

Національна академія наук України
Інститут електродинаміки

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”

ЧИЖЕВСЬКИЙ ВОЛОДИМИР ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 621.311

**ОЦІНЮВАННЯ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ ЗАГРОЗИ КОЛИВНОГО
ПОРУШЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГООБ’ЄДНАННЯ**

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник –
Буткевич Олександр Федотович,
доктор технічних наук, професор

Київ – 2016

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ПРОБЛЕМА НИЗЬКОЧАСТОТНИХ КОЛИВАНЬ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ В ЕНЕРГООБ'ЄДНАННЯХ.....	13
1.1 Загальна характеристика проблеми.....	13
1.2 Низькочастотні коливання, небезпечні в аспекті стійкості ЕО.....	16
1.3 Аналіз причин виникнення та класифікація НЧК.....	21
1.4 Підходи до виявлення в ЕО НЧК та визначення параметрів їхніх складових.	27
Висновки по розділу 1.....	32
РОЗДІЛ 2 ДЕМПФІРУВАННЯ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ В ЕНЕРГООБ'ЄДНАННЯХ.....	33
2.1 Засоби демпфірування НЧК в ЕО.....	33
2.2 Демпфірування НЧК в ЕО за допомогою САКЗ СМ.....	42
2.3 Дослідження ефективності PSS в аспекті демпфірування НЧК.....	58
2.4 Інтегрована система демпфірування НЧК та модельно-розрахункові дослідження ефективності демпфірування НЧК в ЕО з її використанням...	69
Висновки по розділу 2.....	87
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ В АСПЕКТІ ОЦІНЮВАННЯ ЗАГРОЗИ КОЛИВНОГО ПОРУШЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГООБ'ЄДНАННЯ.....	89
3.1 Аналіз можливостей WAMS щодо інформаційного забезпечення ІСД НЧК ЕО...	89
3.2 Дослідження методів аналізу сигналів в аспекті їх придатності для використання в ІСД НЧК ЕО.....	90
3.2.1 Визначення основних вимог до методів аналізу сигналів з метою забезпечення надійної ідентифікації домінантних мод НЧК в режимі реального часу	90
3.2.2 Дискретне перетворення Фур'є.....	92
3.2.3 Непараметричні методи.....	95

3.2.4	Параметричні методи.....	99
3.2.4.1	Проблема визначення порядку параметричної моделі.....	99
3.2.4.2	Методи авторегресійної моделі.....	101
3.2.4.3	Методи експоненціальної моделі.....	105
3.2.5	Вейвлет-перетворення.....	119
3.2.6	Перетворення Стоквелла та його модифікації.....	121
3.2.7	Перетворення Гільберта-Хуанга та його модифікації.....	124
3.3	Порівняльні дослідження та селекція методів аналізу сигналів для оцінювання загрози коливного порушення стійкості ЕО в режимі реального часу.....	128
	Висновки по розділу 3.....	149
РОЗДІЛ 4 ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ONLINE-ОЦІНЮВАННЯ ЗАГРОЗИ КОЛИВНОГО ПОРУШЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГООБ'ЄДНАННЯ... 151		
4.1	Розроблення процедури узагальнення результатів виявлення домінантних мод НЧК та визначення їхніх параметрів	151
4.2	Способи підвищення достовірності визначення параметрів домінантних мод НЧК засобами програмного комплексу online-оцінювання загрози коливного порушення стійкості ЕО.....	166
4.2.1	Дослідження впливу цифрової фільтрації сигналів на результати визначення параметрів домінантних мод НЧК.....	166
4.2.2	Дослідження впливу використання миттєвих значень сигналів на результати визначення параметрів низькочастотних складових коливань..	174
4.3	Особливості реалізації програмних засобів інформаційного “ядра” ІСД НЧК.	177
	Висновки по розділу 4.....	182
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ..... 183		
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....185		
Додаток А Параметри чотиримашинної тестової схеми ЕС.....		208
Додаток Б Параметри шестимашинної тестової схеми ЕС.....		211
Додаток В Моделі деяких типів AVR САКЗ СМ у середовищі “Matlab” та їхні параметри..		215
Додаток Г Моделі деяких типів PSS у середовищі “Matlab” та їхні параметри.....		219
Додаток Д Тестові та зареєстровані сигнали.....		221

Додаток Е Результати аналізу вибірок даних тестових та зареєстрованих сигналів...	227
Додаток Ж Програмна реалізація обчислювальних засобів для online-оцінювання загрози коливного порушення стійкості ЕО.....	287
Додаток И Цифровий фільтр Чебишева другого роду.....	294
Додаток К Копія акта впровадження результатів дисертаційної роботи у виробництво..	295

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АРЗ	– автоматичний регулятор збудження
АРЗ СД	– автоматичний регулятор збудження сильної дії
БП	– балансуєчий пункт
ВП	– вейвлет-перетворення
ВТФ	– вейвлетотвірна функція
ДФФ	– дискретне перетворення Фур'є
ЕВРП	– електровимірювальний реєструвальний прилад
ЕО	– електроенергетичне об'єднання
ЕРС	– електрорушійна сила
ЕС	– електроенергетична система
ЕС _т	– електростанція
ЄЕС	– Єдина електроенергетична система
ЗСг	– зареєстрований сигнал
ІСД	– інтегрована система демпфірування
КІВП	– комплекс ідентифікації та визначення параметрів
КЗ	– коротке замикання
ЛЕП	– лінія електропередачі
МЗ	– міжсистемний зв'язок
МПП	– мале приватне підприємство
НЕ	– накопичувач енергії
НЧК	– низькочастотні коливання
ОЕС	– Об'єднана електроенергетична система
ПК	– поздовжня компенсація
ППК	– поперечна компенсація
ПППК	– поздовжньо-поперечна компенсація
ПС	– підстанція
САКЗ	– система автоматичного керування збудженням
СГ	– синхронний генератор

СПП	– спектральна густина потужності
СМ	– синхронна машина
СЧ	– середні частоти
ТС	– тестова схема
ТСг	– тестовий сигнал
ШПФ	– швидке перетворення Фур'є
AIC	– Akaike's Information Criterion – інформаційний критерій Акаїкі
AVR	– Automatic Voltage Regulator – автоматичний регулятор напруги
CSC	– Convertible Static Compensator – обертовий статичний компенсатор
EEF	– Exponentially Embedded Family – експоненціально вбудоване сімейство
EMD	– Empirical Mode Decomposition – емпіричне розвинення за модами
EV	– EigenVector (method) – (метод) власних векторів
ENTSO–E	– European Network of Transmission System Operators for Electricity – Європейська мережа системних операторів передачі електроенергії
FACTS	– Flexible Alternating Current Transmission Systems – гнучкі системи передачі змінного струму
GPS	– Global Positioning System – система глобального позиціонування
IMF	– Intrinsic Mode Function – функція власних мод
ННТ	– Hilbert-Huang Transform – перетворення Гільберта-Хуанга
HTLS	– Hankel Total Least Squares (method) – (метод) загальних найменших квадратів Ганкеля
HVDC	– High-Voltage Direct Current – високовольтні системи постійного струму
МННТ	– Modified Hilbert-Huang Transform – модифіковане перетворення Гільберта-Хуанга
MP	– Matrix Pencil (method) – (метод) пучка матриць
MDL	– Minimum Description Length – мінімальна довжина опису
MSD	– Model Structure Determination – визначення структури моделі
MUSIC	– MULTiple Signal Classification – багатократна класифікація сигналу
OEL	– OverExcitation Limiter – обмежувач максимального збудження
PMU	– Phasor Measurement Unit – пристрій векторних вимірювань

