного поля біля електродів печі та їх впливу на навколишнє середовище, тому модель складена на основі рівнянь, що описують електромагнітне поле з урахуванням геометричного розташування електроди [22]. У роботі Р.А. Бікеева [16] розглядається векторне поле струмів провідності (в електродах і стінках свердловин) і струмів, індукованих в заряді при взаємодії електромагнітних полів в трифазній системі. Отримана модель дозволяє враховувати виділення енергії в робочому просторі ДСП.

У розглянутій системі електроживлення ДСП технологічні особливості в

роботі печі, які пов'язані з електричними режимами плавки, виступають в якості збурюючих факторів, що впливають на якісні показники системи. Очевидно, що в даному випадку з усього різноманіття наявних математичних описів процесів в ДСП необхідно виділити ті, які пов'язані з електричними параметрами системи.

Математична модель динамічної вольт-амперної характеристики електричної дуги може бути реалізована або за допомогою наближених аналітичних залежностей, або за допомогою набору станів (точок) $\{u_D, i_D\}$ експериментальних кривих.

Моделювання електричної дуги на основі аналітичних виразів є досить поширеним. Зокрема, [45] показані переваги використання моделі електричної дуги на основі рівняння Кассі для оцінки електричного режиму на різних стадіях плавлення.

При використанні моделей на основі аналітичних виразів і моделей, що реалізують динамічний ВАХ з безліччю постійно мінливих станів, важко проаналізувати перехідні процеси, що виникають в електричній частині системи при зміні будь-якого параметра в ДСП. Для цих цілей найбільш підходящими моделями є ті, які реалізують певний стан $\{u_{Dk}, i_{Dk}\}$ з набору можливих станів $\{u_D, i_D\}$, відповідної ВАХ дуги.

Згідно з формулою Айртона, напруга електричної дуги визначається як

$$u_D = \alpha + \beta l_D,$$

де l_D – довжина електричної дуги, α і β – коефіцієнти, що залежать від складу газів всередині печі та від матеріалу електродів.

Тоді залежність між параметрами дуги може бути виражена співвідношенням

$$R_D = \frac{u_D}{i_D} = \frac{\alpha + \beta l_D}{i_D}.$$

Тому при складанні імітаційної моделі був розглянутий інший підхід до моделювання дугової печі, який передбачає використання схеми заміни

електричного кола печі. В цілому схема підстановки наведена на малюнку 2.7, більш детальний опис розглянуто в [17].

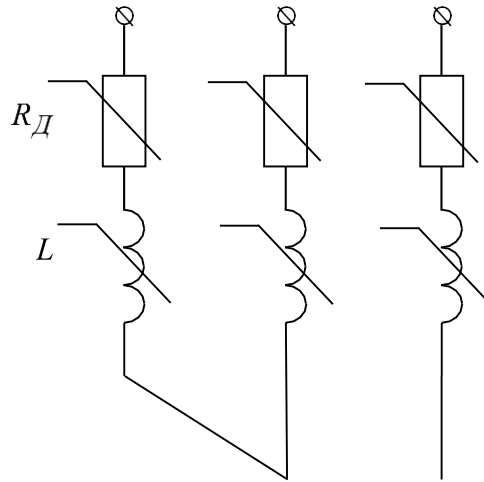


Рисунок 2.7 – Електрична схема заміщення електродугової печі

Приклади використання електричної схеми заміщення для моделювання дугової печі можна побачити в [18, 22, 23]. У цих прикладах деякі дослідники вважають за можливе не враховувати взаємний вплив шинопроводів один на одного з метою спрощення розрахунків [13, 22]. Однак для повного аналізу впливу роботи ДСП на електричні параметри системи електропостачання бажаний більш повний опис електричної частини системи.

Виходячи зі схеми заміни електричних кіл печі, за законами Кірхгофа можна скласти наступну систему рівнянь

$$\begin{aligned}
 u_{ab}(t) &= L_{kca} \frac{di_a}{dt} + M_{ab} \frac{di_b}{dt} + M_{ca} \frac{di_c}{dt} + R_{kca} i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + R_{Da} i_a - R_{Db} i_b - \\
 &\quad - L_b \frac{di_b}{dt} - R_{kcb} i_b - M_{ab} \frac{di_a}{dt} - M_{bc} \frac{di_c}{dt} - L_{kcb} \frac{di_b}{dt}; \\
 u_{bc}(t) &= L_{kcb} \frac{di_b}{dt} + M_{ab} \frac{di_a}{dt} + M_{bc} \frac{di_c}{dt} + R_{kcb} i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + R_{Db} i_b - R_{Dc} i_c - \\
 &\quad - L_c \frac{di_c}{dt} - R_{kcc} i_c - M_{ac} \frac{di_a}{dt} - M_{bc} \frac{di_b}{dt} - L_{kcc} \frac{di_c}{dt}; \\
 u_{ca}(t) &= L_{kcc} \frac{di_c}{dt} + M_{ca} \frac{di_a}{dt} + M_{bc} \frac{di_b}{dt} + R_{kcc} i_c + L_c \frac{di_c}{dt} + R_{Dc} i_c - R_{Da} i_a - \\
 &\quad - L_a \frac{di_a}{dt} - R_{kca} i_a - M_{ab} \frac{di_b}{dt} - M_{ca} \frac{di_c}{dt} - L_{kca} \frac{di_b}{dt}; \\
 i_a + i_b + i_c &= 0,
 \end{aligned}$$

У середовищі MatLab ця система рівнянь може бути реалізована з використанням будівельних блоків бібліотеки SimPowerSystems [23, 24]. У цьому випадку коротка мережа моделюється за допомогою блоку взаємної індуктивності (рисунок 2.2), а для моделювання змінного опору з можливістю зміни параметрів у процесі розрахунків представляємо активний опір R_D у вигляді суми двох складових

$$R_D = R_c + R_v,$$

де R_c , R_v – постійна і змінна складові опору дуги.

Згідно з теоремою підстановки з теорії електричних кіл, змінна складова опору R_v з напругою u_v може бути замінений еквівалентним джерелом напруги (рисунок 2.9).

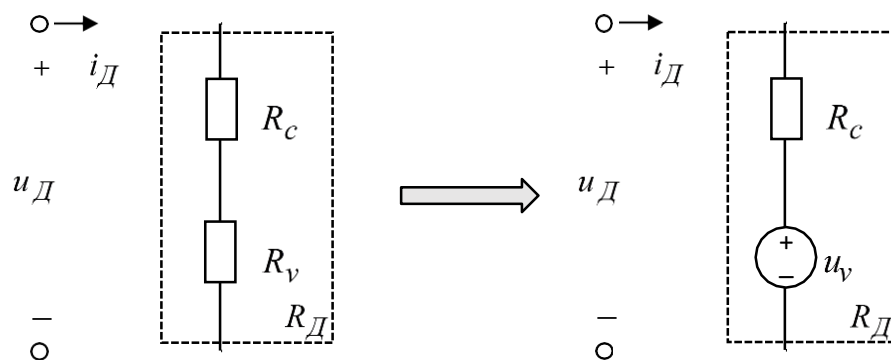


Рисунок 2.9 – Схема еквівалентного змінного опору

Якщо задати $R_D = kR_c$, то

$$u_D = i_D R_D = i_D (R_c + R_v) = i_D R_c + u_v = \frac{u_D}{R_D} R_c + u_v = \frac{u_D}{kR_c} R_c + u_v,$$

Тоді

$$u_v = \frac{k-1}{k} u_D.$$

Таке представлення дозволяє варіювати значення опору R_D в моделі шляхом установки значення k за допомогою вхідного сигналу. Модель змінного опору показана на малюнку 2.10. Аналогічним способом можна

отримати модель змінного індуктивного опору (рисунок 2.11).

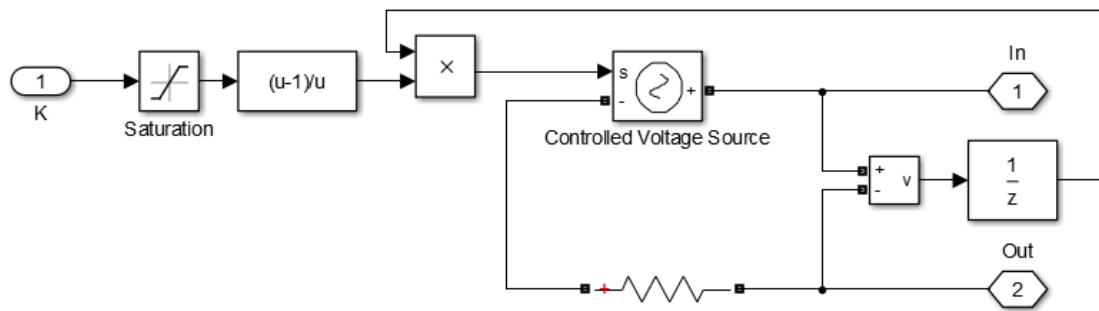


Рисунок 2.10 – Модель змінного активного опору в MatLab

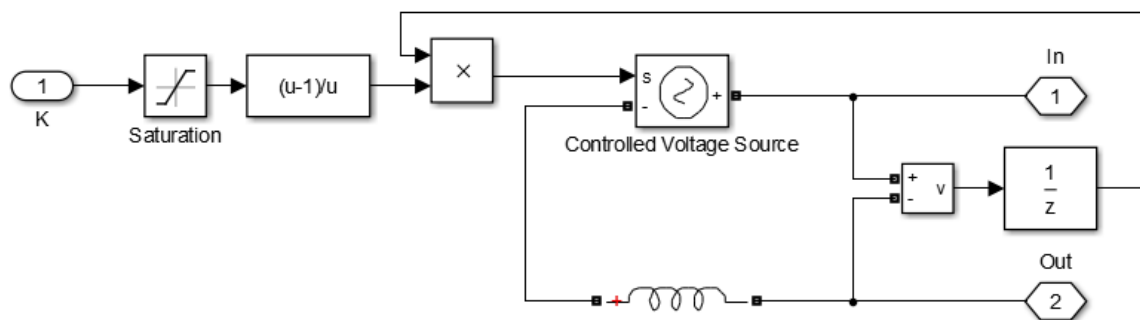


Рисунок 2.11 – Модель зі змінною індуктивністю в MatLab

На рисунку 2.12 показана модель трифазної дугової печі, що складається зі змінних активних і індуктивних опорів [23, 24].

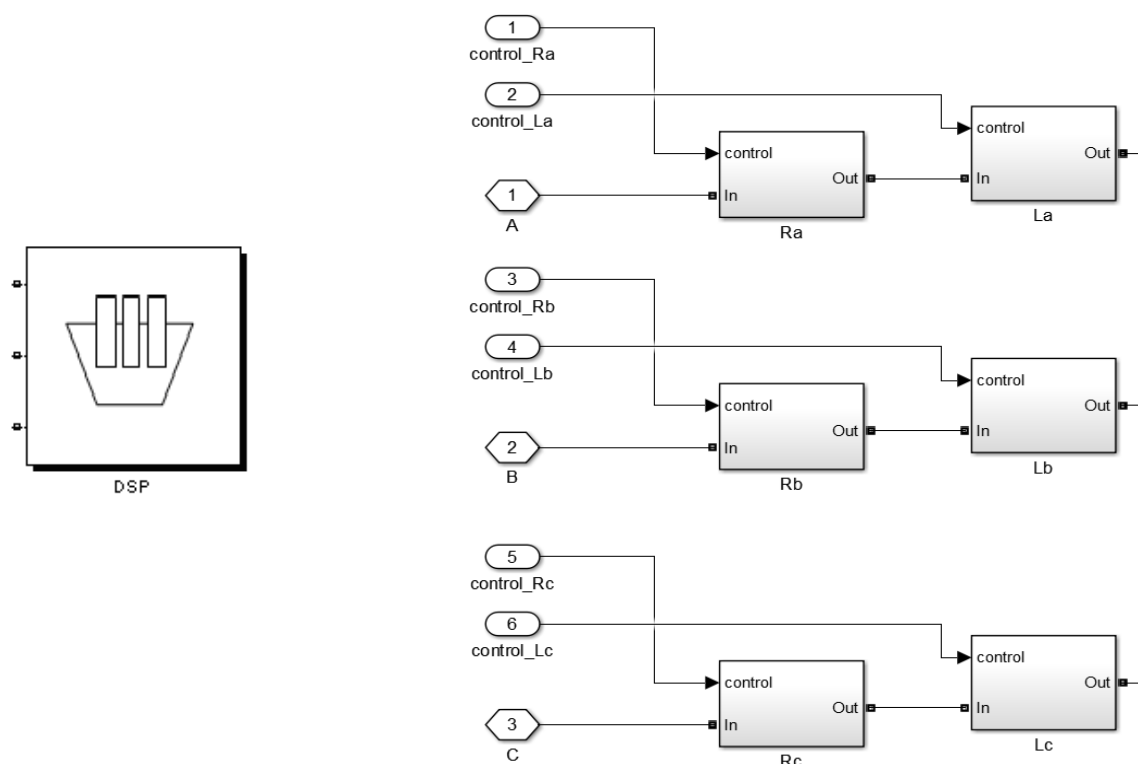
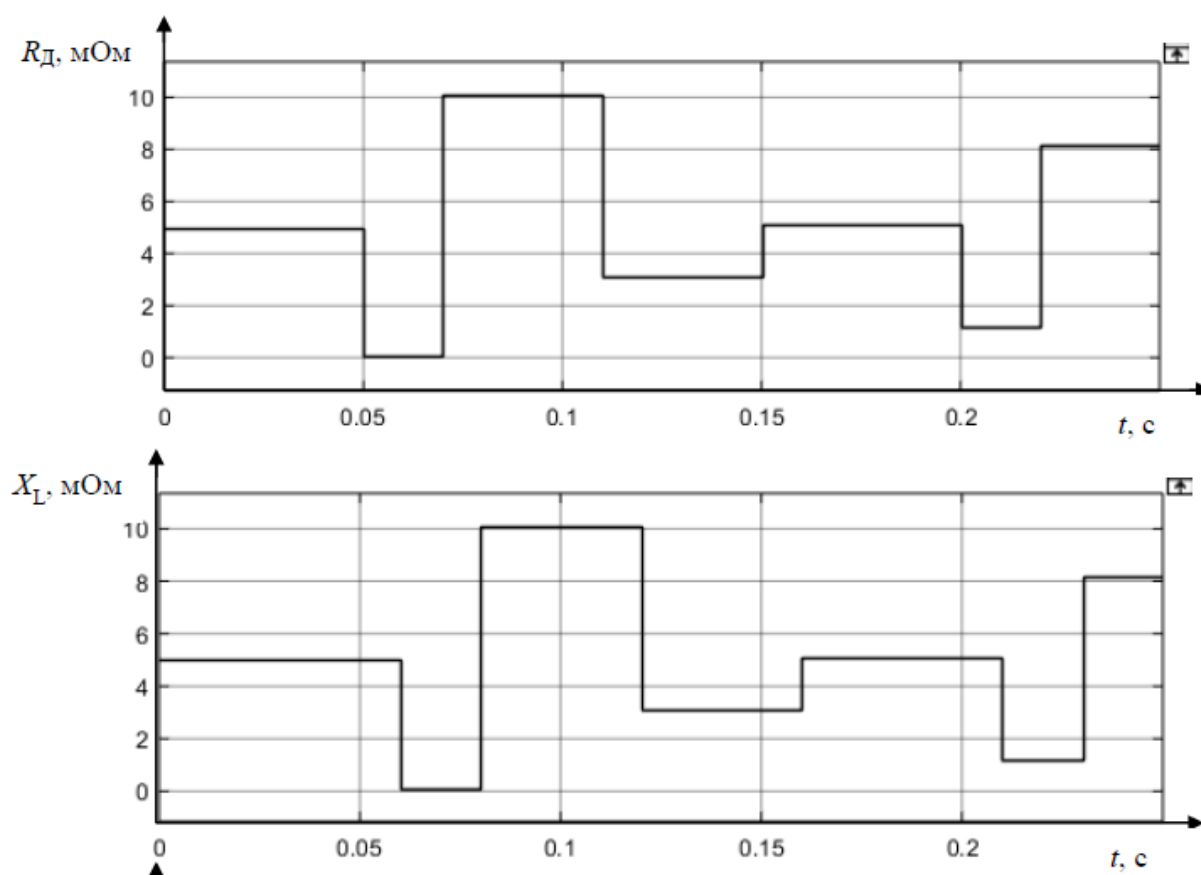


Рисунок 2.12 – Модель дугової печі в середовищі MatLab



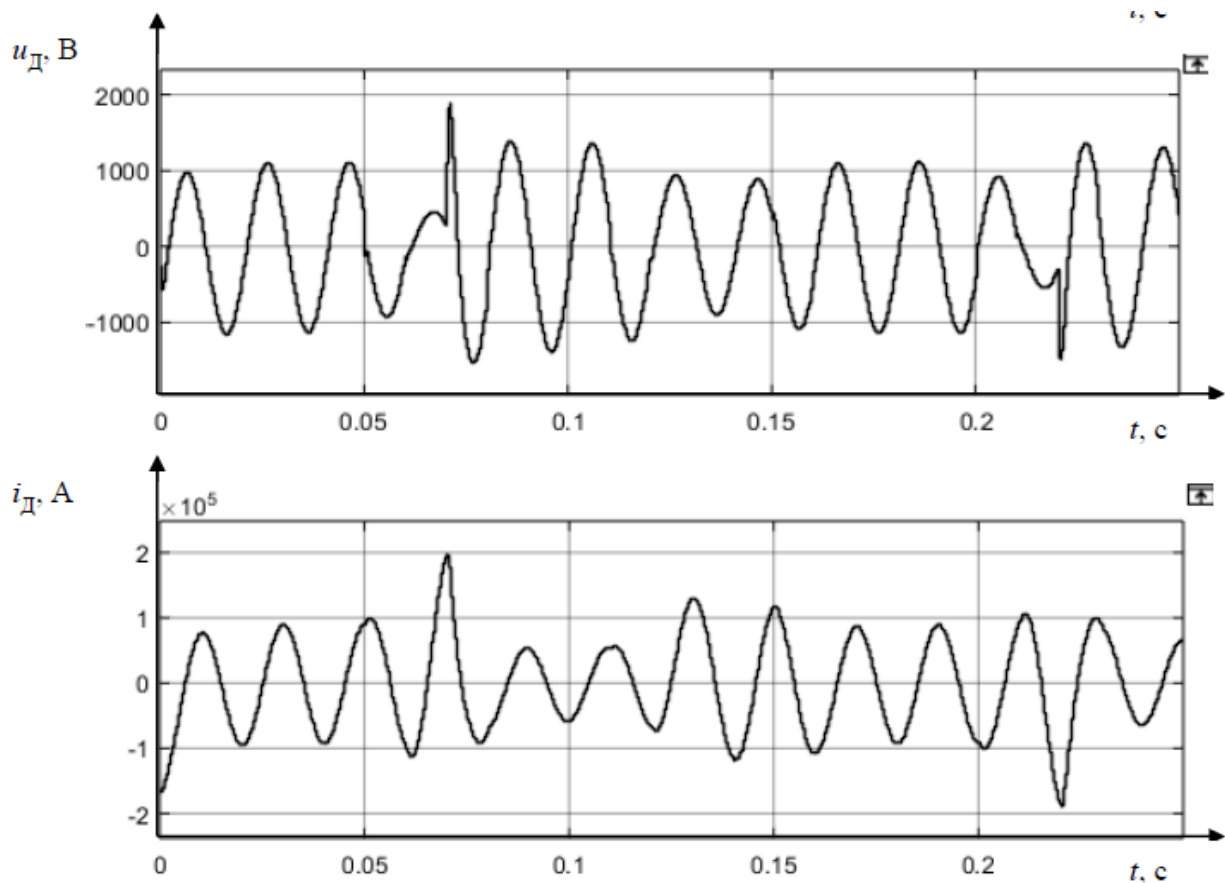


Рисунок. 2.15 – Результати моделювання електродугової печі за схемою електрозаміщення зі змінними опорами

На рисунку 2.15 показані результати моделювання змінних активних і індуктивних імпедансів в трифазній симетричній системі, зібраної за схемою з малюнка 2.2 при відключеному СТК. У розглянутих прикладах частота зміни параметрів відповідає частоті зміни параметрів в ДСП, що працює на максимальній потужності.

Очевидно, що така зміна параметрів лише наближається до зміни параметрів в реальній дуговій печі. Однак таке уявлення дозволяє змодельовати імпульсні скачки напруги і струму, характерні для печі, що працює на максимальній потужності.

2.3 Дослідження впливу змінного навантаження на мережі живлення в системі без компенсатора

Для повного аналізу використання компенсуючого пристрою в системі

електропостачання зі змінним навантаженням необхідно попередньо оцінити вплив цього навантаження на систему [20]. Для вимірювання електричних параметрів в моделі системи електропостачання цеху з ДСП і СТК (рис. 2.2) були визначені дві точки підключення вимірювальних приладів: на лінії 35 кВ в точці приєднання СТК і на висновках обмотки трансформатора печі.

Для вимірювання параметрів трифазної системи MatLab використовує блоки *Three-Phase V-I Measurement*. На моделі було виміряно фактичні значення лінійних напружень (U_{35} і U_{dsp}) і струмів (I_{35} і I_{dsp}) у визначених точках у відносних одиницях (в.о., pu), а також значення їх початкових фаз (α_{I35} , α_{U35} і α_{Idsp} , α_{Udsp}).