PSS	– Power System Stabilizer – системний стабілізатор
SNR	Signal-to-Noise Ratio – відношення сигнал/шум
SSSC	– Static Series Synchronous Compensator – статичний поздовжній синхронний компенсатор
ST	– Stockwell Transform – перетворення Стоквелла
STATCOM	– STATic synchronous COMpensator – статичний синхронний компенсатор
SVC	– Static Var Compensator – статичний компенсатор реактивної потужності
TCSC	– Thyristor Controlled Series Capacitor – тиристорно-керована поздовжня ємність
UEL	– UnderExcitation Limiter – обмежувач мінімального збудження
UPFC	– Unified Power Flow Controller – уніфікований контролер потоків потужності
WAMS	– Wide Area Measurement System – система глобального моніторингу

ВСТУП

Актуальність теми. Інтеграційні процеси, які тривають у світовій електроенергетиці з другої половини ХХ ст., призвели до створення потужних електроенергетичних об'єднань (ЕО). У таких ЕО паралельно працює багато синхронних машин (СМ) і здійснюється електропостачання великої кількості споживачів. Забезпечення стійкості режимів ЕО є основною умовою функціонування ЕО. Водночас за останні десять років в ЕО Європи, Азії та Америки було зареєстровано чимало аварій, обумовлених виникненням і подальшим посиленням електромеханічних низькочастотних коливань (НЧК) з частотою, що не перевищувала 1 Гц.

У різні роки дослідженнями причин виникнення НЧК в електроенергетичних системах (ЕС) та питаннями їх демпфірування займалися М. Klein, G. J. Rogers, P. Kundur, L. L. Grigsby, A. R. Messina, N. Kakimoto, G. Duan, G. Breulman, L. Zhang, P. Bikash та багато інших. Проте, віддаючи належне науковому рівню і глибині проведених досліджень проблеми демпфірування НЧК в ЕО (ЕС) (далі під час розгляду процесів, які можуть мати місце як в ЕО, так і в ЕС, використано аббревіатуру “ЕО”), слід визнати, що задачі оцінювання в реальному часі загрози коливного порушення стійкості ЕО внаслідок виникнення НЧК та забезпечення їх надійного демпфірування і на сьогодні залишаються актуальними, що підтверджується випадками спричинених НЧК системних аварій. У разі переходу Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України до паралельної роботи з ЕО країн Європи (ENTSO-E) для такого розширеного ЕО зросте актуальність проблеми унеможливлення коливного порушення стійкості внаслідок виникнення небезпечних для функціонування ЕО НЧК, оскільки у новому (розширеному) ЕО з'являться додаткові слабкі електричні зв'язки, групи СМ, вітрові електричні станції та інші чинники, які сприятимуть виникненню НЧК. До основних задач, які стоять на шляху вирішення зазначеної проблеми, належить створення засобів оцінювання в реальному часі загрози коливного порушення стійкості ЕО, викликаного виникненням НЧК. Актуальність цієї задачі і обумовила вибір теми дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Одержані в дисертації результати є частиною результатів виконання за участю автора в Інституті електродинаміки Національної академії наук України (ІЕД НАН України) та на кафедрі електричних мереж та систем Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” (НТУУ “КПІ”) в рамках виконання наукових проектів:

1) “Науково-технічні засади побудови та засоби практичної реалізації компонентів проблемно-орієнтованої системи моніторингу режимів об’єднаної електроенергетичної системи України” (№ ДР 0107U002100, 2007 р.) комплексної програми наукових досліджень НАН України “Науково-технічні проблеми інтеграції енергетичної системи України в Європейську енергетичну систему” (“Інтеграція”) (ІЕД НАН України);

2) “Розвиток наукових основ створення засобів моніторингу, діагностики та керування електроенергетичними системами та об’єктами” (“Діамант-2”) (№ ДР 0107U002701, 2011 р.) програми наукових досліджень НАН України “Наукові основи сучасних енергоефективних технологій генерування та перетворення електричної та теплової енергії” (ІЕД НАН України);

3) “Об.2.2 Комплекс науково-технічних засобів та заходів з підвищення рівня керованості режимів ОЕС України та запобігання виникненню системних аварій: дослідження та розробки” (№ ДР 0113U005235, 2013 р.) цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України “Науково-технічне, нормативне та інформаційне забезпечення створення гнучкої та адаптивної об’єднаної енергетичної системи України” (“Об’єднання-2”) (ІЕД НАН України);

4) “Розробка математичних моделей та методів аналізу і оптимізації розвитку основних мереж енергосистем в умовах ринкових відносин” (№ ДР 0112U002423) (НТУУ “КПІ”).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є підготовка ефективного математичного апарату для оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕО, обумовленої виникненням НЧК, розроблення і впровадження у виробництво відповідних програмних засобів.

Для досягнення поставленої мети потрібно було вирішити такі завдання:

- дослідити умови ефективного використання систем автоматичного керування збудженням (САКЗ) СМ з метою демпфірування НЧК в ЕС (ЕО);
- визначити вимоги до розв’язання в режимі реального часу задачі оцінювання загрози коливного порушення стійкості ЕО та дослідити методи аналізу сигналів в аспекті їх придатності для визначення в режимі реального часу параметрів домінантних мод НЧК в ЕО;
- визначити умови використання відібраних методів та розробити відповідну процедуру для надійного оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕО, обумовленої виникненням НЧК;
- впровадити у виробництво розроблені програмні засоби.

Об'єктом дослідження є режими ЕС та ЕО, в яких виникають НЧК.

Предметом дослідження є методи, моделі та засоби оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕО.

Методи дослідження. Вирішення поставлених у дисертаційній роботі завдань ґрунтується на методах аналізу усталених та перехідних режимів ЕС, теорії стійкості, модального аналізу, методах аналізу сигналів, комп'ютерному математичному моделюванні як засобі виконання досліджень.

Достовірність теоретичних положень дисертації підтверджено збігом одержаних результатів досліджень з використанням тестових моделей ЕС (чотиримашинна ЕС, шестимашинна ЕС) з відомими результатами, одержаними з використанням цих моделей.

Наукова новизна одержаних результатів.

1) Вперше визначено вимоги до розв'язання в режимі реального часу задачі оцінювання загрози коливного порушення стійкості ЕО і внаслідок всебічного дослідження здійснено селекцію методів аналізу сигналів з огляду на їх придатність для розв'язання зазначеної задачі.

2) Для забезпечення надійності та адекватності оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕО вперше запропоновано використовувати ансамбль попередньо відібраних методів аналізу сигналів та розроблено процедуру такого використання.

3) Запропоновано та обґрунтовано новий підхід до застосування засобів ідентифікації та визначення параметрів домінантних мод НЧК у вигляді інформаційного “ядра” – основної функціональної складової інтегрованої системи демпфірування (ІСД) НЧК в ОЕС України, що забезпечить оперативність та однозначність наданих результатів складовим ІСД НЧК.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що застосування розроблених програмних засобів, які реалізують ансамбль методів ідентифікації та визначення параметрів домінантних мод НЧК, надає змогу оцінювати в режимі реального часу загрозу коливного порушення стійкості ЕО і запобігати системним аваріям, обумовленим виникненням небезпечних НЧК. Розроблені програмні засоби ідентифікації та визначення параметрів домінантних мод НЧК використано малим приватним підприємством (МПП) “Анігер” для розширення функцій комплексу програм верхнього об'єктного рівня електровимірювальних реєструючих приладів (ЕВРП) “Регіна-Ч”, які впроваджено на об'єктах ОЕС України. При подальшому впровадженні ЕВРП “Регіна-Ч” на об'єктах ОЕС України також передбачено використання зазначених програмних засобів.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення і результати, які винесено на захист дисертаційної роботи, належать здобувачу особисто. У наукових працях, які опубліковано у співавторстві, здобувачу належить:

– в [1] – визначено вимоги до формування та оброблення дискретних вибірок даних (результатів реєстрації режимних параметрів), для забезпечення виявлення в реальному часі небезпеки коливного порушення стійкості ЕО;

– в [2] – досліджено методи швидкого перетворення Фур'є, спектрограми, періодограми, Велча та Томсона в аспекті можливості їх застосування для визначення параметрів складових НЧК в ЕО;

– в [3] – запропоновано застосування ансамблю програмних засобів (що реалізують відповідні методи) ідентифікації домінантних мод НЧК як інформаційного “ядра” ІСД НЧК;

– в [4] – виконано дослідження сигналів з метою визначення частот домінантних складових НЧК тестової шестимашинної ЕС;

– в [5] – досліджено можливість застосування методу Проні для визначення в реальному часі параметрів складових НЧК в ЕО;

– в [7] – проведено дослідження впливу налаштувань САКЗ СМ на ефективність демпфірування НЧК;

– в [8] – здійснено селекцію методів аналізу сигналів, призначених для надійного забезпечення інформацією складових ІСД НЧК;

– в [25] – проведено оброблення результатів вимірювання режимних параметрів для ліній електропередачі (ЛЕП) зі складу різних контрольованих перетинів ОЕС України з метою визначення частот домінантних мод НЧК;

– в [92] – запропоновано використання ансамблю методів аналізу сигналів з метою забезпечення надійності та адекватності оцінювання в реальному часі загрози коливного порушення стійкості ЕО.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи і результати досліджень доповідалися і обговорювалися на:

– загальноуніверситетській науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів і студентів “Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики” (19 листопада 2007 р., м. Київ);

- Міжнародній конференції CIGRE “Monitoring of Power System Dynamics Performance” (28–30 квітня, 2008 р., м. Санкт-Петербург, Російська Федерація);
- X-й Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми сучасної електротехніки – 2008” (3–5 червня 2008 р., м. Київ);
- Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів і студентів “Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики” (27 листопада 2008 р., м. Київ);
- I-й Міжнародній науково-технічній конференції “Інтелектуальні енергетичні системи – ІЕС (ESS'10)” (15 червня 2010 р., “Фортуна”, Свалявський р-н, Закарпатська обл.);
- II-й Міжнародній науково-технічній конференції “Інтелектуальні енергетичні системи – ІЕС (ESS'11)” (7–10 червня 2011 р., с. Поляна, Свалявський р-н, Закарпатська обл.);
- XII-му Міжнародному симпозиумі “Обчислювальні проблеми електротехніки – 2011” (СРЕЕ'2011) (5–7 вересня 2011 р., с. Кострина, Закарпатська обл.);
- I-й Міжнародній науково-технічній конференції “Оптимальне керування електроустановками” (ОКЕУ–2011) (25–27 жовтня 2011 р., м. Вінниця);
- науково-технічній конференції “Електроенергетика України – європейський шлях розвитку” (18 квітня 2012 р., м. Київ);
- III-й Міжнародній науково-технічній конференції “Інтелектуальні енергетичні системи – ІЕС (ESS'13)” (10 червня 2013 р., м. Мукачеве, Закарпатська обл.);
- Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів і студентів “Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики” (2–6 грудня 2013 р., м. Київ);
- XIII-й Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми сучасної електротехніки – 2014” (3–6 червня 2014 р., м. Київ,).

Публікації. Основні положення та результати дисертаційної роботи опубліковано у 15 наукових працях, в тому числі:

- 11 статтях у наукових фахових виданнях (6 статей у виданнях України та 1 статтю у зарубіжному виданні включено до міжнародних наукометричних баз даних, в тому числі 2 – до міжнародної наукометричної бази даних Scopus);
- 2 доповідях у збірниках за матеріалами міжнародних конференцій;
- 2 тезах доповідей у збірниках за матеріалами міжнародного симпозиуму та загальноуніверситетської конференції.

РОЗДІЛ 1

ПРОБЛЕМА НИЗЬКОЧАСТОТНИХ КОЛИВАНЬ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ В ЕНЕРГООБ'ЄДНАННЯХ

1.1 Загальна характеристика проблеми

Розвиток світової електроенергетики протягом останнього півстоліття характеризувався утворенням потужних ЕО. Зокрема, в цей період в Європі було створено транснаціональні ЕО NORDEL (ЕС Фінляндії, Швеції, Норвегії та Східної Данії), BALTSO (ЕС Естонії, Латвії та Литви), UKTSOA (ЕС Англії, Шотландії та Уельсу), ATSOI (ЕС Ірландії та Північної Ірландії), UCTE (ЕС 25 країн Європи), які в подальшому об'єдналися в континентальне ЕО ENTSO–Е [53]. Зазначені процеси інтеграції національних ЕС (ЕО) з утворенням транснаціональних ЕО мають місце в усьому світі і обумовлені низкою технологічних та економічних переваг великих ЕО в порівнянні з національними ЕС та ОЕС.

Починаючи з 2002 р., проводяться дослідження щодо можливості забезпечення паралельної роботи ОЕС України з ЕО країн Євросоюзу, щоб реалізувати експортний потенціал ОЕС України та забезпечити її вихід на загальноєвропейський ринок електричної енергії, як це передбачено Енергетичною стратегією України на період до 2030 р. та проектом Енергетичної стратегії України на період до 2035 р. [14, 15].

Об'єднання ЕС на паралельну роботу та утворення ОЕС призводить до зміни характеру проблеми стійкості і може суттєво обмежувати завантаження міжсистемних електричних зв'язків через можливість виникнення небезпечних для функціонування ОЕС НЧК (за англійською термінологією (англ.) – inter-area oscillations [89]). Виникнення НЧК пов'язано з коливаннями в протифазі на частоті до 1 Гц роторів СМ, які належать до певних когерентних груп СМ. Якщо такі коливання супроводжуватимуться невинним зростанням амплітуд режимних параметрів ОЕС (насамперед, потоків активної потужності по відповідним зв'язкам, які поєднують зазначені групи СМ), то це призводитиме до загрози коливного порушення стійкості ОЕС і до аварійного вимкнення зазначених міжсистемних зв'язків (МЗ).

Нерідко НЧК в ОЕС містять декілька складових (мод) з різними частотами [39, 68, 123, 131]. Виникнення небезпечних для ОЕС НЧК супроводжується зростанням амплітуд домінантних мод, частоти яких відповідають власним частотам ОЕС. Сам факт наявності домінантних мод не становитиме загрози функціонуванню ОЕС до виникнення

умов, за яких відбуватиметься зростання амплітуд НЧК до значень уставок протиаварійної автоматики. Вирішення проблеми запобігання системним аваріям в ОЕС, викликаним НЧК, потребує існування системи ефективного демпфірування НЧК, проте, як свідчить наявний досвід функціонування різних ОЕС, дії засобів демпфірування НЧК не завжди є ефективними. Тому водночас існує необхідність у плануванні та веденні режимів ЕС (ОЕС) з урахуванням певних обмежень, виконання яких знижує ризик виникнення НЧК.