При моделюванні в MatLab блоки електричних пристроїв розглядаються як навантажувальні елементи, що споживають деяку потужність S_k , залежність якої від імпедансу z_k даного пристрою можна описати виразом:

$$S_k = \frac{U^2}{z_k}.$$

Тобто зменшення опору z_k призводить до збільшення потужності S_k , споживаної елементом. Це означає, що на всі параметри системи в більшій мірі впливають мінімальні значення активного і реактивного опору.

У реальній системі зміна електричного опору печі в нормальних робочих режимах здійснюється в наступних межах: для активного опору R_d від 3 до 87 мОм; для індуктивного опору X_L від 5 до 12 мОм. Однак, оскільки в імітаційній моделі системи електроживлення трифазний джерельний блок забезпечує стабільну потужність, чого немає в реальній системі, то в моделі необхідно розширити діапазон можливих значень опору печі і врахувати вона становить від 1 мОм для R_d і від 1,7 мОм для X_L . Крім того, необхідно враховувати можливість роботи дугової печі на підвищеній потужності і вводити значення від 0,1 мОм в зазначений діапазон R_d .

Тому з можливих діапазонів значень R_d і X_L для дослідження впливу навантаження на систему електропостачання були обрані наступні точки:

$$R_D = [0,1; 1; 3; 5; 7; 9; 11; 21; 35; 80] \text{ мОм};$$

$$X_L = [1,7; 5; 9; 12] \text{ мОм}.$$

У системі живлення електродугової печі також спостерігається зміна імпедансу за рахунок перемикання ступенів трансформатора печі і реактора.

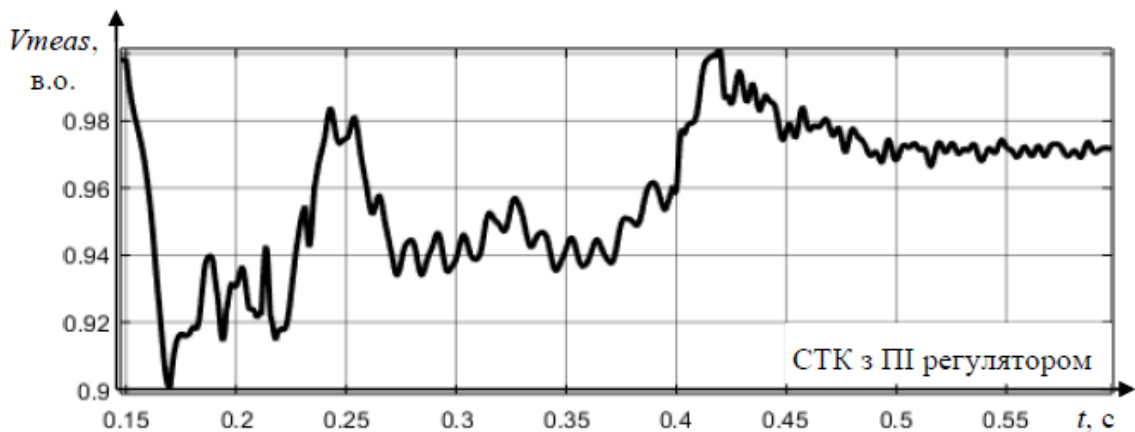
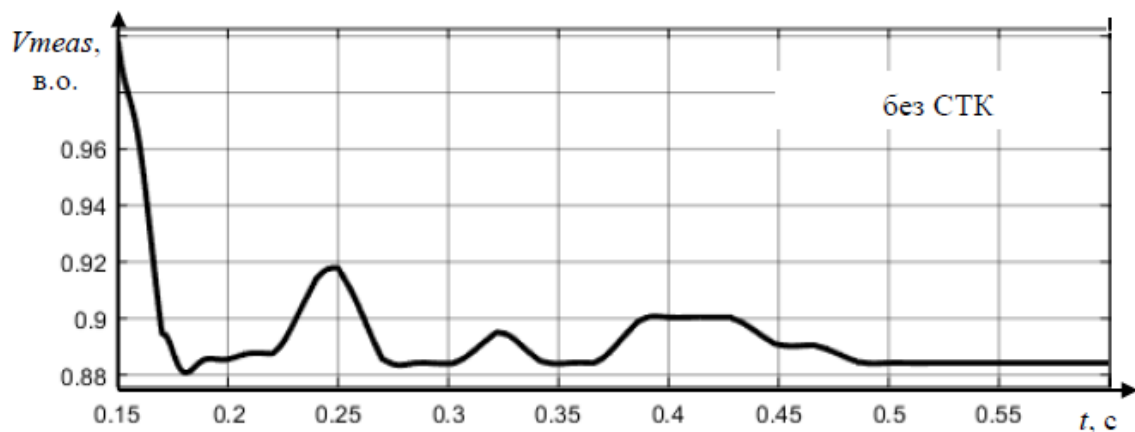
Ступені, які були обрані для проведення досліджень на моделі, показані у таблицях 2.1. і 2.2.

Таблиця 2.1. – Параметри ступенів реактора в моделі MatLab

Ступінь, № (№ ступіні)	R_D , мОм	X_L , мОм
1 (2)	3,2	768,7
2 (4)	4,3	1246,6
3 (6)	5,3	1847,6

Таблиця 2.2. – Параметри ступенів трансформатора в моделі MatLab

Ступінь, № (№ ступіні)	U_2 , В (в.о.)	$R_{об}$, мОм	$X_{Loб}$, мОм.	$R_{магн}$, кОм.	$X_{Lмагн}$, кОм.
1 (14)	1021 (0,85)	0,108	2,19	76,500	58,076
2 (16)	1104 (0,92)	0,072	1,87	62,240	28,043
3 (18)	1200 (1)	0,072	1,51	49,643	15,743



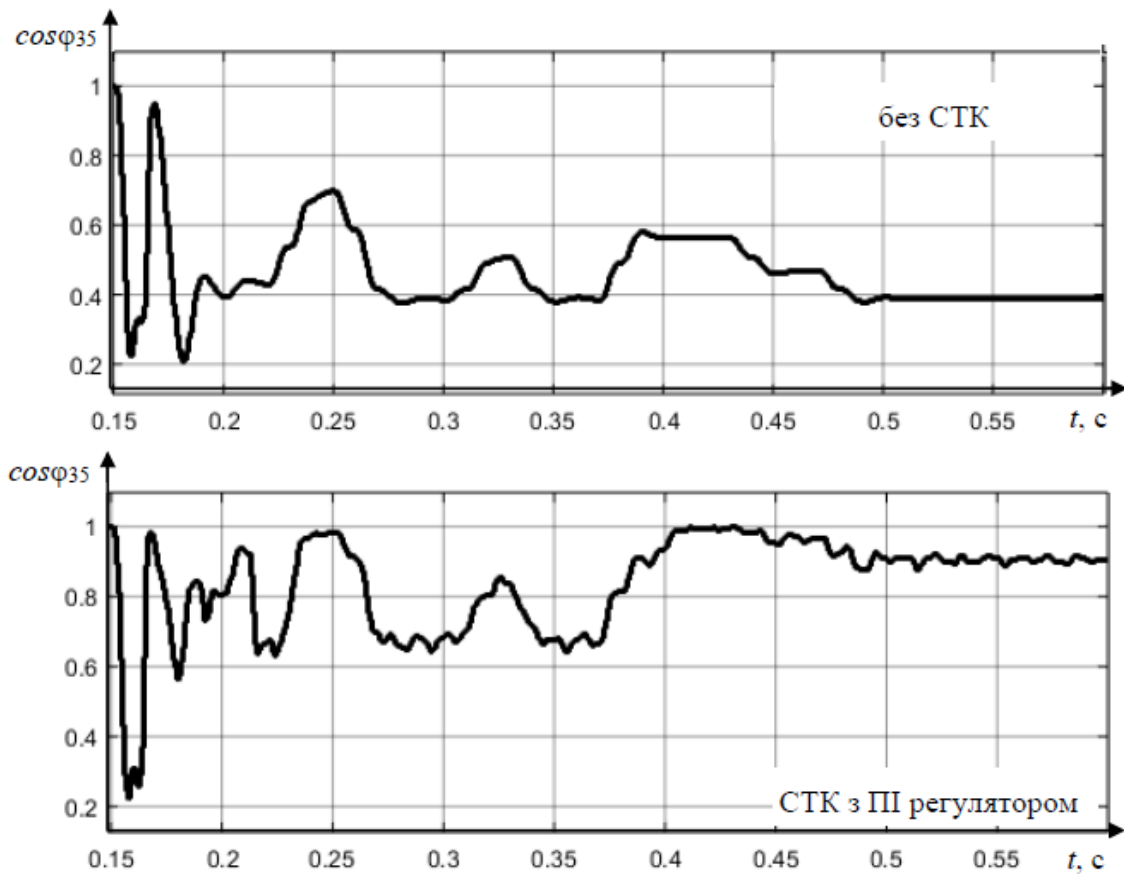


Рисунок 2.34 – Реакція системи на різкозмінне навантаження

За результатами вимірювання параметрів в моделі системи електропостачання печі були побудовані залежності, які представлені на рисунках 2.16 і 2.17. Для спрощення порівняння параметрів в різних режимах значення струмів, напруг і потужностей вказуються у відносних одиницях.

Основні значення параметрів:

- a) $S_{баз}$ для обох точок вимірювання дорівнює 160 МВА (відповідає потужності СТК);
- b) $U_{35баз} = 35$ кВ;
- c) $I_{35баз} = 2639,31$ А;
- d) $U_{DSPбаз} = 1200$ В;
- e) $I_{DSPбаз} = 76980$ А.

З графіків (рис. 2.16 і 2.17) видно, що значення вимірюваних параметрів в більшій мірі залежать від значень R_D і X_L . При перемиканні режимів реактора і трансформатора печі відбуваються зміни, але криві залежностей параметрів

близькі один до одного.

2.4 Синтез параметрів класичного регулятора в системі керування статичним тиристорним компенсатором

В якості сигналу, за яким можна реалізувати управління СТК, використовуються сигнали, що показують рівень реактивної потужності або рівень напруги в точці підключення компенсатора. Низькі значення коефіцієнта потужності, що спостерігаються в діапазоні основних робочих точок печі, говорять про те, що управління повинно здійснюватися за першим типом сигналів. Однак роботи [15, 22] показують, що в цьому випадку забезпечити необхідний рівень напруги на клеммах печі буде неможливо трансформатор і, відповідно, продуктивність печі знизиться.

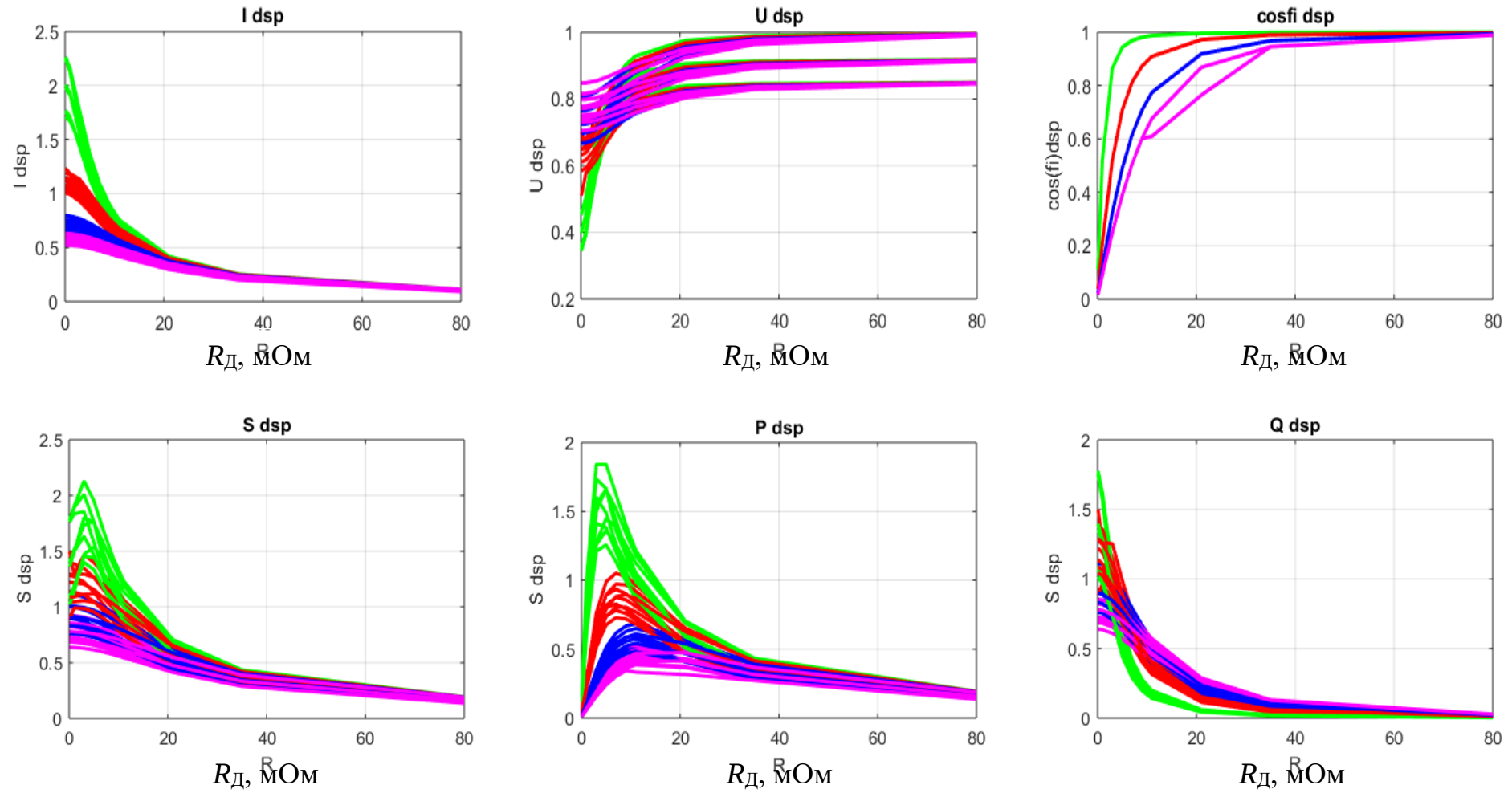


Рисунок 2.16 – Графіки зміни параметрів системи на шинопроводах електродугової печі

- | | | | |
|--------------------------------------|----------------------------|--|---------------------------|
| — | - $X_L = 1.7 \text{ МОм};$ | — | - $X_L = 9 \text{ МОм};$ |
| — | - $X_L = 5 \text{ МОм};$ | — | - $X_L = 12 \text{ МОм};$ |

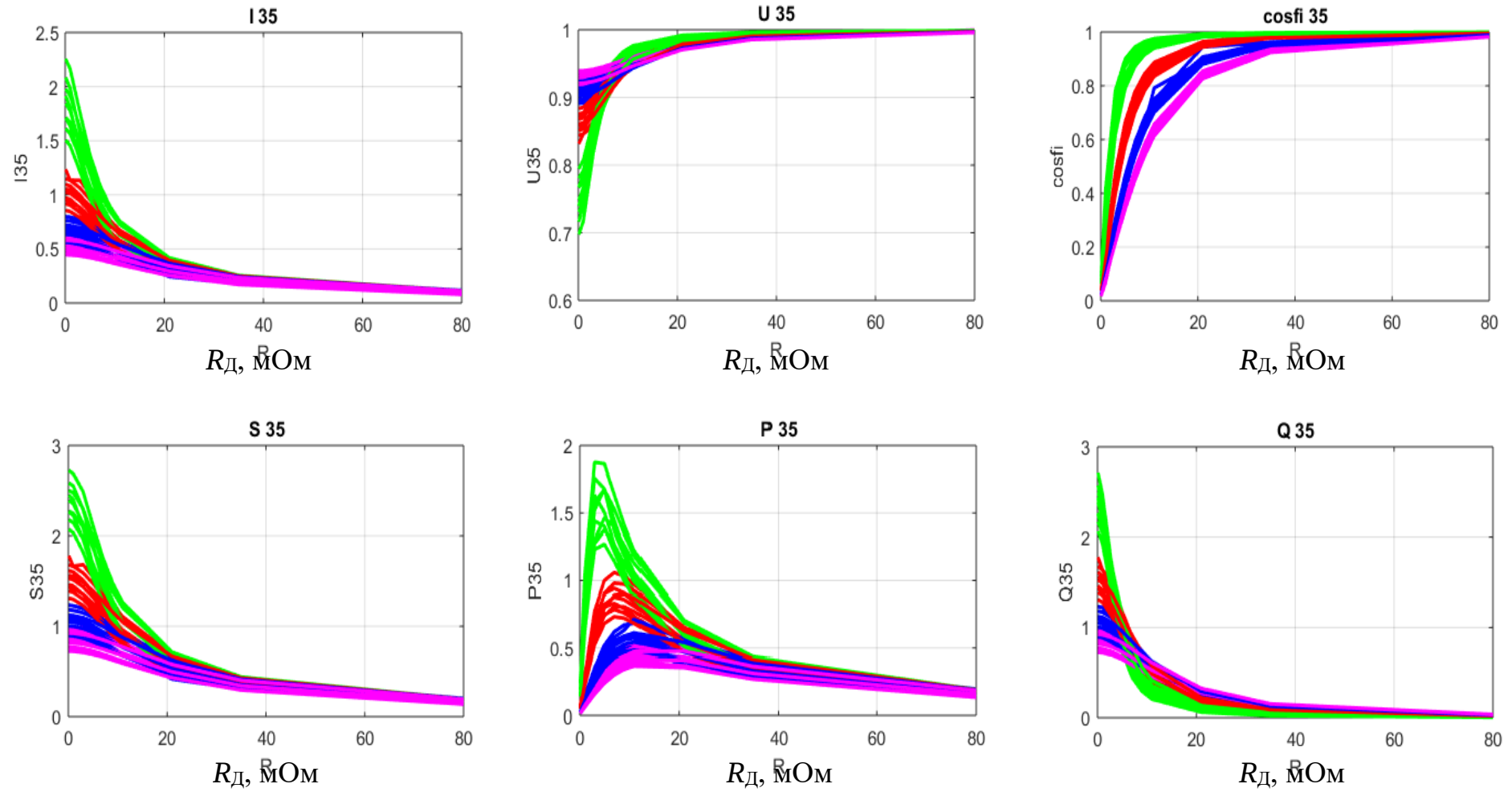


Рисунок 2.17 – Графіки зміни параметрів системи на лінії 35 кВ

- | | | | |
|--------------------------------------|-------------------|--|------------------|
| — | - $X_L = 1.7$ MΩ; | — | - $X_L = 9$ MΩ; |
| — | - $X_L = 5$ MΩ; | — | - $X_L = 12$ MΩ; |

Тому в якості вхідного сигналу в систему управління використовується сигнал помилки e , який показує відхилення напруги V_{meas} , виміряної на лінії 35 кВ від заданого значення V_{ref} :

$$e = V_{ref} - V_{meas}.$$

У загальному вигляді систему управління статичним тиристорним компенсатором можна представити за допомогою функціональної схеми, наведеної на рисунку 2.24

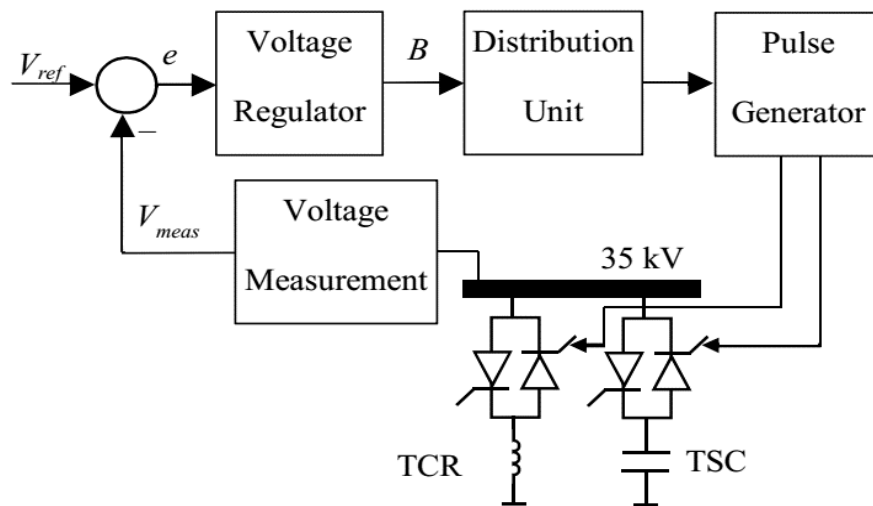


Рисунок 2.24 – Функціональна схема системи управління статичним тиристорним компенсатором

У процесі роботи регулятора розраховується змінне значення реактивної провідності B , яке необхідно отримати в СТК шляхом перемикання блоків фільтрувально-компенсуючих ланцюгів (ФКЛ, TSC) і тиристорно-реакторної групи (ТРГ, TCR). Для формування керуючих імпульсів тиристорів цих блоків подається сигнал про обчислене значення B в блок *Distribution Unit*, де відбувається вибір групи елементів TSC і TCR . Потім імпульси генеруються в блоці *Pulse Generator* і подаються на відповідні тиристори.