Дослідження динамічних властивостей ЕС (ЕО) потребує застосування відповідної математичної моделі, яка являє собою систему звичайних нелінійних диференціальних та алгебричних рівнянь. Зазвичай для дослідження процесів виникнення НЧК порядок диференціальних рівнянь в такій системі зводять до першого з отриманням системи вигляду

$$\begin{cases} \dot{x} = F(x, u) \\ y = G(x, u) \end{cases} \quad (1.1)$$

де x – вектор змінних стану (містить, переважно, параметри стану СМ – кути роторів, кутові швидкості, електрорушійні сили (ЕРС) тощо);

u – вектор керівних впливів;

y – вектор вихідних (результуючих) сигналів, які показують результат керівних впливів;

F, G – відповідно, диференціальні рівняння першого порядку та алгебричні функції від x та u [101, 134].

Лінеаризація (1.1) у певній точці рівноваги, для якої $F(x) = 0$, дає змогу отримати систему рівнянь у варіаціях

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = A \cdot \Delta x + B \cdot \Delta u \\ \Delta y = C \cdot \Delta x + D \cdot \Delta u \end{cases} \quad (1.2)$$

де A – матриця стану;

B – матриця керування;

C – матриця результуючих сигналів;

D – матриця прямого зв'язку.

Лінеаризовану систему (1.2) широко застосовують під час проведення досліджень властивостей ЕС та ЕО з метою запобігання порушень їх функціонування, зокрема і тих, які пов'язані з виникненням НЧК режимних параметрів [110, 135, 142]. Проте, не дивлячись на проведені численні дослідження, такі порушення постійно мають місце. Наприклад, НЧК режимних параметрів спостерігалися в ЕС та ЕО таких країн:

- Англія – Шотландія (1980 р.) – частота коливань близько 0,5 Гц [123];
- Тайвань (1984 р., 1989 р., 1990 р., 1991р., 1992 р.) – частота коливань у діапазоні 0,78...1,05 Гц [68, 123];
- Іспанія – Німеччина (16 грудня 1996 р.) – частота коливань у діапазоні 0,20...0,26 Гц [39];
- Захід США – Канада (10 серпня 1996 р.) – частота коливань близько 0,22 Гц (результатом порушення було припинення паралельної роботи зазначених ЕС) [123];
- Іспанія – Франція – Німеччина – Угорщина – Польща (17 січня 1997 р.) – частота коливань у діапазоні 0,25...0,42 Гц [39];
- країни Скандинавії (1997 р.) – частота коливань близько 0,5 Гц [123];
- Іспанія – Франція – Німеччина – Словаччина – Угорщина – Польща (17 серпня 1998 р.) – частота коливань у діапазоні 0,24...0,26 Гц [39];
- Фінляндія – Швеція (1998 р.) – частота коливань близько 0,3 Гц [52];
- КНР (06 березня 2003 р.) – частота коливань близько 0,4 Гц (результатом порушення було масштабне відключення споживачів) [123];
- США – Канада (14 серпня 2003 р.) – частота коливань близько 0,17 Гц (результатом порушення було масштабне відключення, яке охопило 55 млн. осіб) [123];
- Італія (28 вересня 2003 р.) – частота коливань близько 0,55 Гц (результатом порушення було масштабне відключення споживачів) [123];
- Тайвань (24 січня 2004 р.) – частота коливань близько 0,8 Гц [173];
- КНР (29 серпня 2006 р.) – частота коливань близько 0,64 Гц [145];
- об'єднання УСТЕ (4 листопада 2006 р.) – частота коливань близько 0,3 Гц [155];
- КНР (29 січня 2007 р.) – частота коливань близько 0,3 Гц [51];
- Колумбія (12 серпня 2008 р.) – частота коливань у діапазоні 0,03...0,05 Гц [103];
- Сінгапур – Малайзія (2009 р.) – частота коливань близько 0,4 Гц [48];

- Індія (30–31 липня 2012 р.) – частота коливань у діапазоні 0,35...0,71 Гц (результатом порушення було відключення споживачів загальною потужністю 48 ГВт) [131];
- Бангладеш (1 листопада 2014 р.) [102].

Аналіз стійкості, проведений у рамках реалізації проекту інтеграції ОЕС України та Єдиної електроенергетичної системи (ЄЕС) Росії до USTE [55], виявив можливість виникнення НЧК в такому новому ЕО. Зокрема, результати моделювання значних технологічних порушень в окремих частинах такого ЕО показали, що зазначені порушення здатні викликати НЧК, які негативно вплинуть на стійкість та надійність роботи всього ЕО.

Результати виконаних досліджень із застосуванням моделювання електро-механічних перехідних процесів в ОЕС України свідчать про наявність низько-частотних (з частотами 0,40...1,25 Гц) складових у коливаннях потоків активної потужності по ЛЕП системотвірної електричної мережі [25]. Дослідження, виконані для ОЕС України та ЄЕС Росії також засвідчили можливість виникнення подібних процесів [10].

У рамках реалізації програми інтеграції ОЕС України до ENTSO–E проблема виникнення небезпечних НЧК в ОЕС України потребує обов'язкового вирішення. Основними кроками в контексті вирішення цієї проблеми мають бути:

- аналіз можливостей наявних в ОЕС України засобів демпфірування НЧК щодо забезпечення стійкості ОЕС України в усіх режимах її роботи;
- створення засобів оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕС (ЕО);
- створення ІСД НЧК в ОЕС України.

1.2 Низькочастотні коливання, небезпечні в аспекті стійкості ЕО

У будь-якій ЕС (ЕО) постійно виникають невеликі коливання активної потужності, викликані, зокрема, НЧК роторів СМ, які прискорюються або сповільнюються в залежності від значення небалансу між вхідною механічною та вихідною електричною потужностями СМ при зміні споживання в ЕС (ЕО) [122]. Зазначені НЧК можна спостерігати за графіками зміни потоків потужності по ЛЕП) які поєднують синхронні генератори (СГ) з підстанціями (ПС) споживачів, або МЗ. Проте наявність в ЕС (ЕО) НЧК далеко не завжди призводить до порушення їх стійкості.

За Ляпуновим характер стійкості будь-якої системи може бути визначено за знаком дійсної частини коренів першого рівняння системи (1.2) в будь-якій точці рівноваги (в умовах відсутності вхідних збурень u). Зазначене рівняння матиме відповідну до розмірності квадратної матриці стану A кількість розв'язків z вигляду

$$z_i = K_i e^{\lambda_i t}, \quad (1.3)$$

де K – комплексна амплітуда;

λ – власне значення матриці A ;

t – час; $i = 1 \dots n$;

n – розмірність матриці A [134].

Наявність комплексно-спряжених власних значень λ вказують на наявність коливань у системі. В цьому випадку власні значення може бути подано як

$$\lambda = \sigma \pm j\omega, \quad (1.4)$$

де ω – кругова частота коливань (рад/с);

σ – ступінь стійкості системи до коливань з частотою ω (s^{-1}).

За значенням ступеня стійкості відповідно до теореми Ляпунова щодо стійкості за першим наближенням визначають характер стійкості системи [17]:

- за умови $\sigma < 0$ система є асимптотично стійкою;
- за умови $\sigma \leq 0$ система є стійкою;
- за умови $\sigma > 0$ система є нестійкою.