Як правило, для управління СТК в *Voltage Regulator* застосовувати закон ПІ управління. Структурна схема регулятора наведена на рисунку 2.25.

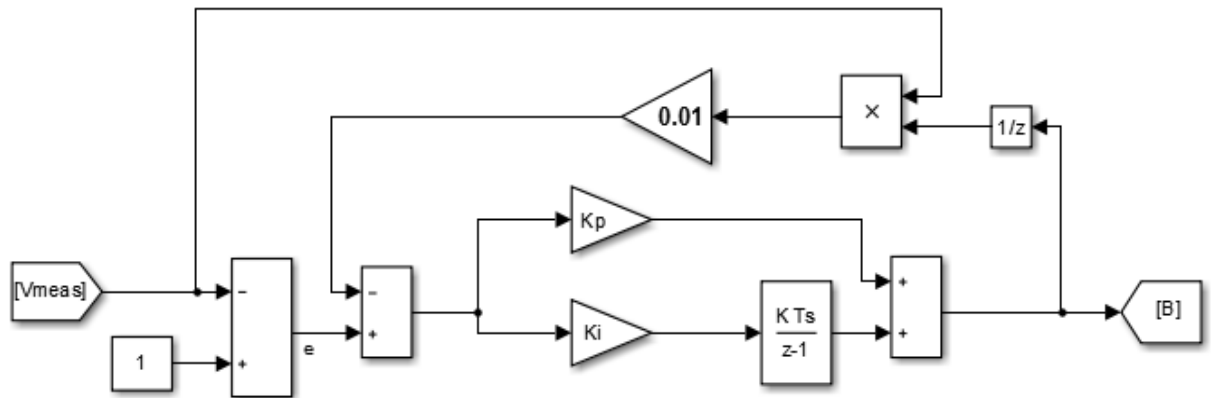


Рисунок 2.25 –ПІ контролер в моделі статичного тиристорного компенсатора

У системі живлення електродугової печі досить багато нелінійних елементів, тому при визначенні параметрів ПІ-контролера замість аналітичних методів використовувався блок *Signal Constraint*, в якому оптимальні параметри K_p і K_i вибираються чисельними методами [16, 17].

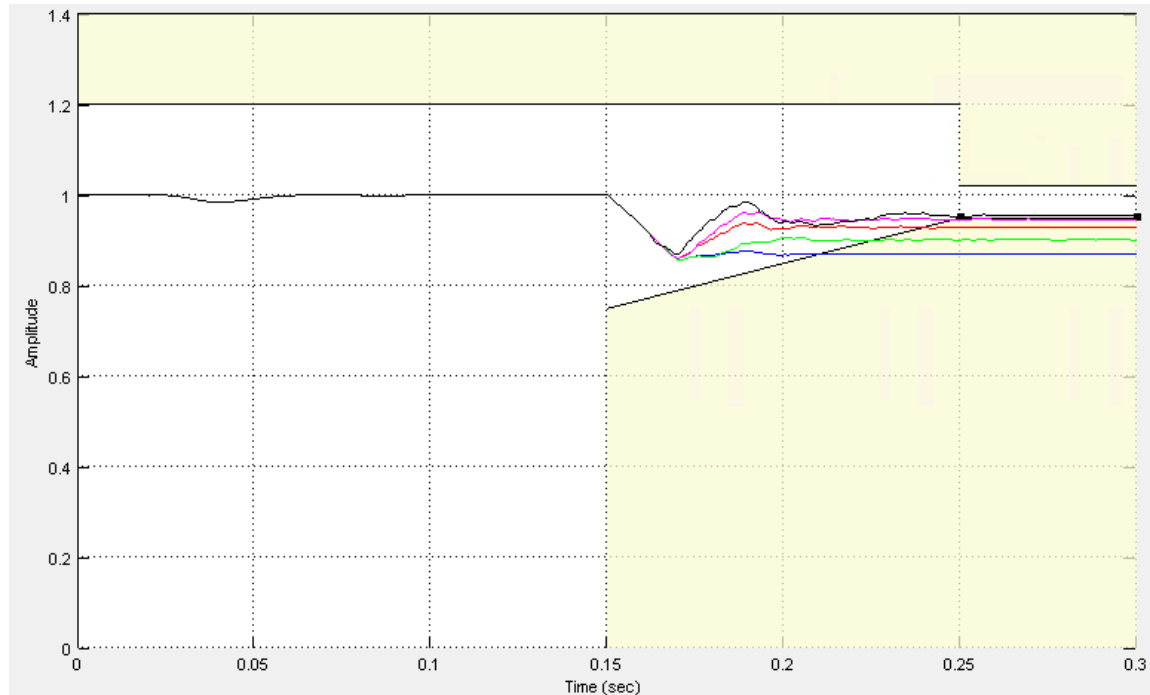
Для визначення параметрів блок *Signal Constraint* підключається до сигналу V_{meas} . Потім за допомогою обмежувальних ліній в блоці визначається зона, яка визначає потрібну форму напруги V_{meas} . На рисунку 2.26 показаний процес підбору параметрів K_p і K_i для навантаження $R_d = 1$ мОм і $X_L = 5$ мОм, трансформатор включається на 18-му ступені, реактор – на 2-му ступені.

Для виключення впливу перехідних процесів в бібліотечних блоках моделі, що спостерігаються при включенні моделювання, на процес визначення параметрів в зоні шуканого сигналу (рисунк 2.26) відводиться час до 0,15 с на їх завершення. Сигнал на підключення навантаження подається в момент часу 0,15 с.

Вибір «коридору» для проходження сигналу впливає на значення параметрів, що визначаються. У цьому прикладі задано час управління $t_p = 0,1$ с і максимальне відхилення $e_{max} = 5\%$.

Для заданого навантаження можна було підібрати оптимальні параметри і отримати потрібну форму сигналу V_{meas} . Однак в більшості випадків, що відповідають високій потужності навантаження, не представляється можливим відрегулювати параметри K_p і K_i таким чином, щоб вимірюваний сигнал

відповідав цій зоні.



Iter	S-count	f(x)	max constraint	Step-size	Directional derivative	First-order optimality	Procedure
0	1	0	0.1134				
1	10	0	0.05602	1	0	0.0498	
2	15	0	0.02282	0.221	0	135	
3	20	0	0.00698	1	0	0.0197	Hessian modified twi
4	25	0	0	1	0	0.472	

Successful termination.
Found a feasible or optimal solution within the specified tolerances.

Ki =
0.9811

Kp =
12.5166

Рисунок 2.26 – Процес підбору оптимальних параметрів в блоці *Signal Constraint*

Наприклад, на рисунку 2.27 показаний результат роботи блоку обмеження сигналу з навантаженням $R_D = 1$ мОм і $X_L = 5$ мОм, трансформатор включається на 18-му ступені, реактор включається на 6-му ступені. Збільшення потужності навантаження призводило до неможливості отримання сигналу, відповідного заданій зоні. Тому для отримання оптимальних параметрів час контролю t_p було збільшено до 0,25 с, а максимальне відхилення e_{max} - до 15%.

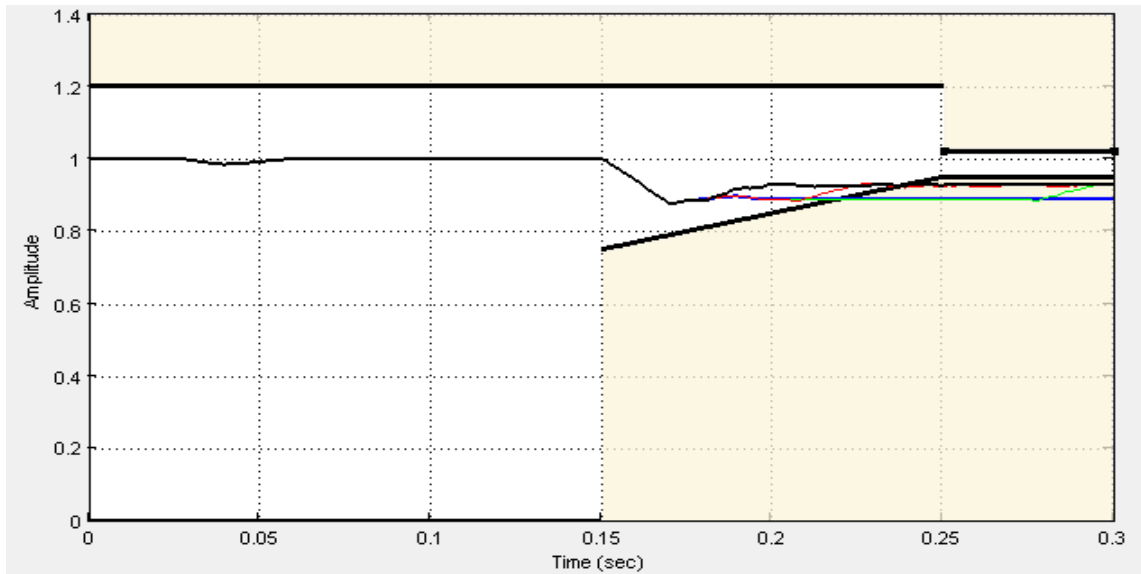


Рисунок 2.27 – Процес підбору оптимальних параметрів в блоці *Signal Constraint* для великих навантажень

При інших комбінаціях ступенів R_d , X_L , трансформатора і реактора для успішного завершення операцій доводилося встановлювати також інші значення t_p і e_{max} для підбору допустимих значень параметрів K_p і K_i , що свідчить про зниження якості управління.

У таблиці 2.3 наведені результати визначення коефіцієнтів регулятора K_p і K_i при різних значеннях навантаження при активації 18 ступені трансформатора і 6 ступені реактора.

Таблиця 2.3 - Параметри PI-контролера

$X_L = 1.7 \text{ мОм}$								
$R, \text{ мОм}$	0.1	1	3	5	7	9	11	21
K_p	11.78	1.2	2.83	1.12	3.99	4	1	1
K_i	23.88	9.8	16.91	65.5	9.78	15.84	10	1
$X_L = 5 \text{ мОм}$								
$R, \text{ мОм}$	0.1	1	3	5	7	9	11	21
K_p	61.75	1.02	10.02	4	2.79	1	4	1
K_i	0.003	47.57	29.99	1	4	38.44	15.84	1
$X_L = 9 \text{ мОм}$								
$R, \text{ мОм}$	0.1	1	3	5	7	9	11	21
K_p	1.12	1.14	6.12	4	1	1	4	1
K_i	10.02	10.02	9.27	9.8	39.84	39.69	15.84	1
$X_L = 12 \text{ мОм}$								
$R, \text{ мОм}$	0.1	1	3	5	7	9	11	21
K_p	0.99	0.99	1	3.99	4	4	4	1
K_i	29.99	29.99	40	14.61	10.03	10.03	10.56	1

З наведених вище даних видно, що в межах одного режиму роботи системи електроживлення параметри регулятора можуть сильно змінюватися при зміні навантаження. У той же час існують деякі області нечутливості коефіцієнтів K_p і K_i до зміни значень опору R_d і X_L . Ці ділянки, як правило, відповідають зниженню споживаної потужності ДСП, що в реальній системі характерно для «спокійних» режимів роботи печі.

Перемикання на інші ступені трансформатора і реактора також призводить до зниження споживаної потужності і, відповідно, до отримання великих областей нечутливості коефіцієнтів регулятора.

В результаті визначення коефіцієнтів ПІ-регулятора чисельними методами можна зробити наступний висновок. В процесі роботи ДСП при мінімальних витратах електроенергії коефіцієнти ПІ-регулятора в системі управління СТК змінюються мало і досить деяких приблизних значень для прийнятної роботи компенсуючого пристрою. Якщо дугова піч працює на повну потужність, наприклад, під час розплавлення свердловин в шихті, то підбирати параметри регулятора необхідно в режимі реального часу, чого складно і трудомістко досягти, так як в реальній системі електропостачання навантаження змінюється безперервно. Збільшення потужності навантаження призводить до зниження якості управління.

Результати роботи СТК з подальшим збільшенням потужності навантаження при комбінації параметрів $R_d = 3$ мОм, $X_L = 5$ мОм ($\cos\varphi_d = 0,51$) показані на рисунку 2.30. В результаті регулювання сигнал напруги V_{meas} досягає рівня, близького до заданого рівня з відхиленням в 3%, час регулювання становить 0,1 с.

Зазначені значення параметрів V_{meas} і $\cos\varphi_{35}$ знаходяться в допустимих межах. Однак збільшення часу контролю і неможливість стабілізації рівня сигналу може привести до значних коливань напруги і коефіцієнта потужності при різко чергується навантаженні. Повноцінний аналіз ефективності використання СТК з ПІ-регулятором можливий шляхом побудови адаптивної системи підбору параметрів регулятора.

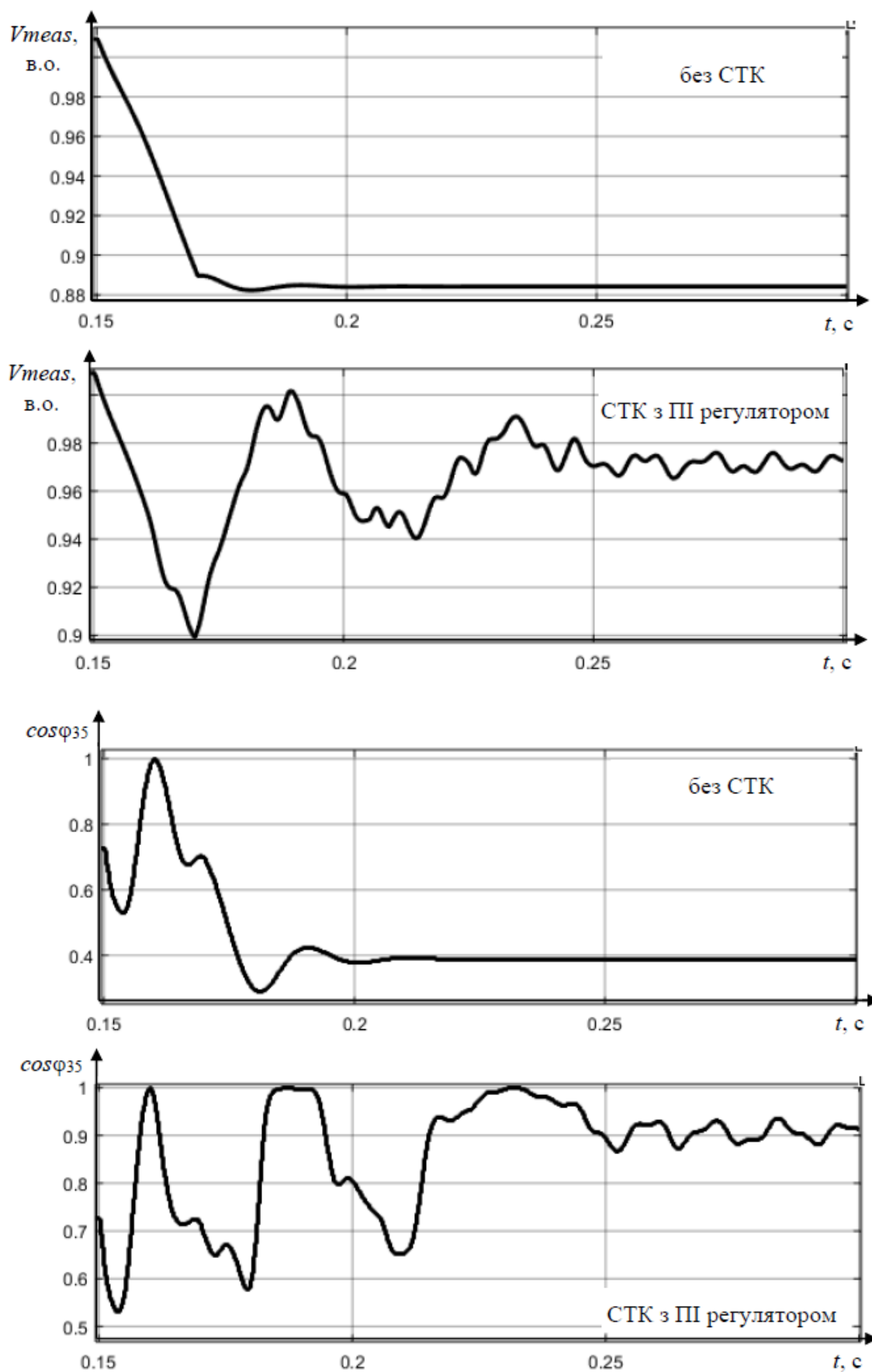


Рисунок 2.30 – Реакція системи при високій потужності навантаження

Однак розкид значень при зміні навантаження ускладнює це завдання. Тому була розроблена спрощена система підбору коефіцієнтів, в якій враховувалися дані тільки по 18-му ступінь трансформатора і 6-го ступінь реактора, при цьому $X_L = 5$ мОм і $R_D = [1, 3, 5, 7, 9]$ мОм. Структурна схема ПІ-контролера з адаптивним підбором коефіцієнтів K_p і K_i наведена на рисунку 2.31.

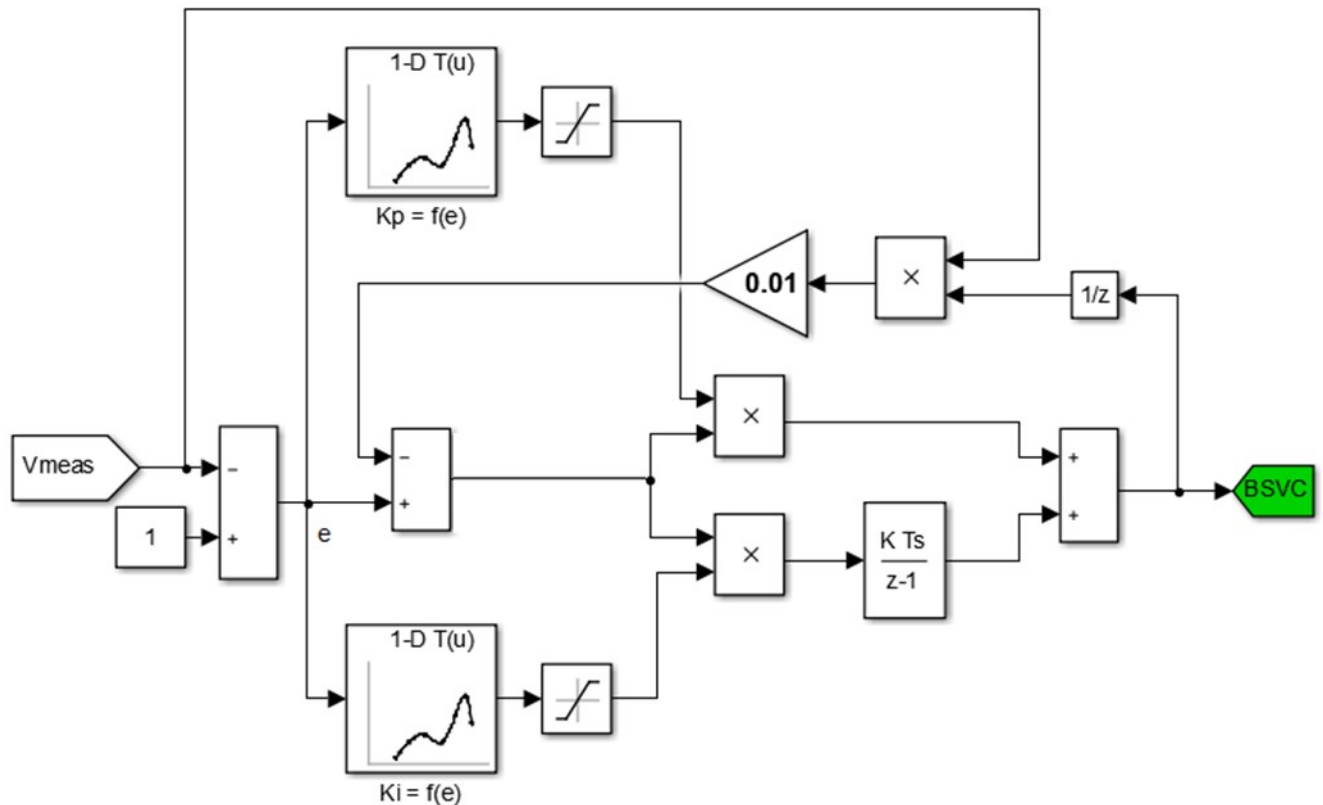


Рисунок 2.31 – ПІ-контролер зі змінними параметрами

Коефіцієнти регулятора визначаються рівнем відхилення напруги e , що відповідає параметрам R_D і X_L . На рисунку 2.32 показані графіки функцій K_p і K_i , які використовуються для визначення параметрів ручок в моделі. Графіки отримані в результаті інтерполяції методом кубічних сплайнових значень з таблиці 2.3.

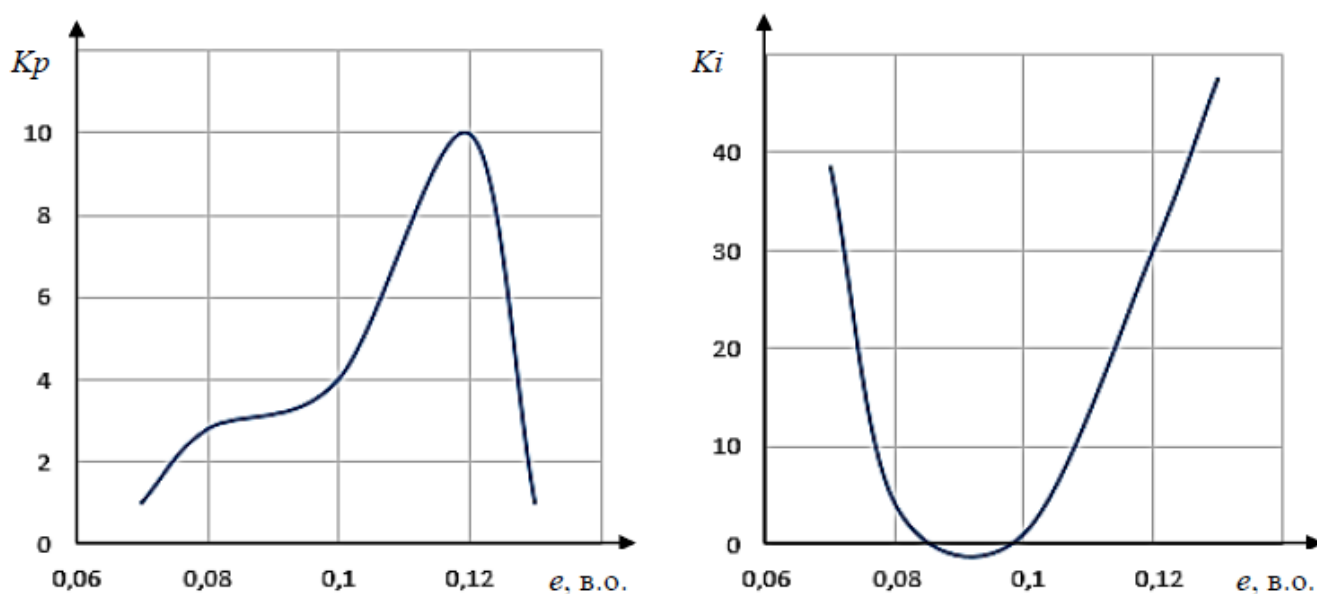


Рисунок 2.32 – Параметри PI-контролера

Для аналізу реакції СТК на змінне навантаження був сформований сигнал, що імітує змінний опір R_d (рисунок 2.33). Реакція системи на цей сигнал показана на рисунку 2.34.

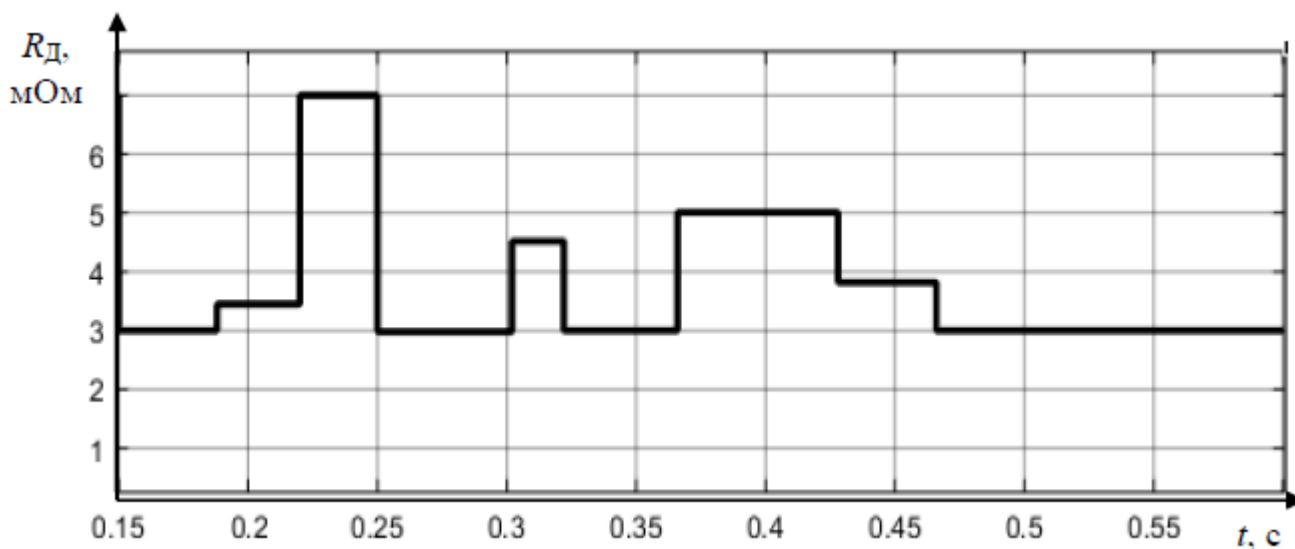


Рисунок 2.33 – Моделювання різкозмінного навантаження

Як видно з результатів моделювання, в системі управління СТК з ПІ-регулятором не вистачає швидкостей для стабілізації напруги і коефіцієнта потужності. Рівень напруги знаходиться в межах допустимої норми - відхилення напруги не перевищує 10%, але значення напруги сильно

змінюються з плином часу. Компенсацію реактивної потужності можна вважати незадовільною, тому що при різко чергується навантаженні не вдається підтримувати рівень коефіцієнта потужності $\cos\varphi_{35}$ постійний і близький до 1.

Отримані значення коефіцієнтів K_p і K_i ПІ-регулятора неоднозначні. По-перше, можливість отримання деяких коефіцієнтів з'являлася тільки при збільшенні часу управління tr і максимального відхилення сигналу e_{max} . Регулювання напруги в режимі реального часу в системі змінного навантаження. Цей висновок підтверджується результатами досліджень, проведених в імітаційній моделі електродугової печі. ПІ контролер системи електропостачання добре справляється з компенсацією навантаження малої потужності, але зі збільшенням потужності відбувається збільшення статичної похибки і часу контролю.

Висновки до розділу:

Розроблено імітаційну модель системи електропостачання цеху металургійного підприємства з ДСП та СТК.

Проведено аналіз підходів до математичного опису дугової печі. ДСП є складним об'єктом для моделювання, оскільки під час плавлення металу спостерігаються процеси різної фізичної природи. За результатами аналізу можливих способів опису печі був обраний метод, згідно з яким електрошокова піч описується за схемою електрозаміщення як трифазна активно-індуктивна навантаження зі змінними опорами R_d і X_L .

Отримано графіки миттєвих значень струму i_d , напруги дуги u_d і коефіцієнта потужності при змінних опорах R_d і X_L . Частота зміни значень опору відповідає частоті зміни параметрів ДСП, що працює на максимальній потужності. За наведеними графіками можна зробити висновок, що при зміні індуктивного опору X_L більшою мірою впливає на форму кривих струму і напруги, ніж зміна опору R_d .

На основі імітаційної моделі було проведено вплив трифазного

симетричного навантаження на систему електропостачання (СЕР) без компенсуючого пристрою. Вимірювання параметрів СЕР (струмів і напруг) проводилися на лінії 35 кВ і на клеммах обмотки трансформатора печі. На основі виміряних параметрів СЕР було розраховано коефіцієнт потужності, тверду, активну та реактивну потужність. В результаті були побудовані графіки залежностей вимірюваних і розрахункових параметрів СЕР від режимів роботи СЕР (включення печі трансформатор і реактор) і змінних опорів R_d і X_L .

В результаті при різкозмінному навантаженні не вдається стабілізувати рівень напруги і коефіцієнта потужності. Отже, можна говорити про неефективну роботу ПР-регулятора і необхідності оптимізації алгоритмів управління компенсуючим пристроєм.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СТАТИЧНИМ ТИРИСТОРНИМ КОМПЕНСАТОРОМ

3.1 Синтез нечіткого регулятора в системі керування статичним тиристорним компенсатором за алгоритмом Мамдані

Підвищення якості управління за рахунок збільшення швидкодії системи управління і зниження статичної похибки можливо при використанні апарату нечіткої логіки [14, 18, 22]. У той же час розробляється нечіткий регулятор (НР) повинен бути вбудований в існуючу систему управління СТК, побудовану на базі класичного регулятора [6, 12, 16] сигнали класичного контролера. Слід також зазначити, що традиційно для відповідності регулятору, побудованому на законі управління PI, крім вхідної змінної e , нечіткий контролер використовує змінну de/dt – похідну від помилки e .

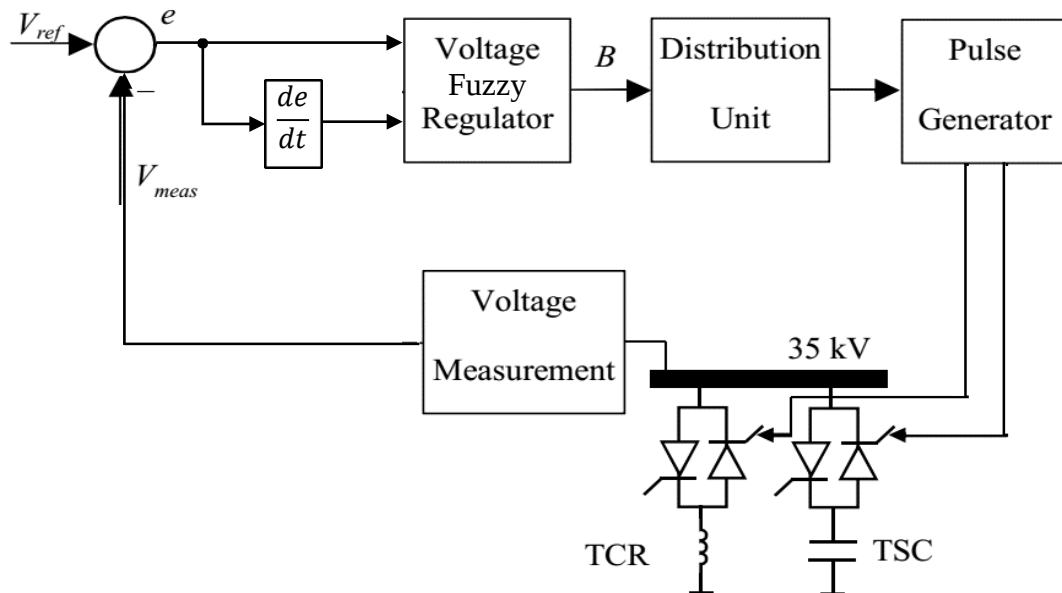


Рисунок 3.1 – Функціональна схема системи управління статичним
тиристорним компенсатором з НР

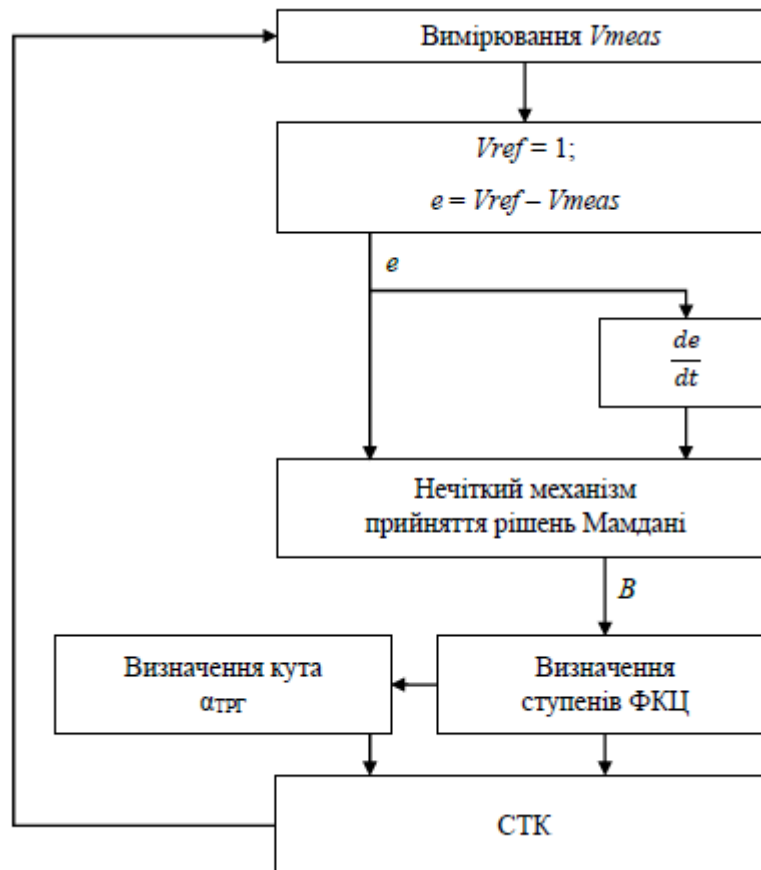


Рисунок 3.2 – Нечіткий алгоритм стабілізації напруги у точці підключення
СТК

Результати досліджень, розглянуті в другому розділі, були використані для формування областей для визначення змінних e і de/dt . При навантаженні, ідентичному номінальному навантаженню і трохи вище номінального, максимальне відхилення від заданого рівня напруги в точці 35 кВ в стаціонарному режимі становило $e_{max} \approx 0,15$ в.о. Очевидно, що ця величина повинна відповідати правій межі діапазону визначення змінної. Так як в результаті роботи системи управління СТК можливі перевищення і відповідний висновок змінної e в негативну область, то ліва межа повинна бути встановлена з урахуванням цього перевищення. У даній ситуації перевищення допустимо, але небажано, тому величина e , відповідна лівій межі діапазону, не повинна бути великою.

Для опису змінної відхилення e спочатку було вибрано п'ять доданків, функції приналежності (ФП) яких показані на рисунку 3.3:

N – співмірний із зарегульованістю;

Z – відповідає досягненню околиці заданої величини;

PS – невелике відхилення від встановленого значення;

PM - середнє відхилення;

PB - велике відхилення.

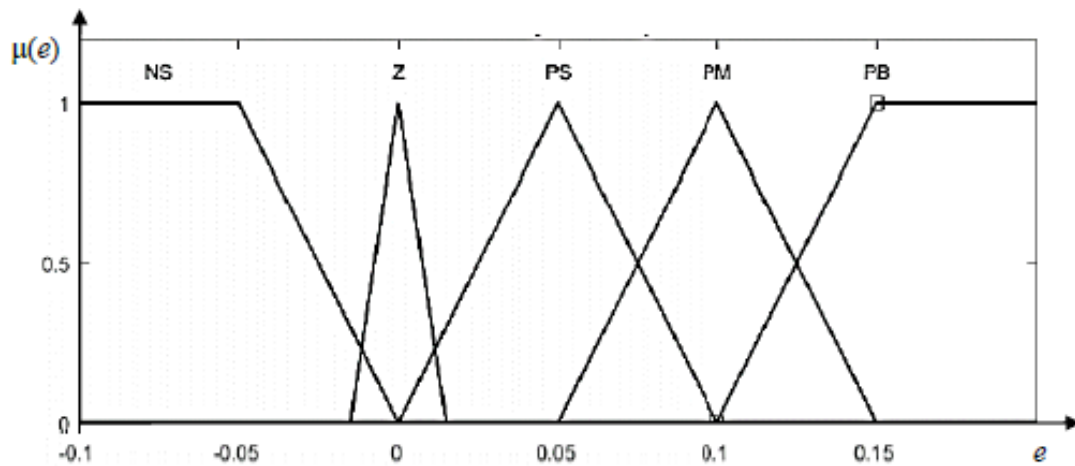


Рисунок 3.3 – Початковий розподіл функцій, що належать до вхідної лінгвістичної змінної e

Для задання нечіткого управління функції приналежності (крім Z) змінної e були рівномірно розподілені по області можливих значень змінної. Для визначення меж ФП Z праворуч і ліворуч від $e = 0$ були обрані значення, що дорівнюють $\pm 0,015$ в.о.

При визначенні змінної de/dt був зроблений наступний висновок. Відносно невелика швидкість зміни навантаження i , отже, похибки e не повинні надавати істотного впливу на вихідне значення змінної B . У той же час, якщо відбувається швидке збільшення (або зменшення) e , то нечіткий регулятор повинен запобігати швидкій зміні параметрів системи і своєчасно підвищувати (або знижувати) значення B .

N – швидко зменшується;

Z – не змінюється або змінюється незначно;

P – швидко зростає.

Функції термів, що належать змінній de/dt , наведені на рисунку 3.4.

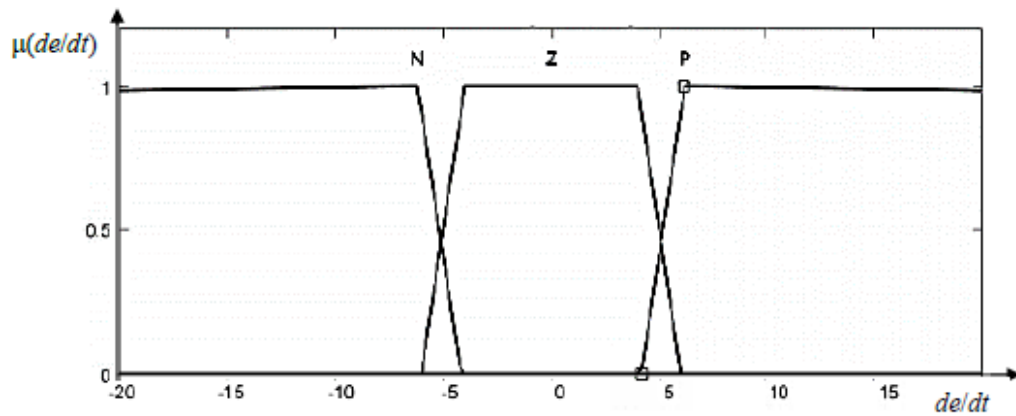


Рисунок 3.4 – Функції приналежності до вхідної лінгвістичної змінної de/dt

Область визначення вихідної лінгвістичної змінної B задається у відносних одиницях від 0 до 1. Тут «0» відповідає відключеному СТК, «1» – працює на максимальній потужності, всі ФКЛ включені. Умови змінної B повинні визначатися ємнісною провідністю, яка відповідає включенню наступної ФКЛ. Для ФКЛ 2 провідність становить $B = 0,156$ в.о., для ФКЛ 3 – $B = 0,344$ в.о., для ФКЛ 4 і ФКЛ 5 – $B = 0,25$ в.о. Члени змінної B :

C0 – ФКЛ вимкнено, провідність $B = 0$;

C1 – ФКЛ 2 включено, $B = 0,156$ в.о.;

C2 – включені ФКЛ 2 і ФКЛ 3, $B = 0,156 + 0,344 = 0,5$ в.о.;

C3 – включає ФКЛ 2, ФКЛ 3 і ФКЛ 4, $B = 0,5 + 0,25 = 0,75$ в.о.;

C4 – всі ФКЛ включені, $B = 0,75 + 0,25 = 1$ в.о.

На рисунку 3.5 наведено початковий розподіл функцій, що належать змінній B . У таблиці 3.1 наведено базу даних правил НР.

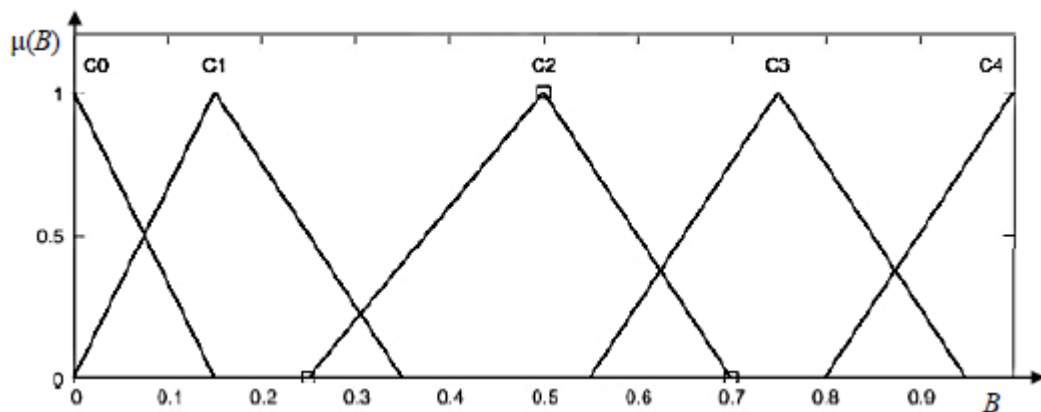


Рисунок 3.5 – Початковий розподіл функцій приналежності до вихідної

лінгвістичної змінної B

Таблиця 3.1 – База правил нечіткого регулятора з двома вхідними змінними

$\begin{matrix} de/dt \\ e \end{matrix}$	N	Z	PS	PM	PB
N	C0	C0	C1	C2	C3
Z	C0	C1	C2	C3	C4
P	C1	C2	C3	C4	C4

Відповідна поверхня відгуку показана на рисунку 3.6.