Параметри σ та ω визначають показник згасання (демпфірування) ξ :

$$\xi = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}}. \quad (1.5)$$

В аспекті оцінювання загрози НЧК з огляду на стійкість ЕО (ЕС) серед параметрів складових НЧК найбільш інформативним є показник демпфірування. З огляду на значення

показника демпфірування в ЕС (ЕО) розрізняють такі типи НЧК [57, 122]:

- згасаючі (амплітуда зменшується з плином часу);
- незгасаючі з незмінною амплітудою;
- незгасаючі з амплітудою, яка зростає з плином часу.

Згасаючі НЧК мають додатний показник демпфірування і можуть виникати в ЕС (ЕО) внаслідок зміни (флуктуацій) навантажень електроспоживання, оперативних перемикачів, зміни складу та робочих потужностей генеруючого обладнання (зокрема, вітрогенераторів). Засоби автоматичного регулювання параметрів ЕС (ЕО) забезпечують достатнє додатне демпфірування таких НЧК, що призводить до швидкого (протягом декількох секунд) зменшення амплітуди. Згасаючі НЧК виникають в ЕС (ЕО) постійно, але вважаються нормальними (допустимими), оскільки не створюють загрози для стійкої роботи ЕС (ЕО). Прикладом згасаючих НЧК в ЕС (ЕО) є коливання, зареєстровані в ЕО США та Канади 14 серпня 2003 р. Частота згасаючих НЧК у перетині “Нью-Йорк – Онтаріо”, причиною виникнення яких стало відключення ЛЕП з номінальною напругою 345 кВ, становила близько 0,3 Гц. Графік зміни з часом потоку активної потужності по зазначеному перетину наведено на рис. 1.1 [57].

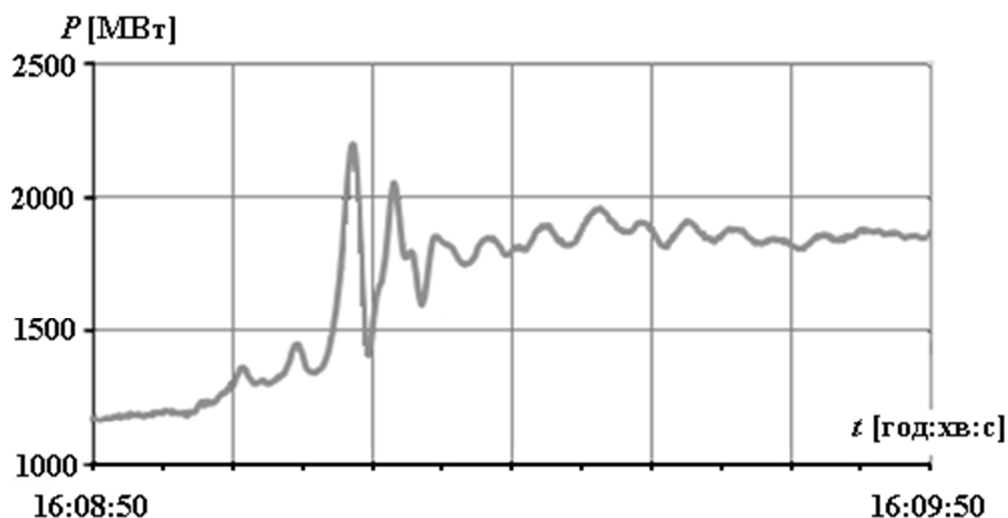


Рисунок 1.1 – Приклад згасаючих НЧК

Незгасаючі НЧК з незмінною амплітудою мають нульовий показник демпфірування і можуть виникати з тих самих причин, що і згасаючі НЧК. На практиці засоби, які

застосовують в ЕС (ЕО) для демпфірування НЧК, не завжди здатні забезпечити їх надійне демпфірування, що викликає потребу втручання оперативного персоналу [34]. Незгасаючі НЧК з незмінною амплітудою є досить небезпечними, оскільки їх тривале існування підвищує ймовірність порушення стійкості ЕС (ЕО). Крім того, у разі значної амплітуди таких НЧК в ЕС (ЕО) вони можуть призводити до аварійних відключень СГ (які є “джерелом” зазначених НЧК) та навантажених ЛЕП, якими НЧК “поширюються”. Прикладом незгасаючих НЧК з незмінною амплітудою в ЕС (ЕО) є коливання, які спостерігалися 9 лютого 2011 р. в ЕО ENTSO–Е протягом декількох хвилин. На рис. 1.2 наведено графіки зміни потоків активних потужностей по чотирьох ЛЕП, які з’єднують ЕС Італії та Швейцарії [34]. Частота незгасаючих НЧК тут становить близько 0,25 Гц. Причину виникнення зазначених НЧК визначено не було.

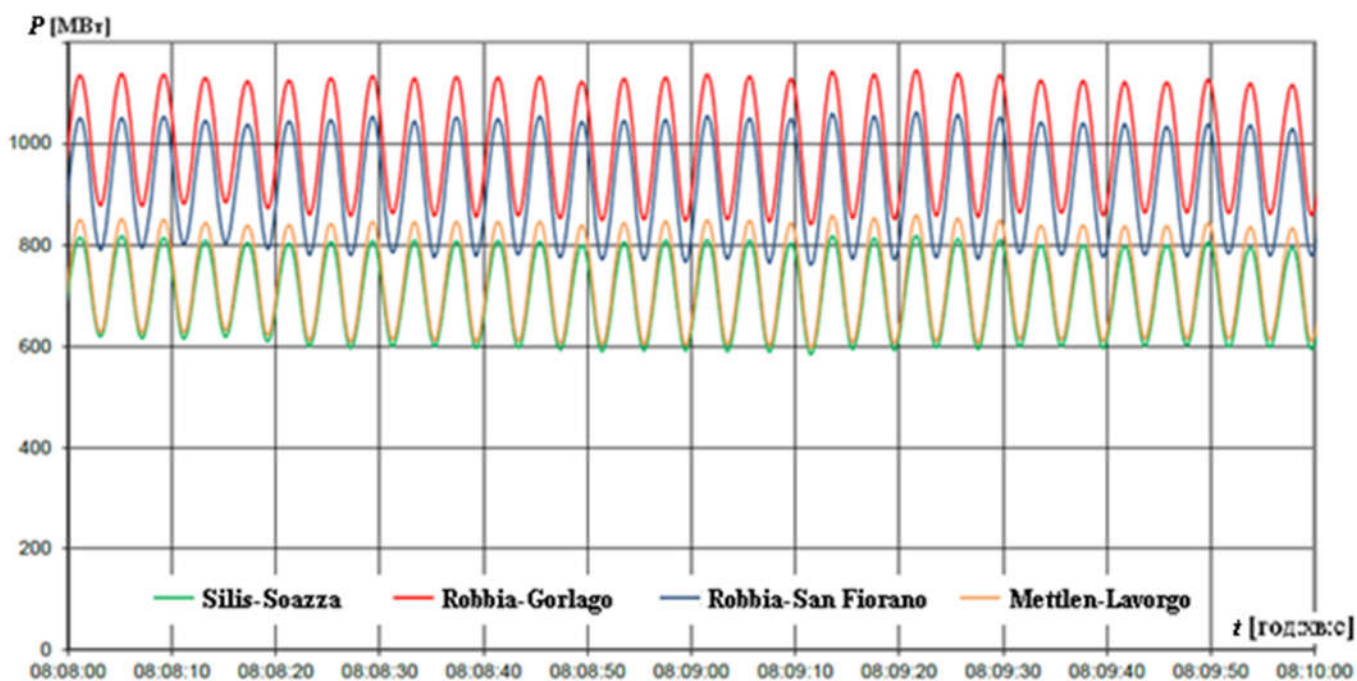


Рисунок 1.2 – Приклад незгасаючих НЧК з незмінною амплітудою

Незгасаючі НЧК з амплітудою, яка зростає з плином часу, мають від’ємний показник демпфірування, причиною їх виникнення зазвичай стають значні збурення режиму – незаплановані вимкнення потужних СГ, МЗ тощо. На початковому етапі свого існування такі НЧК можуть виявляти себе як згасаючі чи незгасаючі НЧК з незмінною амплітудою, проте з плином часу їх амплітуда набуває тенденцію до постійного зростання.

Незгасаючі НЧК з амплітудою, яка зростає з плином часу, є найбільш небезпечними в ЕС (ЕО), оскільки наявність таких коливань свідчить про загрозу порушення стійкості її роботи, наслідком чого може бути поділ ЕС (ЕО) на несинхронні частини через аварійні відключення певних СГ та ЛЕП. Прикладом таких НЧК є коливання, які спостерігалися 10 серпня 1996 р. в ЕО США та Канади і були спричинені взаємними коливаннями груп СГ Північно-західної Тихоокеанської ЕС США і ЕС Канади з одного боку та Північно-каліфорнійської ЕС США, Південно-каліфорнійської ЕС США і Південної ЕС США з іншого боку. Коливання з частотою близько 0,25 Гц призвели до відключень МЗ, наслідком чого став поділ ЕО на окремі несинхронні зони і масштабні відключення споживачів. Графік коливань потоку активної потужності по одній з ліній перетину “Каліфорнія–Орегон” (California–Oregon) наведено на рис. 1.3 [134].

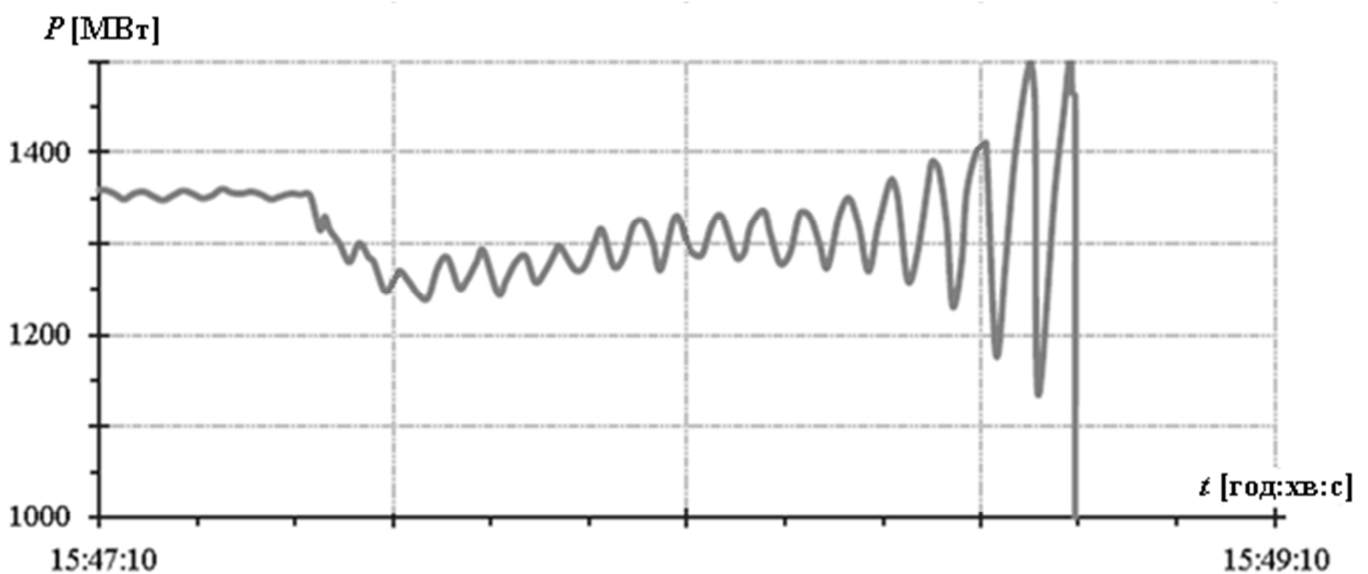


Рисунок 1.3 – Приклад незгасаючих НЧК, амплітуда яких зростає з плином часу

Хоча безпосередню загрозу в аспекті стійкості ЕО (ЕС) являють незгасаючі НЧК, амплітуда яких зростає з плином часу, виявлення та контроль незгасаючих НЧК з незмінною амплітудою також є нагальною потребою, оскільки за певних умов з плином часу амплітуда таких НЧК може набути тенденції до зростання. Подібна “еволюція” НЧК, які виникли внаслідок підключення шунтувального реактора до шин з номінальною напругою 400 кВ ПС “Сілчар” (Silchar) в ЕС Індії, мала місце 11 серпня 2013 р. [130]. Графік зміни напруги на шинах ПС “Міса” (Misa) наведено на рис 1.4.

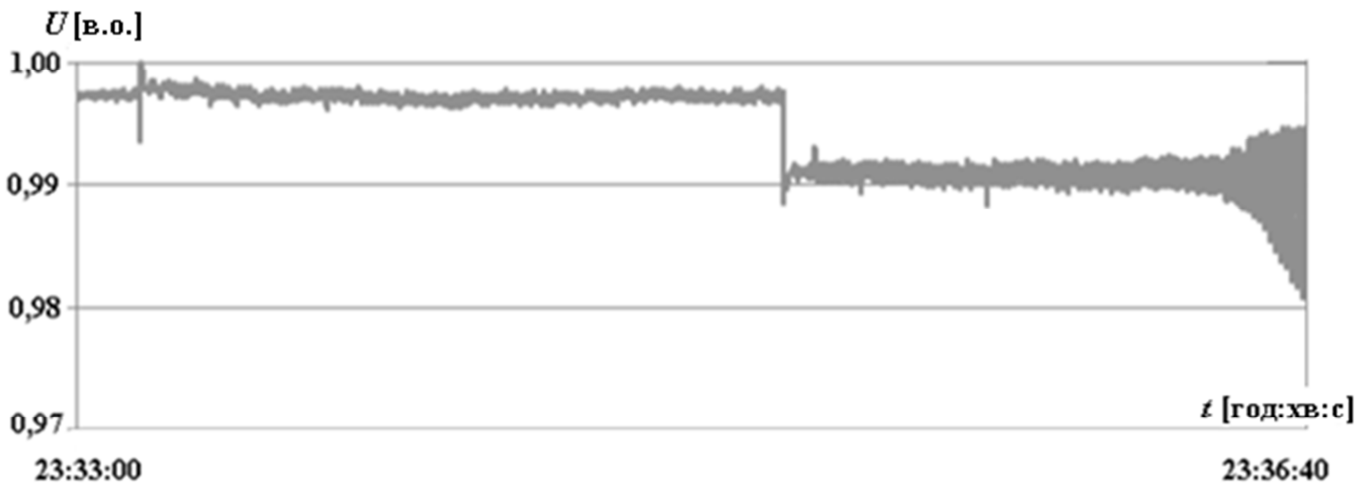


Рисунок 1.4 – Приклад “еволюції” НЧК

У дисертаційній роботі проведено дослідження методів аналізу сигналів в аспекті їх придатності для надійного виявлення в режимі реального часу домінуючих мод усіх зазначених вище типів НЧК та визначення їхніх параметрів.