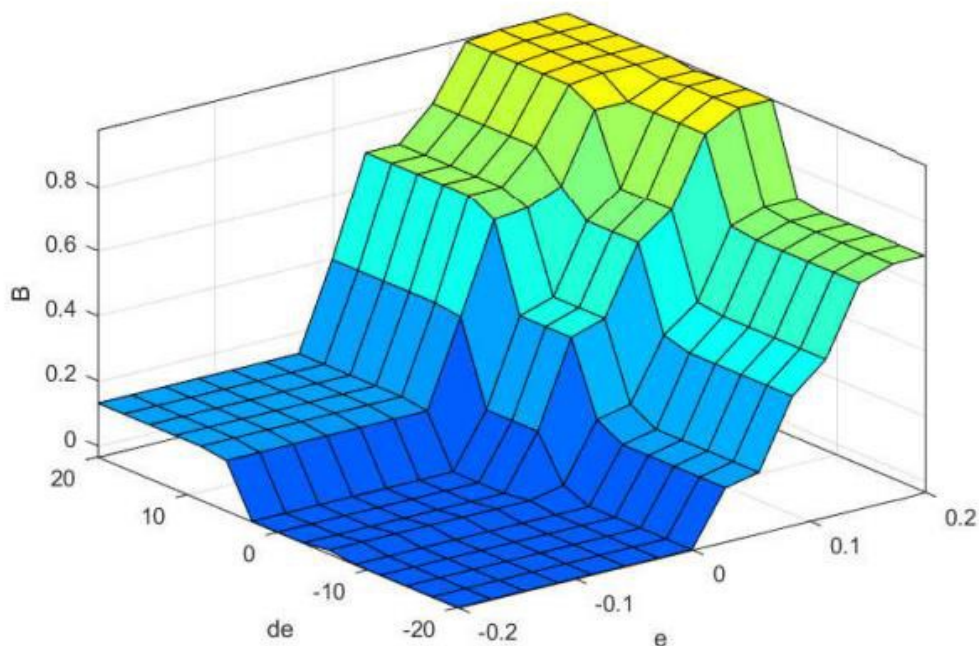


Рисунок 3.6 – Поверхня відгуку

На рисунку 3.7 показані результати моделювання СЕП з НР в системі управління СТК. А саме показана реакція системи на навантаження, що відповідає 18-му каскаду трансформатора, 6-му ступеню реактора, $R_d = 3$ мОм і $X_L = 5$ мОм. З графіків V_{meas} і $\cos\varphi$ видно, що нечіткий регулятор дозволяє швидше виводити сигнали на сталий рівень і зменшувати їх коливання під час перехідного процесу, але з набагато більшим відхиленням від заданого значення (більше 5%).

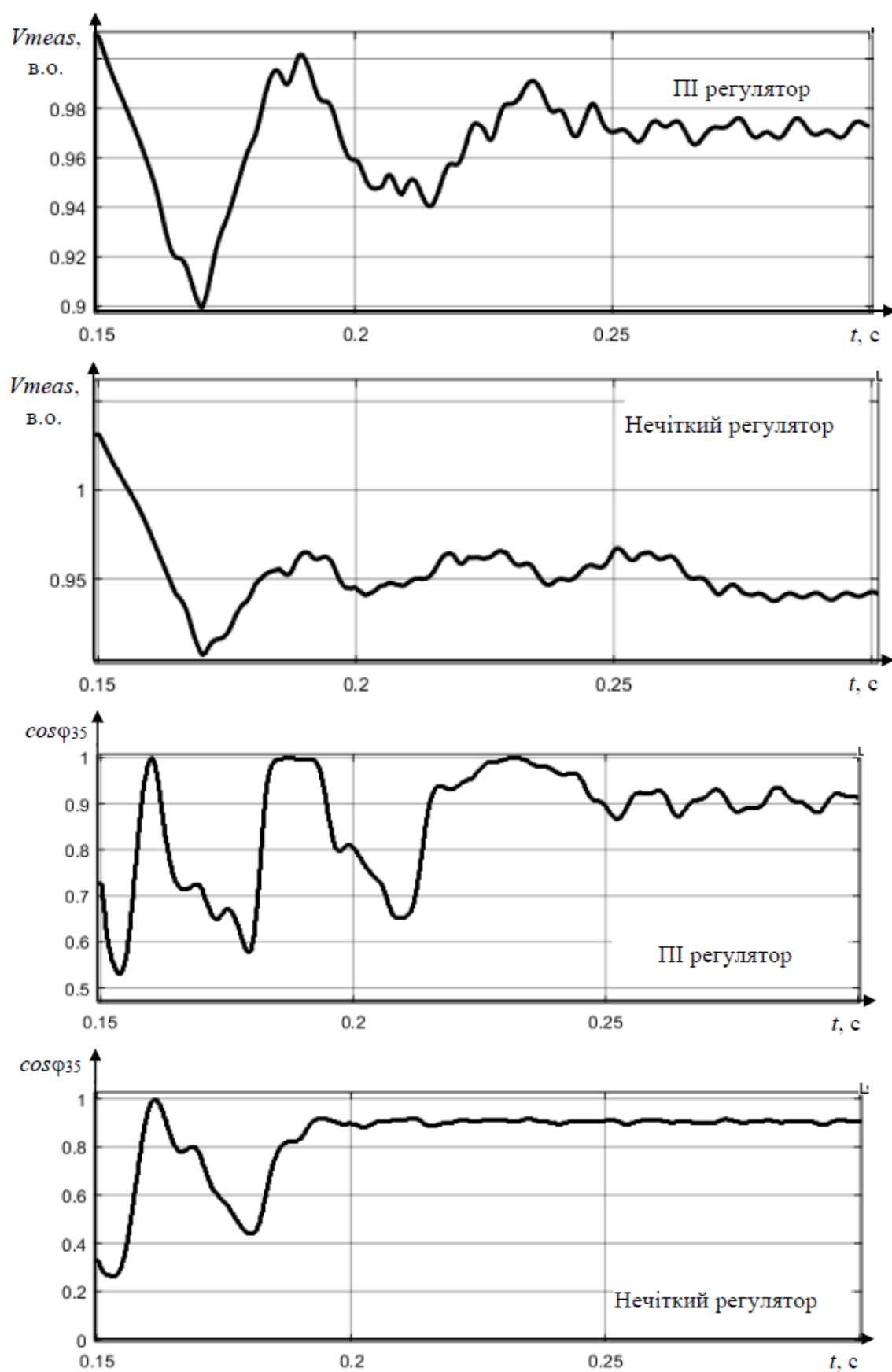


Рисунок 3.7 – Реакція системи при високій потужності навантаження

3.2 Синтез нечіткого регулятора за алгоритмом Мамдані з додатковою вхідною змінною

Введення додаткової вхідної лінгвістичної змінної в нечіткий регулятор дозволить врахувати включені ФКЛ і розширити базу правил НР [3, 15, 19]. Щоб уникнути передчасного перемикання ГЦК в процесі формування керуючого впливу, необхідно забезпечити невелику затримку Δt крокового сигналу TSC . Для даної моделі СТК час цієї затримки визначається часом спрацювання лічильника V_{meas} і дорівнює 20 мс при мінімальному кроці розрахунку системи моделі $T_s=10^6$ с.

Структурна схема апарату прийняття нечітких рішень з трьома вхідними (e , de/dt , $Step\ TSC$) і вихідним (B) сигналами має вигляд, показаний на рисунку 3.8.

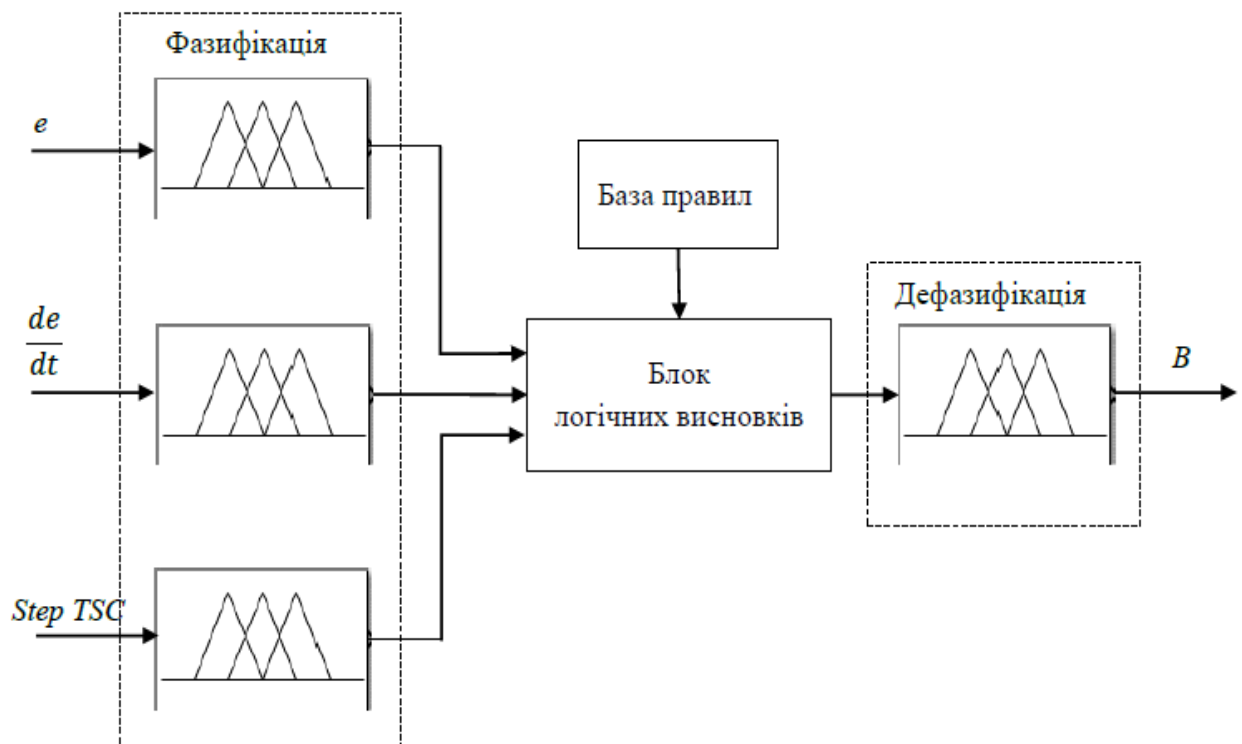


Рисунок 3.8 – Структурна схема нечіткого регулятора

Модель системи управління СТК з нечітким регулятором з урахуванням вхідних (e , de/dt , $Step\ TSC$) і виходів (B) показані на рисунку 3.9, а відповідний нечіткий алгоритм показаний на рисунку 3.10.

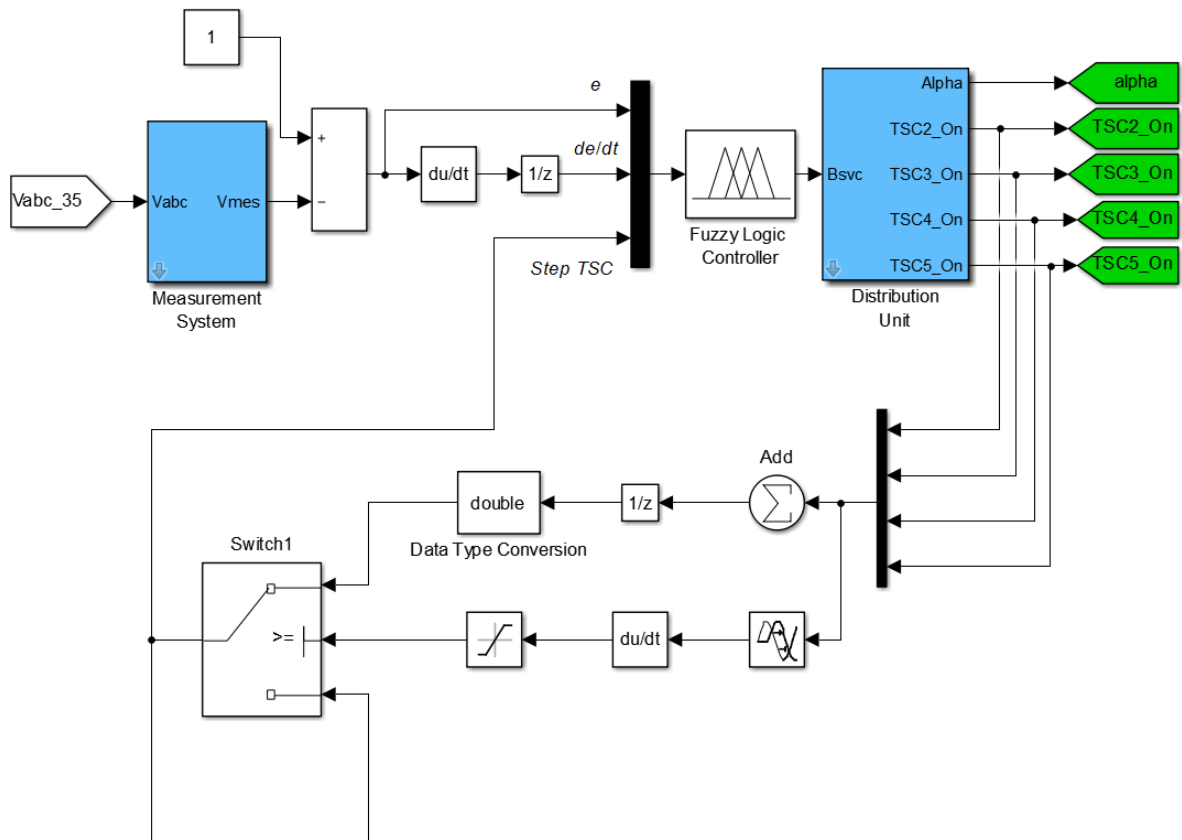


Рисунок 3.9 – Модель системи управління з нечітким регулятором

Крокова змінна TSC в результаті включення і відключення ФКЛ приймає чіткі значення, що відповідають числу включених ФКЛ (рисунок 3.10), тому для введення цієї змінної в нечіткий контролер функції аксесуарів мають вигляд, показаний на рисунку 3.11.

Члени вхідної змінної $Step\ TSC$ визначаються як:

$Step0$ – всі ФКЛ вимкнені;

$Step1$ – включені ФКЛ2;

$Step2$ – включені ФКЛ2 і ФКЛ3;

$Step3$ – включені ФКЛ2, ФКЛ3 і ФКЛ4;

$Step4$ – включені ФКЛ2, ФКЛ3, ФКЛ4 і ФКЛ5.

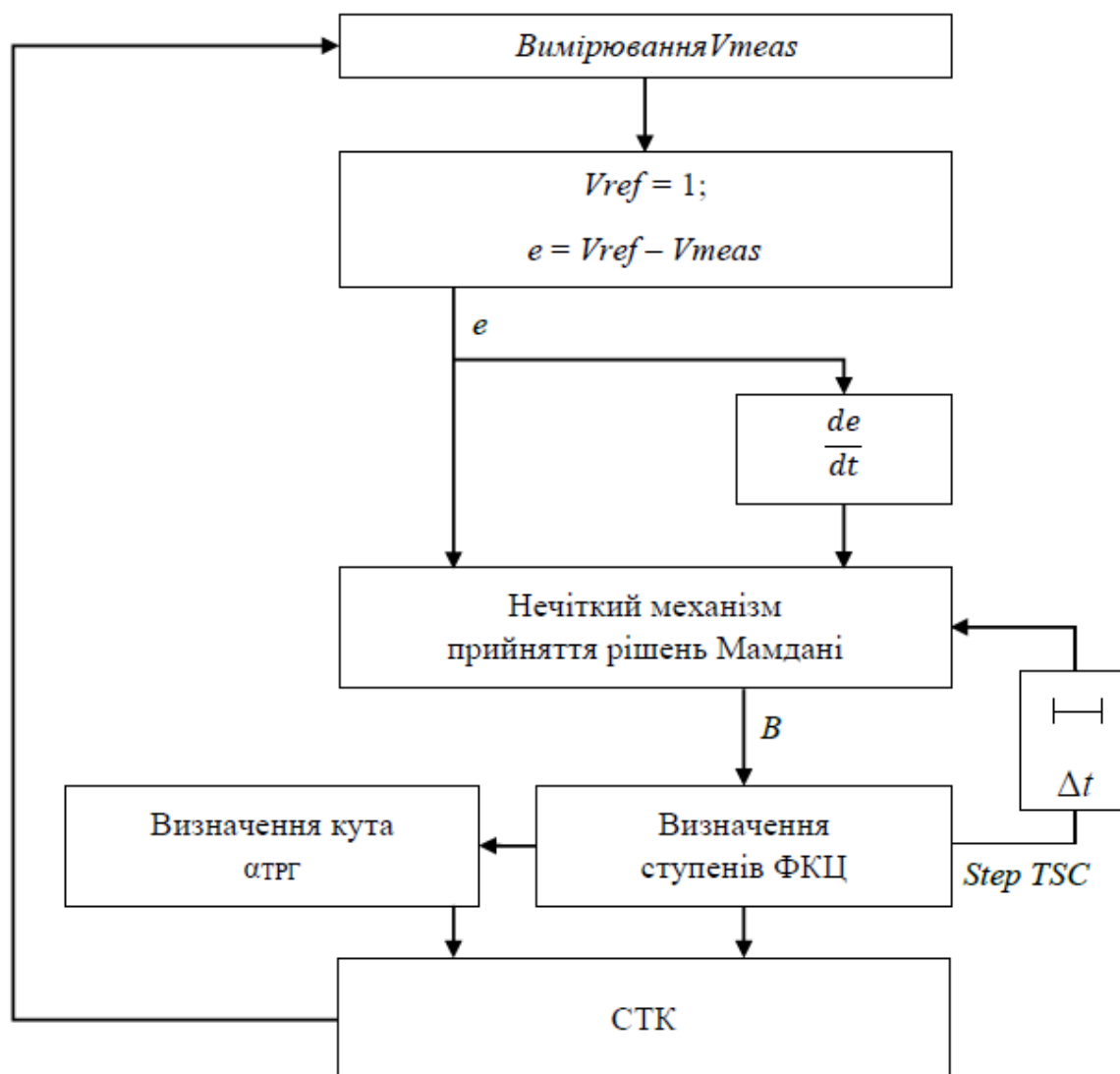


Рисунок 3.10 – Нечіткий алгоритм стабілізації напруги з урахуванням включеного ФКЛ

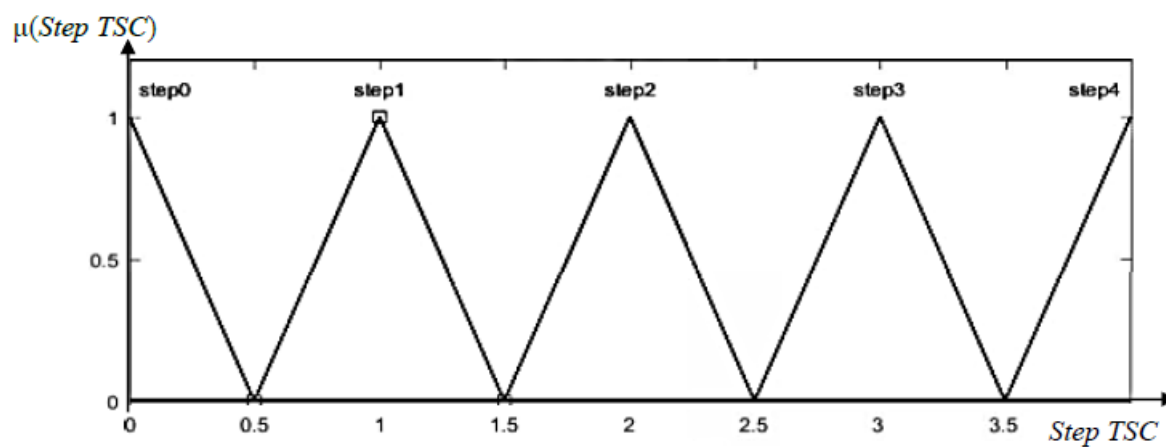


Рисунок 3.11 – Функції приналежності до вхідної лінгвістичної змінної $Step$

TSC

Виходячи з результатів настройки НР на моделі СЕП зі змінним навантаженням, база правил регулятора прийняла вигляд, представлений в таблиці 3.2. Візуальне представлення правил НР (рисунок 3.13) дозволило регулювати функції володіння вхідної змінної e і вихідної змінної B . Для ФП змінної e зменшилася ширина термів Z , PS і PM , а також змінилися кути нахилу z - і s -образні терміни N і PB . Ці перетворення дозволили задати значення відхилення e для подальших операцій виведення. Результат корекції ФП змінної e показаний на рисунку 3.12.

Таблиця 3.2 – База правил нечіткого регулятора

de/dt	TSC e	Step0	Step1	Step2	Step3	Step4
Z	N	C0	C0	C1	C2	C3
	Z	C0	C1	C2	C3	C4
	PS	C1	C2	C2	C3	C4
	PM	C1	C2	C3	C4	C4
	PB	C4	C4	C4	C4	C4
P	N	C0	C1	C2	C3	C4
	Z	C0	C1	C2	C3	C4
	PS	C1	C2	C3	C3	C4
	PM	C1	C2	C3	C4	C4
	PB	C2	C3	C4	C4	C4
N	N	C0	C0	C0	C1	C2
	Z	C0	C0	C1	C2	C3
	PS	C0	C1	C2	C3	C3
	PM	C0	C1	C2	C3	C4
	PB	C0	C1	C2	C3	C4

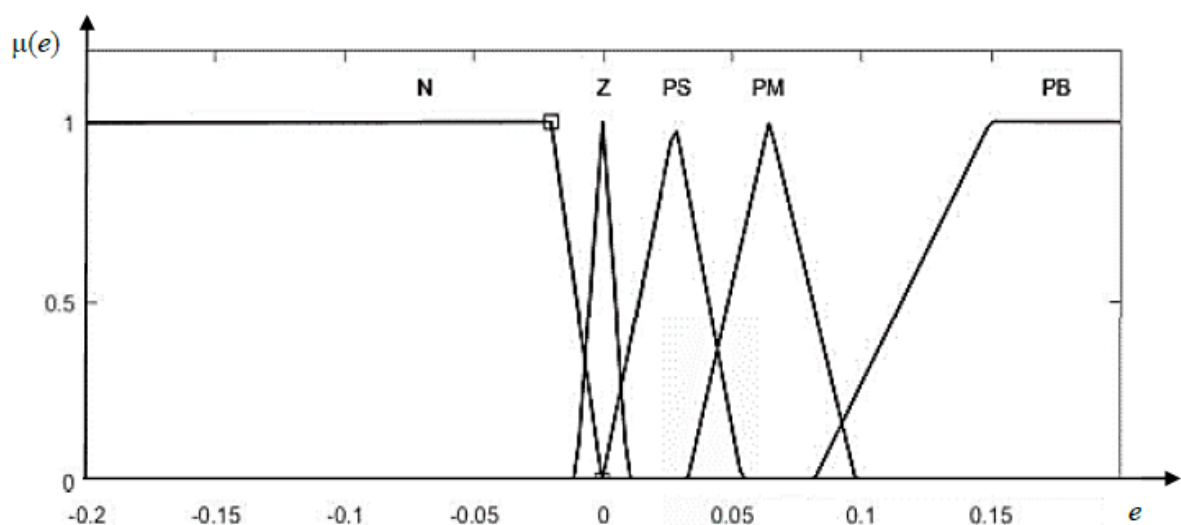


Рисунок 3.12 – Скоригований розподіл функцій, що належать вхідній

лінгвістичній змінній e

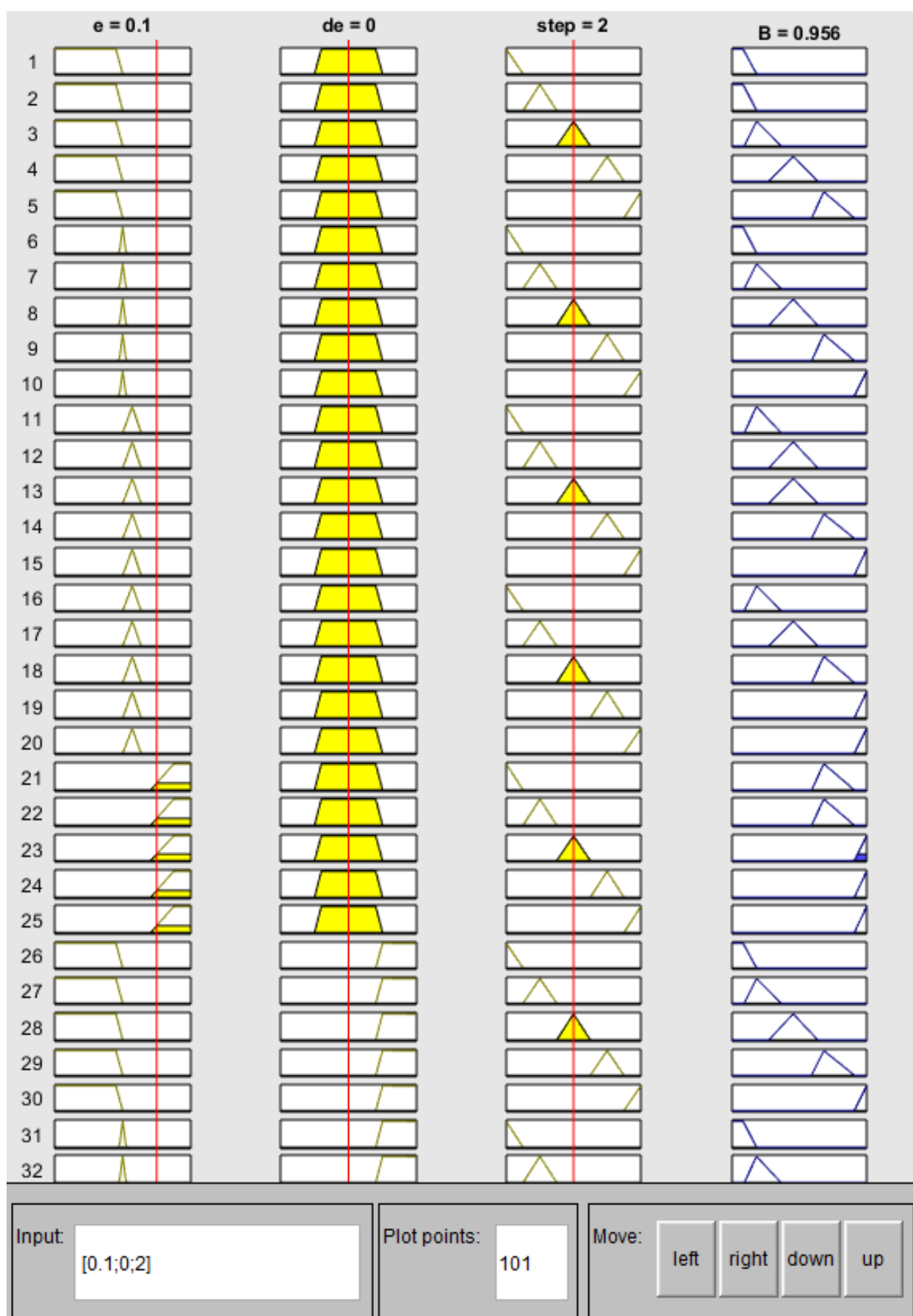


Рисунок 3.13 – Вікно візуалізації бази даних НР

На рисунку 3.14 показаний скоригований розподіл функцій власності вхідних змінних de/dt .

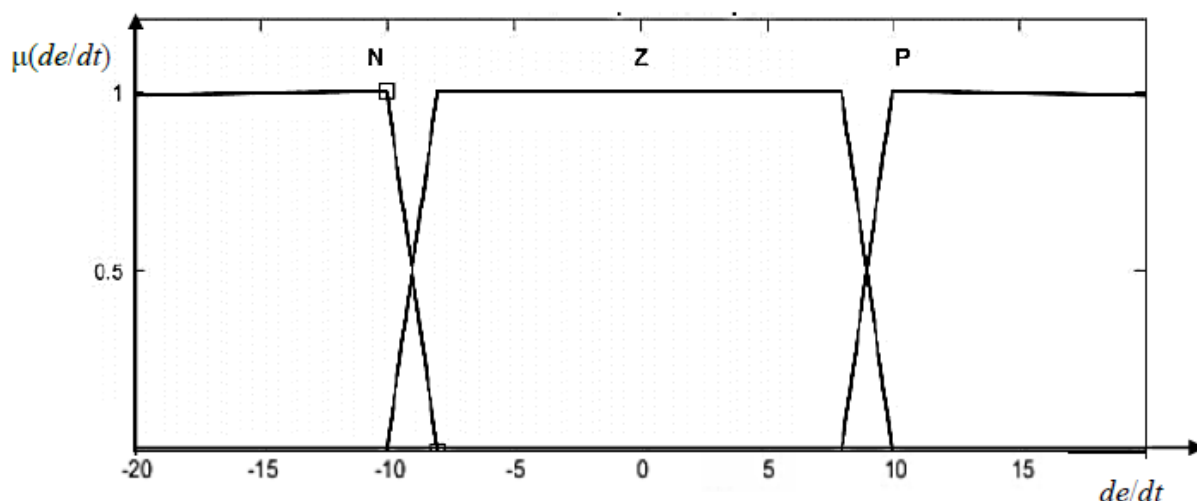


Рисунок 3.14 – Скориговані функції приналежності вхідних лінгвістичних змінних de/dt

В результаті корекції ФП змінної B відбулося зміщення центрів і зменшення ширини доданків $C1$, $C2$ і $C3$. Результати змінної корекції показані на рисунку 3.15.

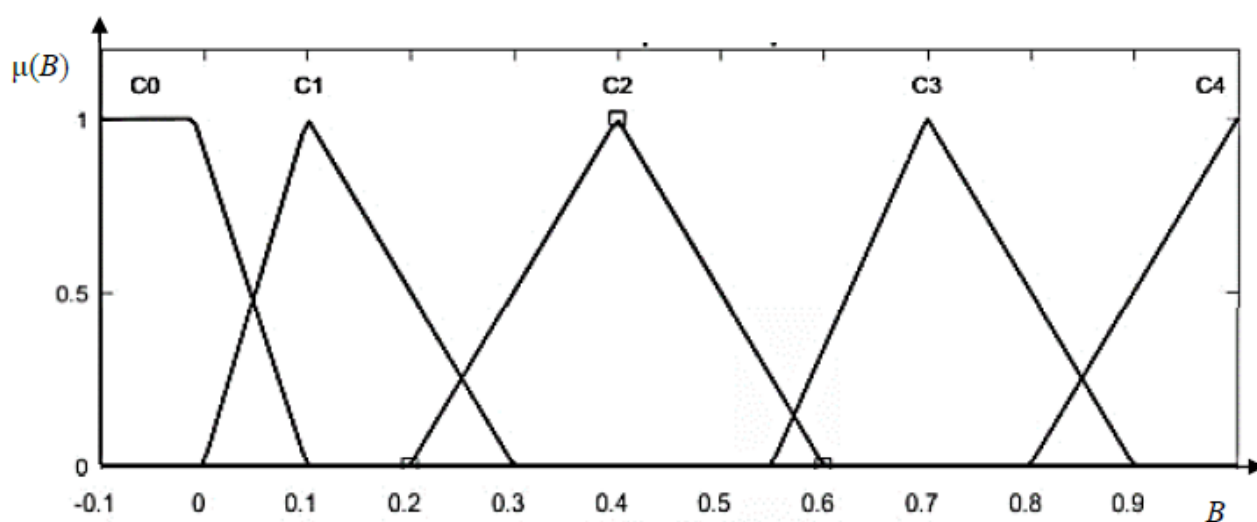
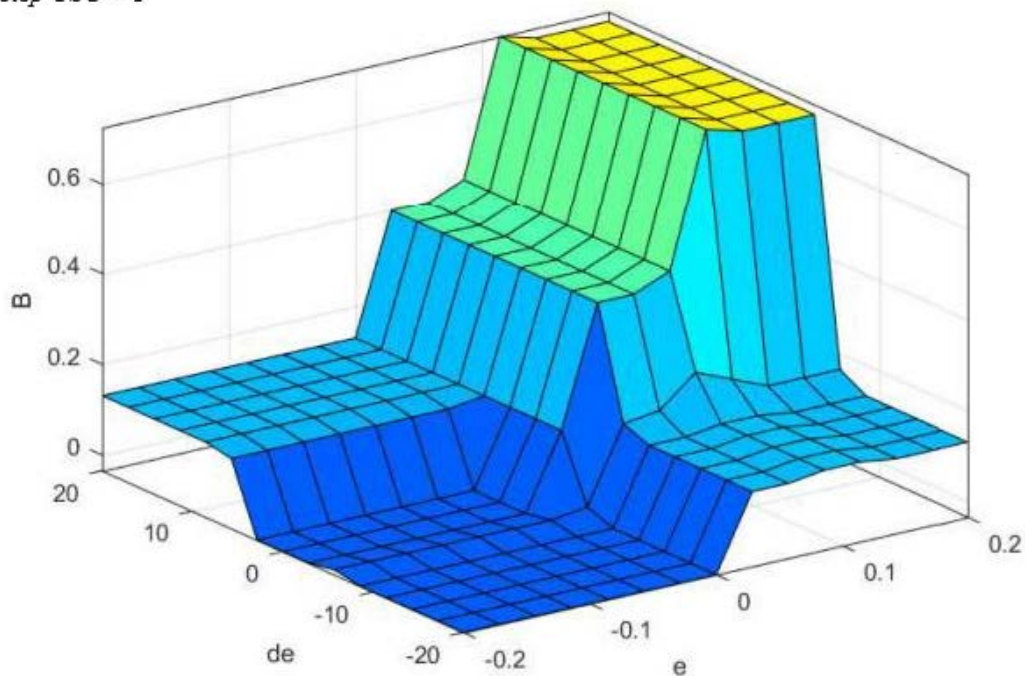


Рисунок 3.15 – Скоригований розподіл функцій приналежності до вихідної лінгвістичної змінної B

Можна оцінити вплив значень вхідних змінних і правил на результат нечіткого висновку з поверхонь відгуків для різних значень змінних, показаних на рисунку 3.16.

Step TSC = 1



Step TSC = 2

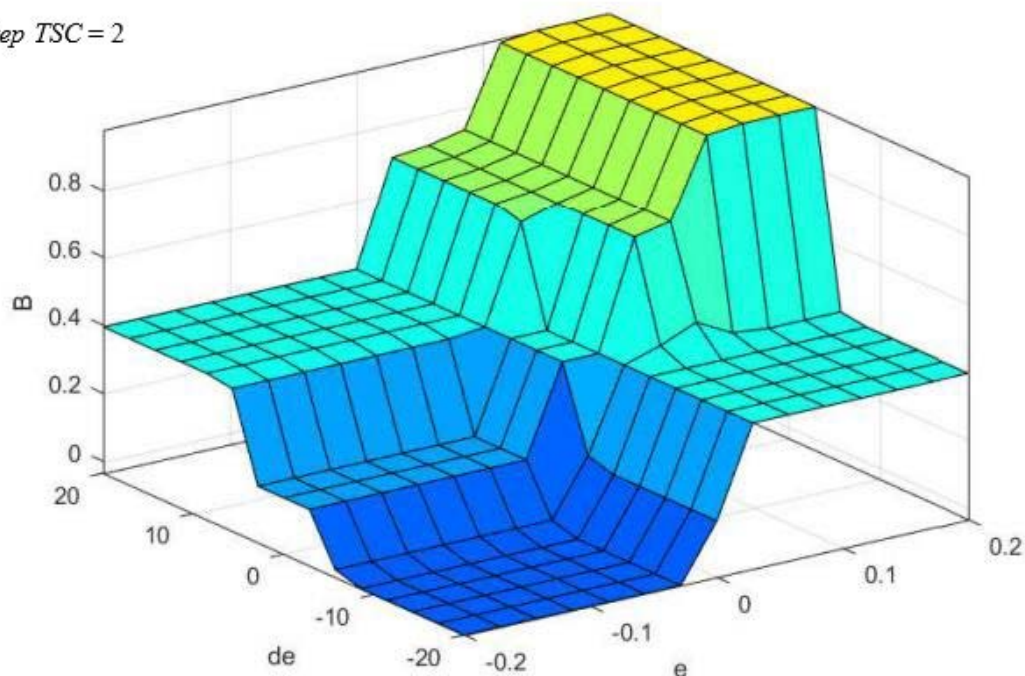
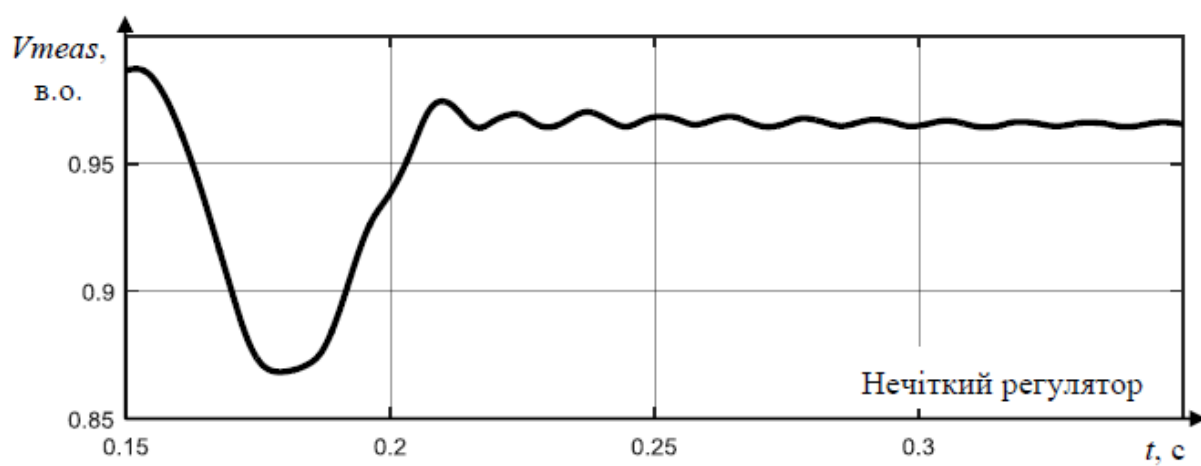
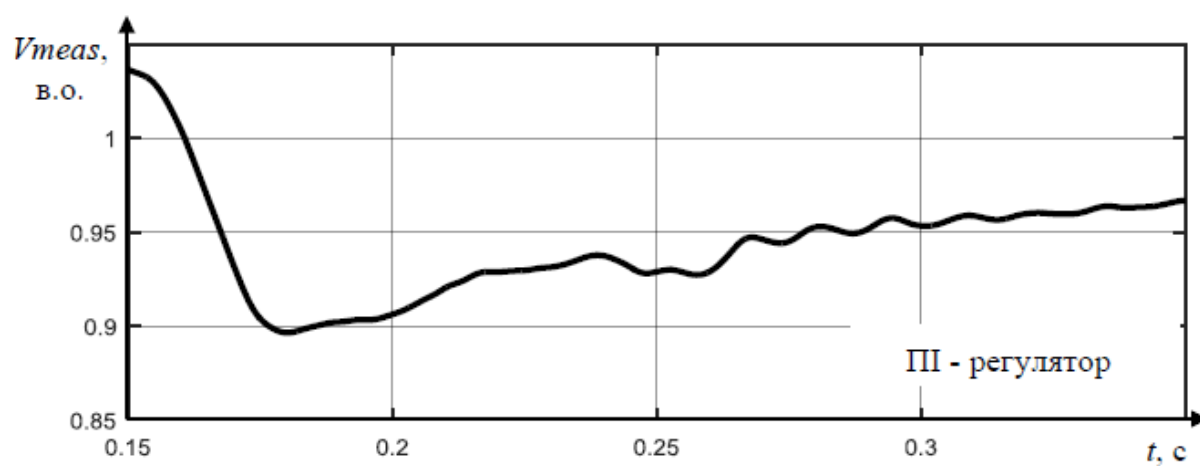


Рисунок 3.16 – Поверхні відгуків для $Step\ TSC = 1$ і $Step\ TSC = 2$

На рисунках 3.17 – 3.18 показані результати моделювання, за якими можна оцінити ефективність використання нечіткого регулятора з трьома

вхідними змінними в системі управління СТК.