1.3 Аналіз причин виникнення та класифікація НЧК

Проблема демпфірування НЧК визнавалася дуже важливою ще до створення ЕС як таких. Дослідження, проведені у 80-х р. р. XIX ст. Дж. К. Максвеллом та Е. Дж. Раусом, продемонстрували можливість виникнення коливань у динамічних системах. На практиці електромеханічні НЧК в ЕС з’явилися разом із включенням СГ на паралельну роботу. Задача демпфірування зазначених коливань стала актуальною через їх епізодичне виникнення в ЕС внаслідок зміни навантаження паралельно ввімкнених СГ, які мали певні відмінності в конструкціях. Результатом вирішення цієї задачі стала поява в конструкції СГ демпферних обмоток, які разом із автоматичними регуляторами швидкості турбін та деякими іншими засобами автоматичного регулювання на певний час зняли проблему НЧК в ЕС.

Початок процесу активного створення транснаціональних ЕО повернув актуальність проблемі НЧК. Причинами цьому стали [29, 64]:

- низька ефективність (з огляду на необхідність демпфірування міжсистемних коливань у великих ЕО) демпферних обмоток СГ, оскільки їх можливості до демпфірування коливань зменшуються обернено пропорційно до квадрату суми зовнішнього опору та опору статора;

- швидке зростання кількості автоматизованих засобів керування, що збільшує ймовірність видачі ними помилкових, а іноді і протилежних за своєю сутністю керівних сигналів;
- малі (наближені до нуля) значення показників демпфірування коливань на власних частотах ЕС, що за умови постійної зміни виробництва та споживання електричної енергії призводить до виникнення коливань потоку потужності по МЗ;
- наявність власних частот у кожного генератора, які можуть збігатися з частотою коливань потоку потужності по МЗ і значно збільшити їх амплітуду;
- повільні флуктуації навантаження, частота яких може збігатися з власною частотою СГ або ЕС (ЕО);
- можливість саморозгойдування СГ у випадках невірно визначених параметрів налаштування автоматичних регуляторів швидкості обертання турбін та САКЗ СГ;
- можливість виникнення коливань в протифазі роторів СМ, які належать до певних когерентних груп;
- наближення навантаження МЗ ЕО до межі їх пропускнуої здатності, що підвищує ймовірність виникнення коливань потоку потужності по МЗ ЕО;
- наявність в ЕО слабких зв'язків, що підвищує ймовірність виникнення коливань в ЕО в разі виникнення незначних збурень;
- наявність в ЕО засобів поздовжньої компенсації (ПК) та засобів поперечної компенсації (ППК) реактивної потужності з обмеженим діапазоном регулювання видаваної потужності.

Більшість випадків виникнення НЧК в ЕС (ЕО) відбулося через відключення ЛЕП внаслідок пошкодження, відмову обладнання, що, в свою чергу, призводило до переобтяження та відключення деяких інших ЛЕП та одиниць обладнання і викликало коливання в потужності в ЕС (ЕО). Відключення ЛЕП значним чином змінювало характеристики електричної мережі ЕС (ЕО) та збільшувало її еквівалентний опір, що в результаті призводило до зростання ризику порушення стійкості.

Згідно зі статистичними даними, більшість випадків виникнення НЧК збігаються з найбільш холодними чи найбільш спекотними днями року, коли різко збільшувалася потужність навантаження кліматичного обладнання – обігрівачів, бойлерів, кондиціонерів [123]. Особливістю таких навантажень є можливість їх функціонування навіть за умови

низької напруги в мережі, що додатково посилює навантаження на електричну мережу і сприяє виникненню НЧК.

Отже, причинами виникнення електромеханічних НЧК в ЕО можуть бути події та відповідні процеси в різних її функціональних частинах, які стосуються виробництва, передачі та споживання електричної енергії.

Низькочастотні коливання класифікують за природою виникнення, частотою та їх впливом на стійкість ЕС (ЕО). Слід зазначити, що наразі відсутня загально-прийнята, усталена класифікація НЧК з чітко визначеними діапазонами частот коливань, притаманних кожному класу. Узагальнення класифікацій НЧК, наведених у [64, 91, 109, 117, 122, 130, 166], дає можливість за природою виникнення поділити НЧК на:

- міжсистемні (до 0,3 Гц);
- внутрішньосистемні (0,3...1,0 Гц);
- локальні станційні (1,0...2,0 Гц);
- внутрішньостанційні (2,0...3,0 Гц);
- пов'язані з особливостями систем керування ЕО (широкий діапазон частот);
- крутильні (10...45 Гц).

До внутрішньостанційних належать НЧК, які виникають внаслідок взаємних коливань двох СГ однієї електростанції (ЕСт). Частота таких коливань залежить від значень робочої потужності цих СГ та еквівалентного реактивного опору між ними і зазвичай перебуває в діапазоні 2,0...3,0 Гц. Внутрішньостанційні коливання виявляють себе лише в межах ЕСт і не впливають на інші частини ЕС. Приклад таких коливань, зареєстрованих на дизельній ЕСт “Сантана” (Santana) в ЕС Бразилії, наведено на рис. 1.5. Частота взаємних коливань агрегатів №2 та №3 цієї ЕСт склала близько 2,5 Гц [37].

Локальні станційні НЧК спричиняє окремий СГ ЕСт, ротор якого коливається відносно решти роторів СГ ЕС. Частота таких коливань залежить від значень робочої потужності цього СГ та еквівалентного реактивного опору між зазначеним СГ та ЕС і, зазвичай, становить 1,0...2,0 Гц. Приклад таких коливань, зареєстрованих на агрегаті №3 теплової ЕСт “Бадж Бадж” (Budge Budge) в ЕС Індії 9 серпня 2014 р., наведено на рис. 1.6. Частота коливань тут становила близько 0,75 Гц [130].

Внутрішньосистемними є НЧК, викликані коливаннями у протифазі на частоті домінантної моди двох груп СГ однієї ЕС або частини ЕС. Частота таких НЧК залежить,