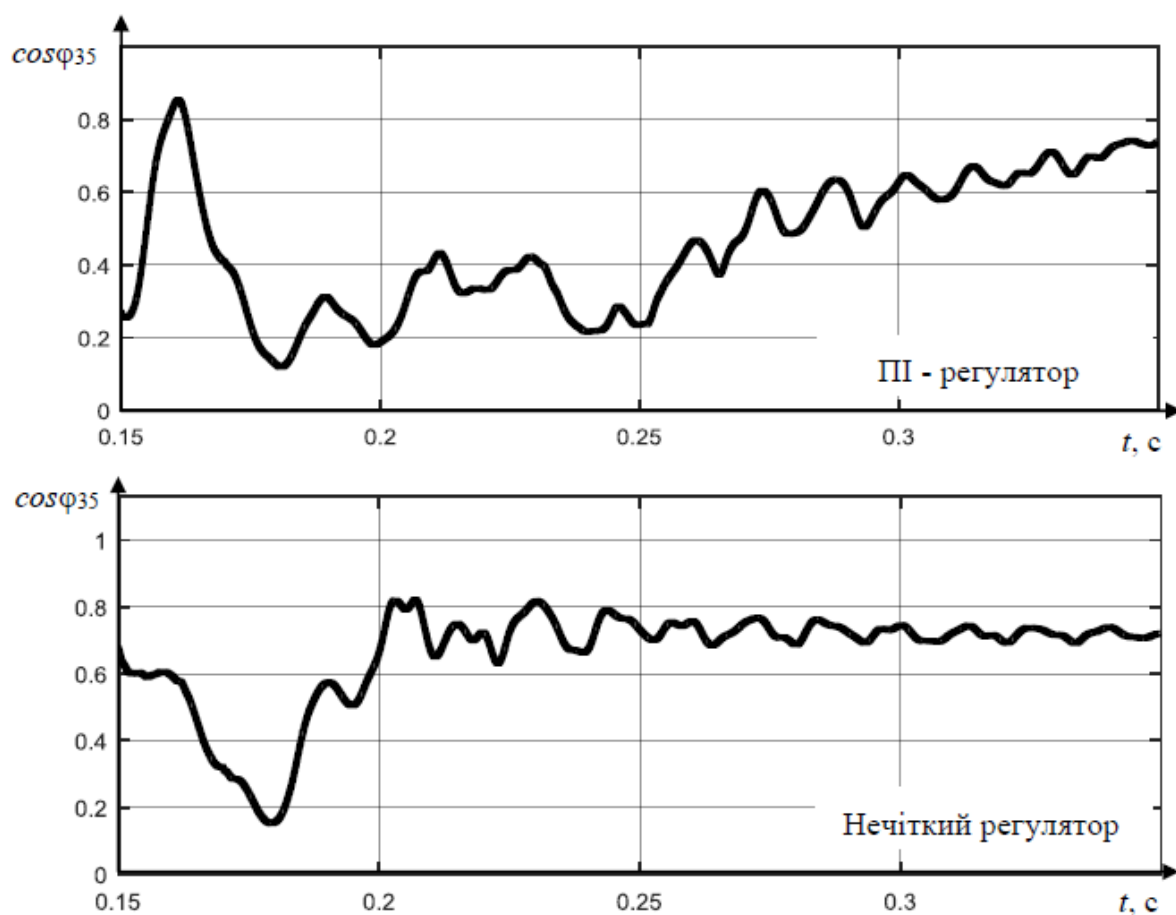
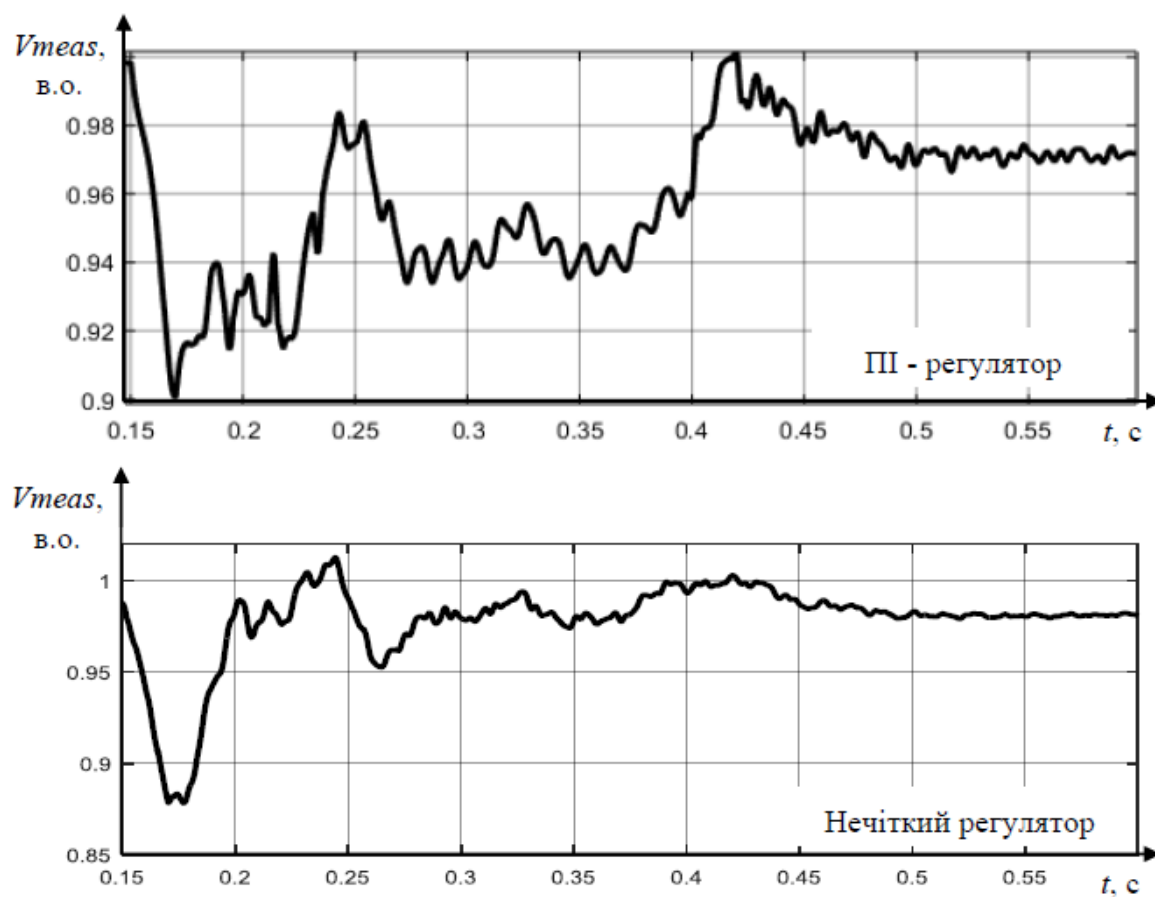


Рисунок 3.17 – Реакція системи на підвищену потужність навантаження



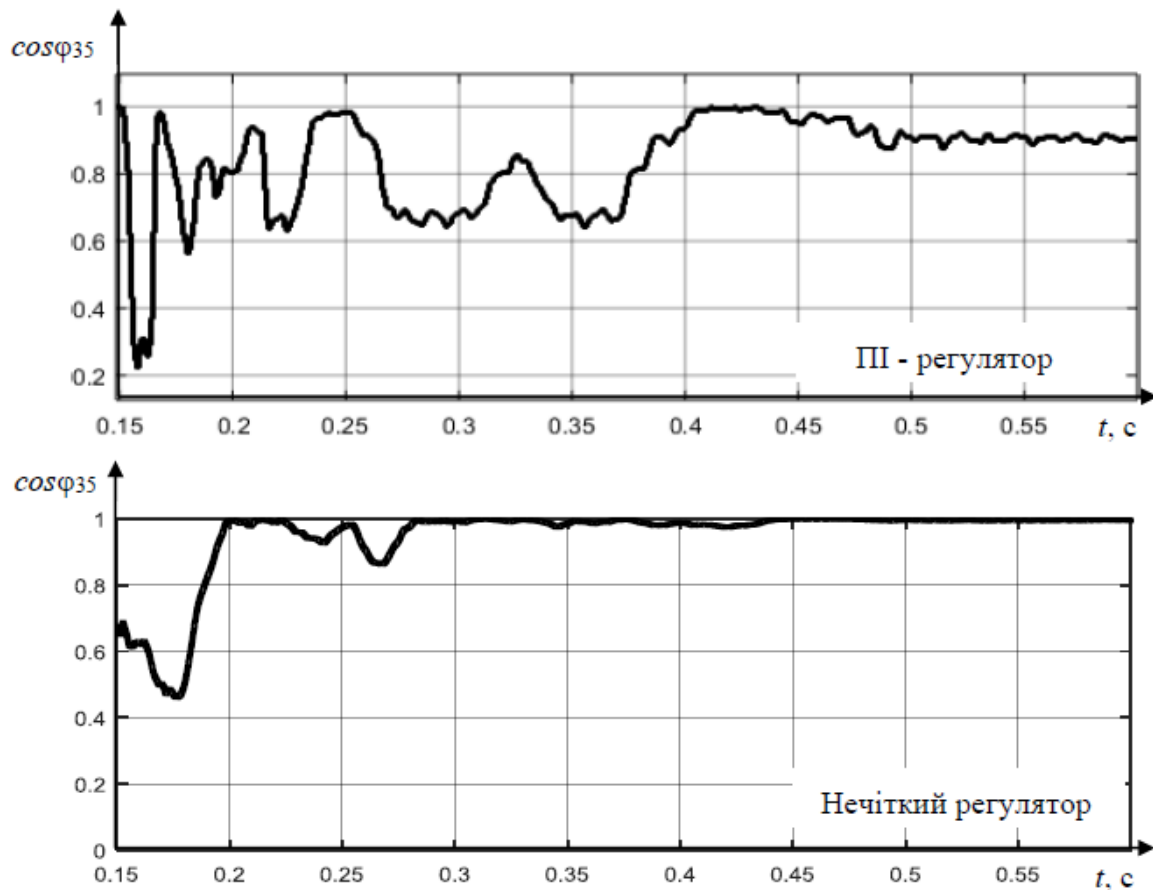


Рисунок 3.18 – Реакція системи на різкозмінне навантаження

При збільшенні потужності в системі з нечітким регулятором час управління не збільшується, на відміну від ПІ регулятора. Це видно на графіках V_{meas} і $\cos\varphi$ при навантаженні $R_D = 1$ мОм і $X_L = 5$ мОм, що відповідає потужності, що перевищує номінальну потужність (рисунок 3.17).

Виходячи з графіків, представлених на рисунку 3.18, можна оцінити перевагу використання нечіткого регулятора в сонячній електростанції з різко змінним навантаженням (рисунок 2.33). В результаті роботи нечіткого регулятора відхилення сигналу напруги V_{meas} від заданого значення не перевищує в середньому 3 – 4%, коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ практично прагне до 1.

3.3 Синтез нечіткого регулятора в системі управління статичним тиристорним компенсатором за алгоритмом Сугено

Нечіткий регулятор в моделі системи управління СТК, показаної на рисунку 3.10, може бути налаштований з нечітким виходом за алгоритмом Сугено. У цьому випадку структурна схема нечіткого регулятора прийме вигляд, показаний на рисунку 3.19

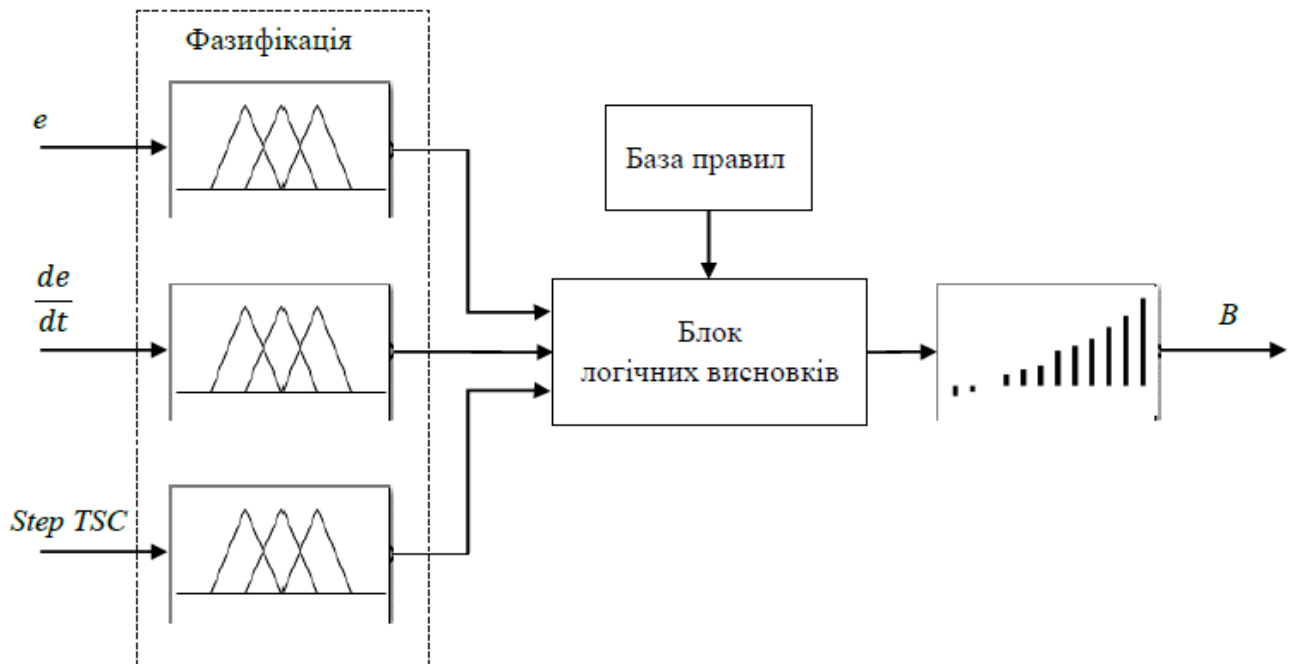


Рисунок 3.19 – Структурна схема нечіткого регулятора

Для того щоб скласти базу правил за алгоритмом Сугено, спочатку весь діапазон значень змінної $B = [-0,1; 1]$ був розділений на рівні рівні по 0,1 в.о. і відповідно позначився від C-01 до C1. Далі, в процесі коригування НР, додавалися проміжні рівні. Отримана коригувальна характеристика СТК показана на рисунку 3.20. Уздовж осі x - задане значення для СТК в одиницях провідності B , а вісь y - це відхилення e вимірюваної напруги V_{meas} від заданого значення).

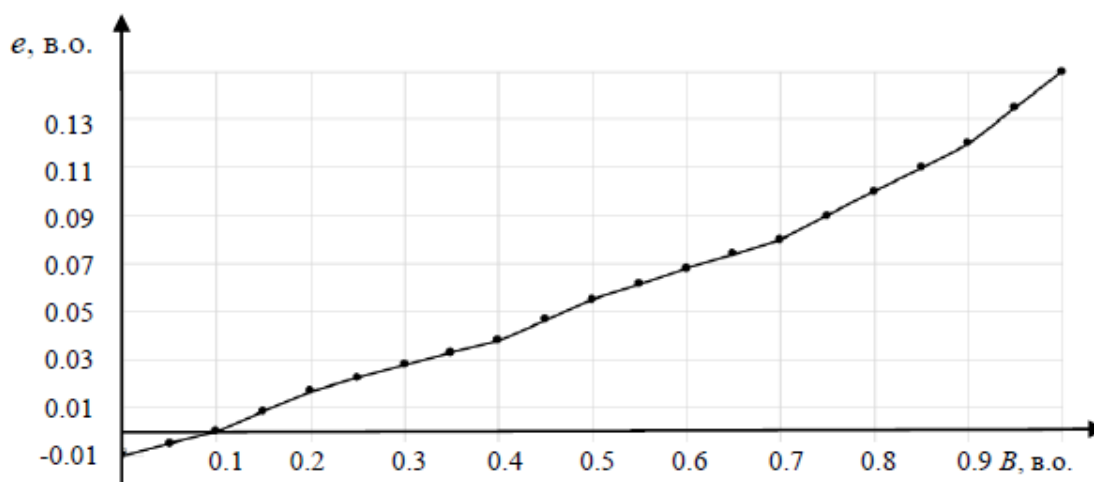


Рисунок 3.20 – Корируюча характеристика НТР

База правил, складена за результатами налаштування нечіткого регулятора, наведена в таблиці 3.3. Виправлені функції атрибута змінної e наведені на рисунку 3.21.

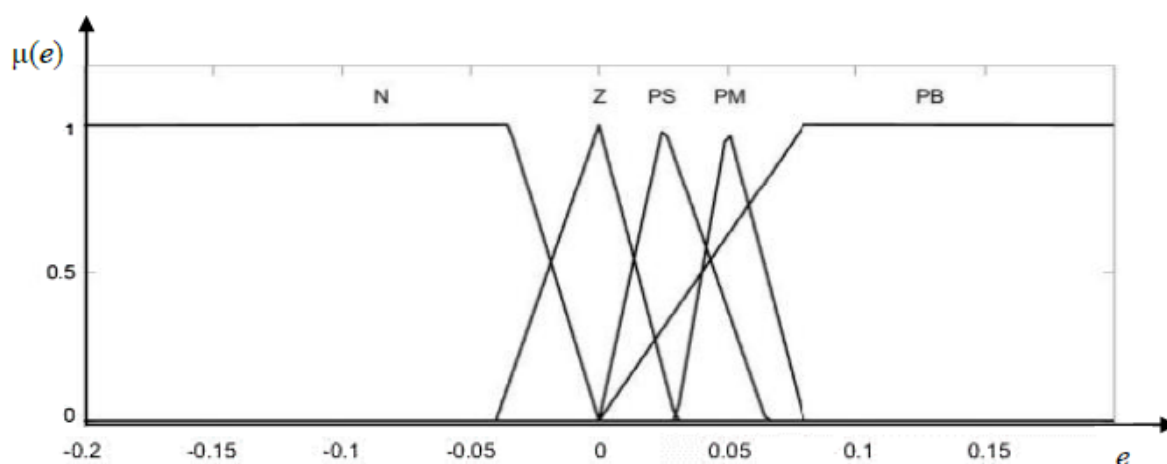


Рисунок 3.21 – Функції приналежності до вхідної лінгвістичної змінної e

Вплив значень вхідних змінних і правил на результат нечіткого висновку можна оцінити по поверхнях відгуку для різних значень крокової змінної $Step$ TSC , наведеної на рисунку 3.22. Результати моделювання наведені на рис.3.23-3.24.

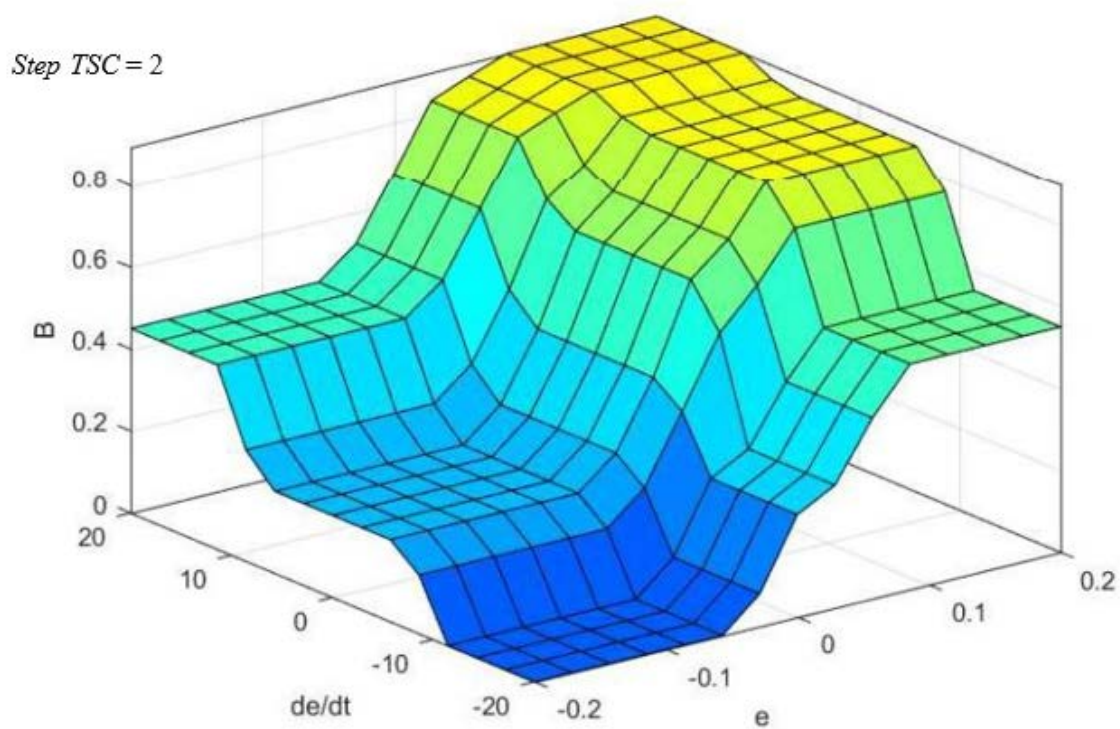
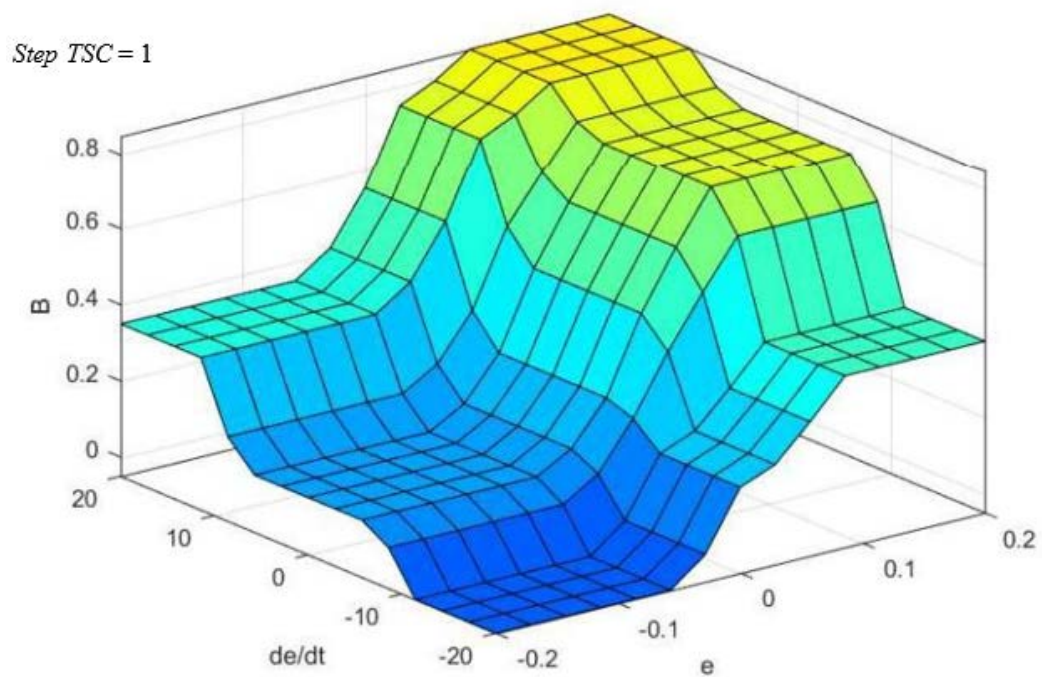