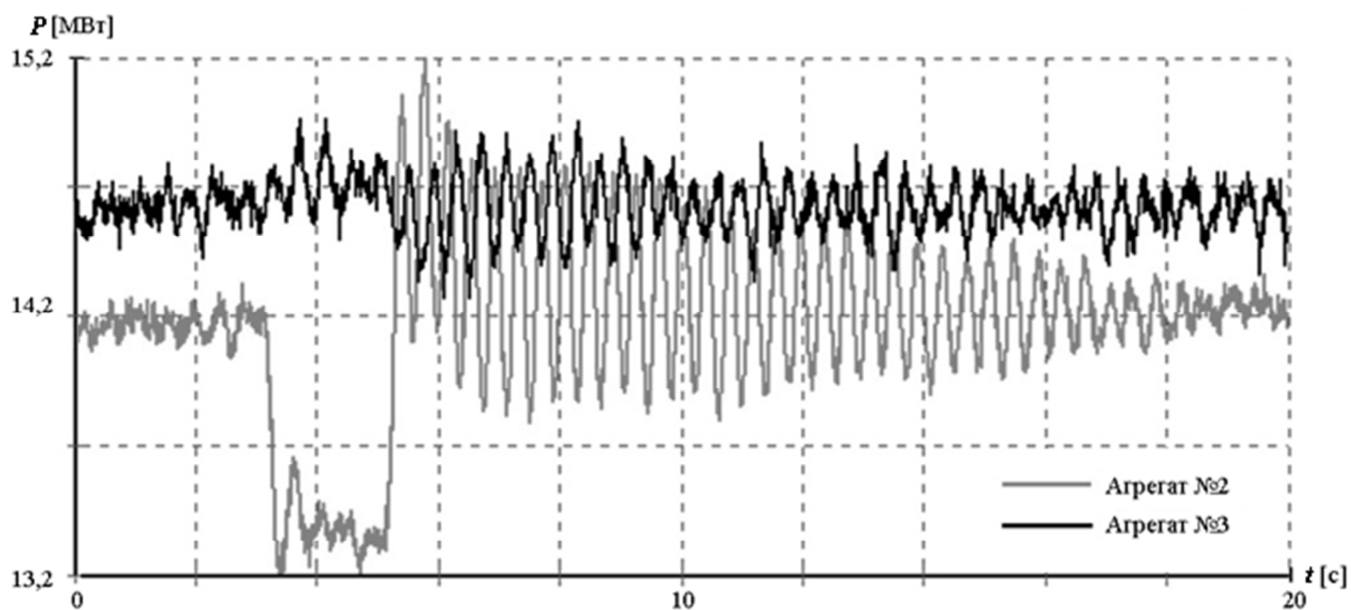


Рисунок 1.5 – Приклад внутрішньостанційних коливань

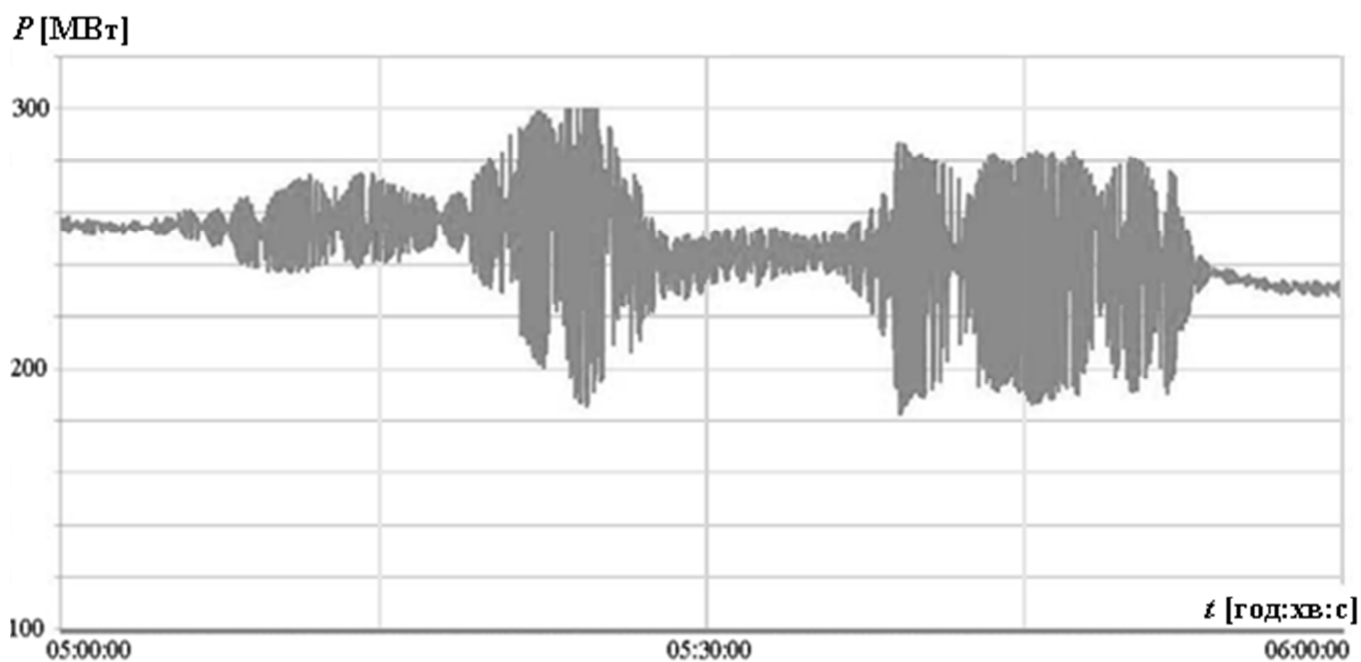


Рисунок 1.6 – Приклад локальних станційних коливань

насамперед, від динамічних властивостей ЕС, пропускнуї здатності та завантаження зв'язків між зазначеними групами СГ, характеру навантаження, та ін. і зазвичай перебуває в діапазоні 0,3...1,0 Гц. Прикладом внутрішньосистемних НЧК є коливання, які спостерігалися 12 березня 2007 р. в ЕС Шандонг (Shandong) КНР, де ротори

генераторів, підключених до шин ПС “Їдо” (Yido) та ПС “Вейфанг” (Weifang), коливалися відносно решти генераторів ЕС з частотою 1,15 Гц. Графік коливань частоти на шинах деяких ПС ЕС Шандонг наведено на рис. 1.7. Уяву про участь різних груп генераторів у створенні НЧК із зазначеною частотою дає на рис. 1.8 [51].

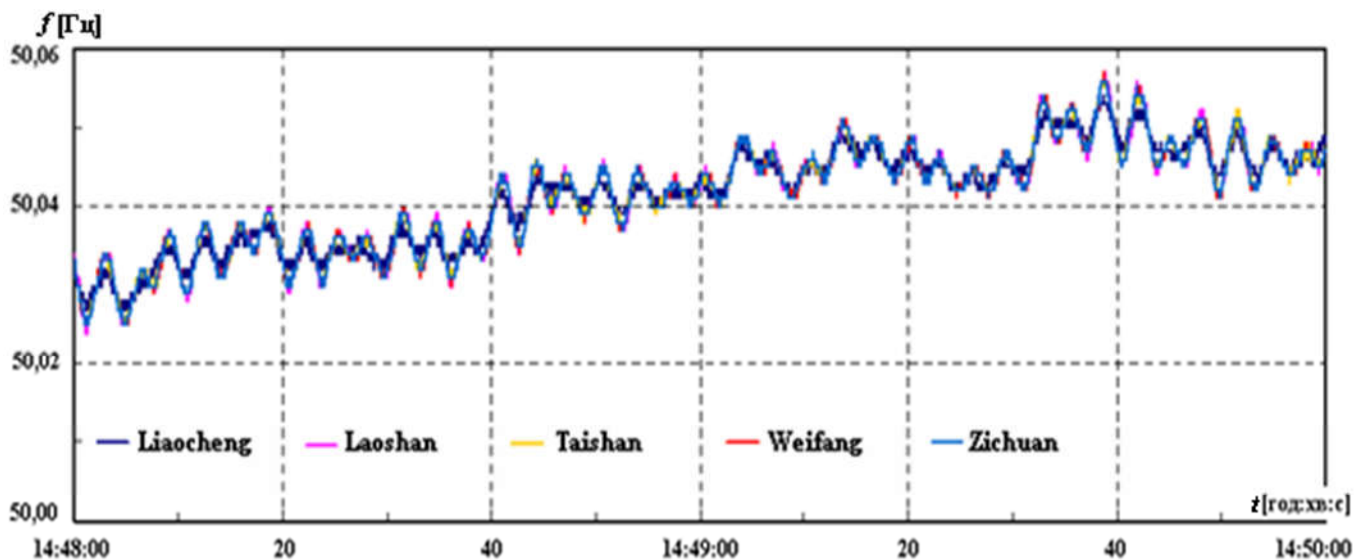


Рисунок 1.7 – Внутрішньосистемні НЧК на шинах ПС ЕС Шандонг (КНР)