Рисунок 3.22 – Поверхні відгуків для *Step TSC = 1* і *Step TSC = 2*

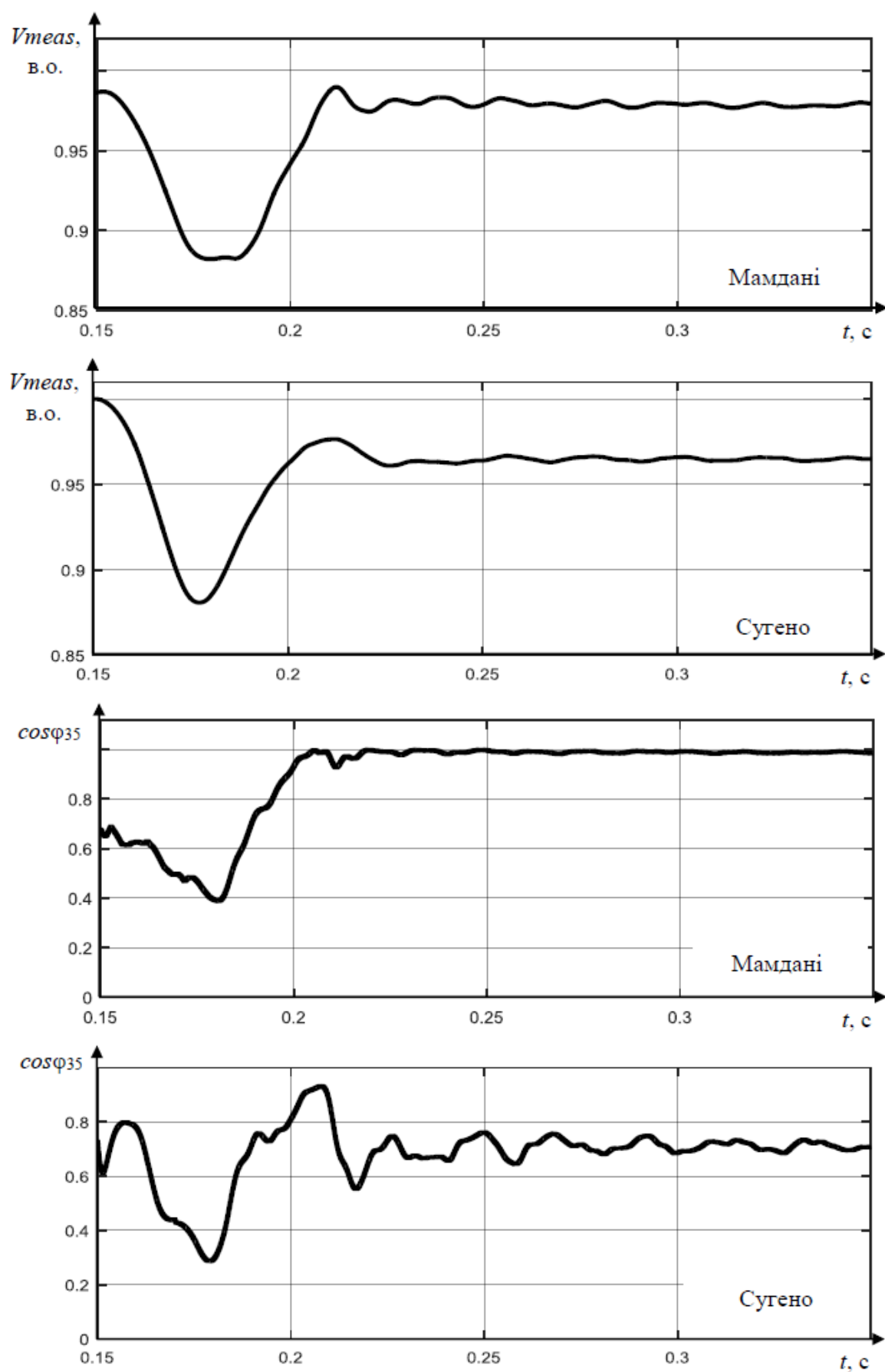


Рисунок 3.23 – Реакція системи при високій потужності навантаження

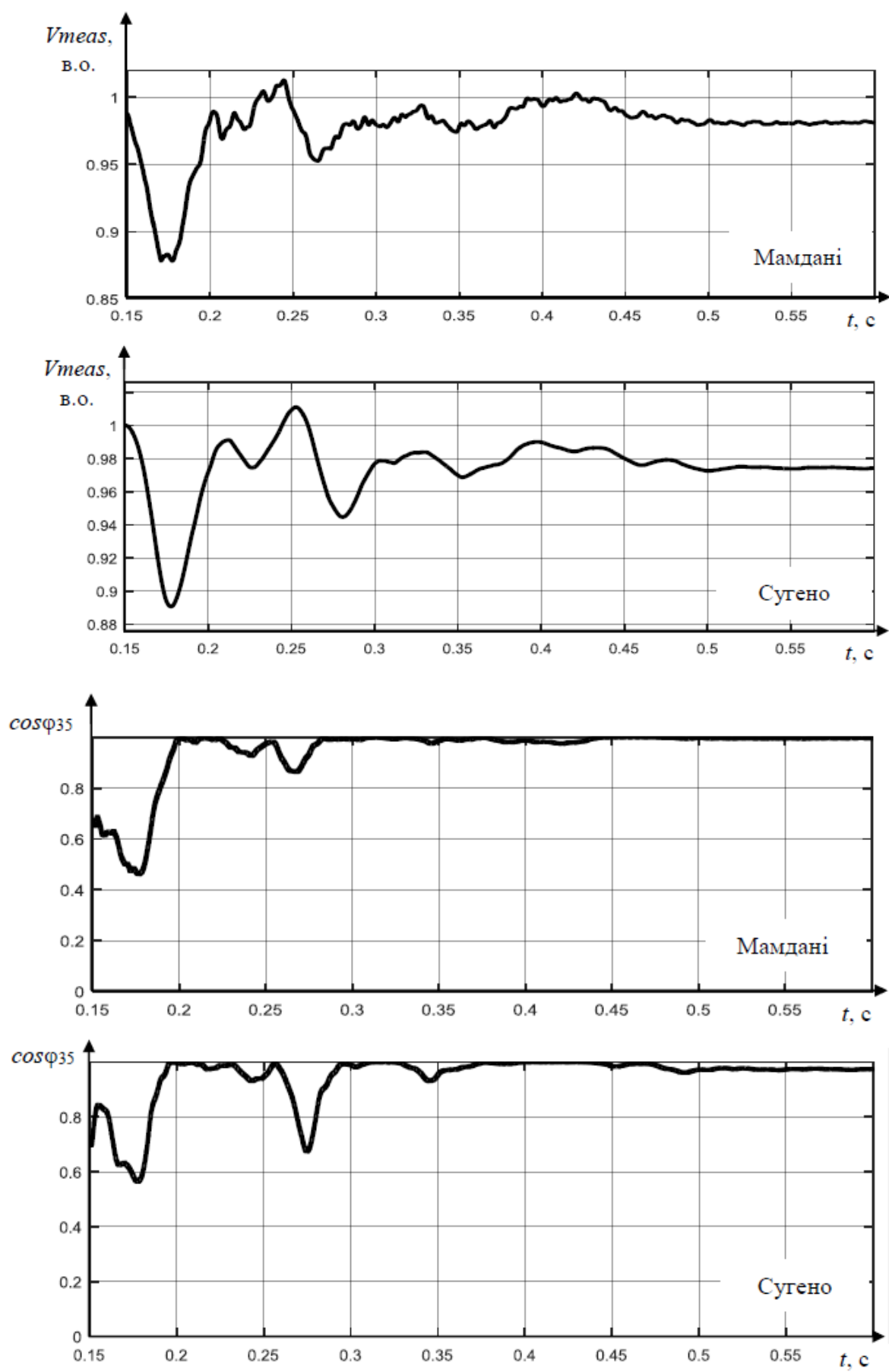


Рисунок 3.24 – Реакція системи при змінному навантаженні

Таблиця 3.3 – База правил за алгоритмом нечіткого виводу Сугено

de/dt	$\begin{matrix} TSC \\ e \end{matrix}$	Step0	Step1	Step2	Step3	Step4
Z	N	C-0.05	C0.1	C0.2	C0.25	C0.3
	Z	C0	C0.1	C0.3	C0.55	C0.75
	PS	C0.15	C0.3	C0.55	C0.8	C0.95
	PM	C0.45	C0.55	C0.65	C0.8	C0.95
	PB	C0.7	C0.75	C0.85	C0.95	C1
P	N	C0.2	C0.35	C0.45	C0.6	C0.75
	Z	C0.35	C0.45	C0.6	C0.7	C0.85
	PS	C0.55	C0.7	C0.8	C0.85	C0.95
	PM	C0.7	C0.75	C0.85	C0.9	C0.95
	PB	C0.8	C0.85	C0.9	C0.95	C1
N	N	C-0.1	C-0.05	C0	C0.05	C0.1
	Z	C-0.1	C0.1	C0.15	C0.25	C0.35
	PS	C0.05	C0.1	C0.15	C0.25	C0.4
	PM	C0.15	C0.25	C0.4	C0.5	C0.65
	PB	C0.25	C0.4	C0.55	C0.65	C0.75

На рисунку 3.23 показані результати дроселювання при високій потужності навантаження ($R_D = 3$ мОм і $X_L = 5$ мОм). Час дроселювання становить 0,08 с, перевищення немає. При цьому стаціонарне значення сигналу V_{meas} не перевищує 0,96 в.о. Коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ в кінці перехідного процесу досягає значення, близького до 0,75.

При змінному навантаженні (рис. 3.24) коливання V_{meas} стають особливо вираженими в діапазоні від 0,97 до 1,02 в.о. Коефіцієнт потужності, хоча і близький до 1, але значно відхиляється від заданого значення. Таким чином, можна зробити висновок, що керований СТК НР з висновком Сугено гірше справляється з компенсацією різко чергується навантаження.

Висновки до розділу:

Розглянуто застосування апарату нечіткої логіки для системи керування статичним тиристорним компенсатором, встановленим у сонячній електростанції з різко змінним навантаженням.

1. Виконано синтез нечіткого регулятора Мамдані з двома вхідними змінними (відхилення напруги від заданого значення e , похідна відхилення

de/dt) та вихідною змінною (провідність B). У порівнянні з PI-контролером, нечіткий регулятор дозволяє збільшити швидкість роботи системи, а також зменшити коливання сигналів напруги V_{meas} і коефіцієнта потужності $\cos\varphi$. Однак повернути сигнал V_{meas} до потрібного значення не вдається. Для стаціонарного сигналу e більше 5%.

2. Незважаючи на збільшення часу управління до 0,075с, нечіткий регулятор з висновком Мамдані успішно справляється з компенсацією різкозмінного навантаження.

3. Для порівняння в моделі системи управління СТК розглядається використання нечіткого регулятора з висновком Сугено з входними змінними e , de/dt , $Step\ TSC$ і вихідною змінною B . Результати моделювання показали, що НР Сугено гірше справляється з компенсацією різкозмінного навантаження, ніж НР Мамдані, так як спостерігається висока коливальність сигналів V_{meas} і $\cos\varphi$.

4. За результатами досліджень нечітких регуляторів в системі управління СТК видно, що перемикання режимів роботи навантаження призводить до значних перепадів напруги. Однак в реальній системі деякі зміни режимів можуть бути сплановані в технологічному процесі і здійснюватися в певні моменти часу.

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. Сучасні компенсуючі пристрої, що використовуються на металургійних підприємствах, недостатньо ефективно реагують на різкі зміни параметрів навантаження, що призводить до перевищення допустимих значень показників якості електроенергії: доза мерехтіння перевищує норму в 5 і більше разів, відхилення напруги досягають 12%, найбільші значення коефіцієнтів гармонійних складових $K_{U(2)}$ - до 12%, $K_{U(3)}$ - до 5%, $K_{U(5)}$ - до 4,5%, $K_{U(29)}$ - до 2%. Показано, що одним із шляхів збільшення швидкості реакції є оптимізація алгоритмів роботи системи керування компенсуючим пристроєм.

2. Розроблена імітаційна модель системи електроспоживання металургійного підприємства з ДСП і СТК дозволяє врахувати технологічні особливості даної системи. У моделі враховуються основні системоутворюючі блоки і такі неявні фактори, як взаємна індуктивність струмовідведень, падіння напруги в лінії, гістерезис магнітних сердечників, нелінійні характеристики силових ключів, інерційність обчислювального алгоритму синусоїда напруги.

Електрична дуга змінного струму як електромагнітний процес формалізується за схемою підстановки, що представляє собою послідовне з'єднання резистивних R_d і індуктивних X_L елементів. Змінний характер параметрів реалізується на основі керованих джерел напруги змінного струму, які виробляють сигнали, що відповідають падінням напруги на опорі та індуктивності дуги.

На основі моделі були визначені діапазони і підібрані точні значення параметрів дуги для подальших імітаційних експериментів, що забезпечило актуальність порівняння результатів моделювання. Опір дуги R_d змінюється від 0,1 мОм до 87 мОм, індуктивний опір X_L - від 1,7 мОм до 12 мОм. З цих діапазонів були обрані такі точки: $R_d = [0,1; 1; 3; 5; 7; 9; 11; 21; 35; 80]$ мОм; $X_L = [1,7; 5; 9; 12]$ мОм.

У моделі врахована можливість перемикання ступенів трансформатора

печі і реактора, які впливають на режими роботи системи електроживлення електроживлення електропечі.

3. Результати оцінки впливу параметрів електродугової печі (R_d і X_L), параметрів трансформатора печі і реактора на вимірювані (струми, напруги) і розрахункові (потужність, коефіцієнт потужності) параметри системи електропостачання в точці підключення СТК і безпосередньо на шинах живлення печі на основі розробленої моделі показали, що зміна параметрів трансформатора печі і реактора має менший вплив на вимірювані і розрахункові параметри системи електроспоживання, ніж зміна параметрів електродугової печі. Це дозволило виявити найбільш чутливі ділянки сонячної електростанції до зміни параметрів дуги.

4. Показано, що побудова системи стабілізації напруги системи електроспоживання у точці приєднання СТК на основі класичних законів керування при різко змінному навантаженні не забезпечує досягнення бажаних результатів. Нечутливість регулятора в деяких зонах, неоднозначність коефіцієнтів управління, збільшення статичної похибки і часу контролю при збільшенні потужності навантаження призводить до неможливості стабілізації рівня напружень при різко змінному навантаженні.

5. Запропонований підхід і структурний синтез системи нечіткого керування статичним тиристорним компенсатором в системі електропостачання з ДСП, реалізований на його основі, надали системі властивість робастності. Спостерігається зниження відхилень напруги на 5 – 10% і збільшення коефіцієнта потужності на 20 – 30% в порівнянні з системою, що містить ПІ-контролер.

6. Для врахування специфічних особливостей технологічного режиму роботи ДСП запропоновано вдосконалити структуру нечіткого регулятора шляхом введення додаткового інформаційного каналу. Це дозволило досягти практично однакових якісних показників системи електроспоживання при роботі ДСП на різних етапах.

7. Розроблені алгоритми нечіткого керування компенсуючим пристроєм,

реалізовані в побудові нечіткого регулятора за вихідними правилами Мамдані та Сугено, продемонстрували покращення показників якості потужності в системі електроспоживання з різко змінним навантаженням. Величина відхилення напруги V_{meas} не перевищує 5 – 6% і в більшості випадків укладається в 3 – 4%. Коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ прагне до 1 з періодичними перепадами до 0,8 – 0,9.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Abdelnasser A. Nafeh, Aya Heikal, Ragab A. El-Sehiemy, Waleed A.A. Salem, Intelligent fuzzy-based controllers for voltage stability enhancement of AC-DC micro- grid with D-STATCOM. Alexandria Engineering Journal, Volume 61, Issue 3, 2022, P. 2260-2293. DOI: 10.1016/j.aej.2021.07.012.
2. Biplab Bhattacharyya, Vikash Kumar Gupta, Fuzzy based evolutionary algo- rithm for reactive power optimization with FACTS devices. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 61, 2014, P. 39-47. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.03.008.
3. Deryuzhkova N.E., Solovyev V.A., Kupova A.V. Intelligent Control System for Static Var Compensator of Arc Furnace // 2019 International Multi-Conference on Indus- trial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). - Asian- Pacific region, October 1 – 4, 2019. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934436
4. Dinesh Shetty, Nagesh Prabhu, Analysis and Performance evaluation of Type 1 Fuzzy Reactive Current Controller with STATCOM. Energy Procedia, Volume 117, 2017. P. 551-558. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.05.145.
- 5 Hamid Rezaie, Mohammad Hossein Kazemi-Rahbar Enhancing voltage stability and LVRT capability of a wind-integrated power system using a fuzzy-based SVC. En- gineering Science and Technology, an International Journal, Volume 22, Issue 3, 2019, P. 827-839. DOI: 10.1016/j.jestch.2018.12.018.
6. Lu J., Nehrir M.H., Pierre D.A., A fuzzy logic-based adaptive damping controller for static VAR compensator. Electric Power Systems Research Volume 68, Issue 2, 2004, P. 113-118. DOI: 10.1016/S0378-7796(03)00160-3.
7. MatLab/demos/SimPowerSystems/FACTS Demos/SVC(detailed model), Power System Laboratory, IREQ Hydro-Quebec (Pierre Giroux, Gilbert Sybille)
8. Modi P.K., Singh S.P., Sharma J.D., Fuzzy neural network based voltage stabil- ity evaluation of power systems with SVC. Applied Soft Computing, Volume 8, Issue 1, 2008, P. 657-665. DOI: 10.1016/j.asoc.2007.05.004.

9. Qun Gu, Anupama Pandey, Shelli K Starrett, Fuzzy logic control schemes for static VAR compensator to control system damping using global signal. Electric Power Systems Research, Volume 67, Issue 2, 2003, P. 115-122. DOI: 10.1016/S0378- 7796(03)00077-4.

10. Rastegar H., Abedi M., Menhaj M.B., Fathi S.H., Fuzzy logic based static VAR compensators for enhancing the performance of synchronous and asynchronous motor loads. Electric Power Systems Research, Volume 50, Issue 3, 1999, P. 191-204. DOI: 10.1016/S0378-7796(98)00140-0

11. Yamakawa T., Uchino E., Takayama M. An approach to designing the fuzzy if-then rules for fuzzy-controlled static var compensator (FCSVC) Information Sciences Volume 101, Issues 3–4, October 1997, P. 249-260. DOI: 10.1016/S0020-0255(97)00012-1

12. Федченко, И.К. Измерение температуры электрической дуги. Киев: Техника, 1966. 154 с.

13. Демидова Г.Л., Лукичев Д.В. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами. Харьков: 2017. 81 с.

14. Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1987. 336с.

15. Марков Н.А. Электрические цепи и режимы дуговых электроустановок. М., «Энергия», 1975. 20 с.

16. Матура Р.М. Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности. М.: Энергоатомиздат, 1987. 160с.

17. Сисоян Г.А., Электрическая дуга в электрической печи. 3-е изд., М., «Металлургия», 1974, 304 с,

18. Федоров А.А. Электроснабжение промышленных предприятий: Учебник для вузов. М.: Энергия, 1981. 360 с.

19. Башкатова, А.В. Автоматизована система управління процесом виплавки сталі в електродуговій печі. Промислові автоматизовані системи управління та контролери. 2016. №8. С. 3-11.

20. Глишков, Г. М. Контроль и автоматизация металлургических процессов. М.: Металлургия, 1989. С. 352.
21. Егоров, А.В. Электроплавильные печи черной металлургии. М.: Металлургия, 1985. 280 с.
22. Верещаго, Е.Н. Модель электрической дуги в MatLab /Simulink. Електротехніка і електроенергетика. 2013. №2.С. 40-46.
23. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия Телеком, 2007. 288 с.
24. Паранчук Я.С., Мацигін А.Б. Моделювання та дослідження режимів трифазної системи регулювання потужності дуг дугової сталеплавильної печі на основі нейрорегулятора у миттєвих координатах. // Електротехнічні та комп'ютерні системи № 15(91), 2014. с. 190 – 193.
25. Хрестін Р.М. Моделювання електричних параметрів дуги дугової сталеплавильної печі. ISSN 2074-272X. Електротехніка і Електромеханіка. 2015. №4. с. 45 – 48.
26. Collantes-Bellido R., Gomez T. Identification and modeling of a three phase arc furnace for voltage disturbance simulation // IEEE Transactions on Power Delivery.1997. Vol.12. №4. PP.1812-1817.
27. Gelada J. Electrical analysis of the steel melting arc furnace // Iron and Steel Engineer.1993. Vol.70. №5. P.35-39.
28. Heydt G.T., O'Neill-Carrillo E., Zhao R.Y. The modeling of nonlinear loads as chaotic systems in electric power engineering // Proc. Of the IEEE/PEC International Conference on Harmonics and Quality of Power. Las Vegas.1996. PP.704- 711.
29. Higgs R.W. Sonic Signature Analysis for Arc Furnace Diagnostics and Control// Proc. of Ultrasonics Symposium. Milwaukee. 1974. PP.653-663.
30. Mallat, S. A. Wavelet tour of signal processing. Academic Press, 2009. 832p.
31. Ozgun O., Abur A. Development of an Arc Furnace Model for Power Quality Studies // Power Engineering Society Summer Meeting. 1999. № 1. P.507–

511.

32. Richardson G.D. Physycal Chemistry of Melts in Metallurgy. N.Y.: Acad. Press. 1974. Vol. 1, 2.

33. Ting W., Wennan S., Yao Z. A New Frequency Domain Method for the Harmonic Analysis of power system with Arc Furnace // 4th international conference on advances in power system control. 1997. PP.552–555.

34. Власов К. П. Теория автоматического управления: учебное пособие. Харьков: Гуманитарный центр, 2007. 526 с.

35. ГОСТ 32144. Міжнародний стандарт. Електрична енергія. Електромагнітна сумісність технічних засобів. Стандарти якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення. Київ, Держстандарт України, 2014. 15 с

36. Маринич І. А., Тронь В. В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи магістра для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2022. 50 с.

37. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).

38. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).

39. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація)

40. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація)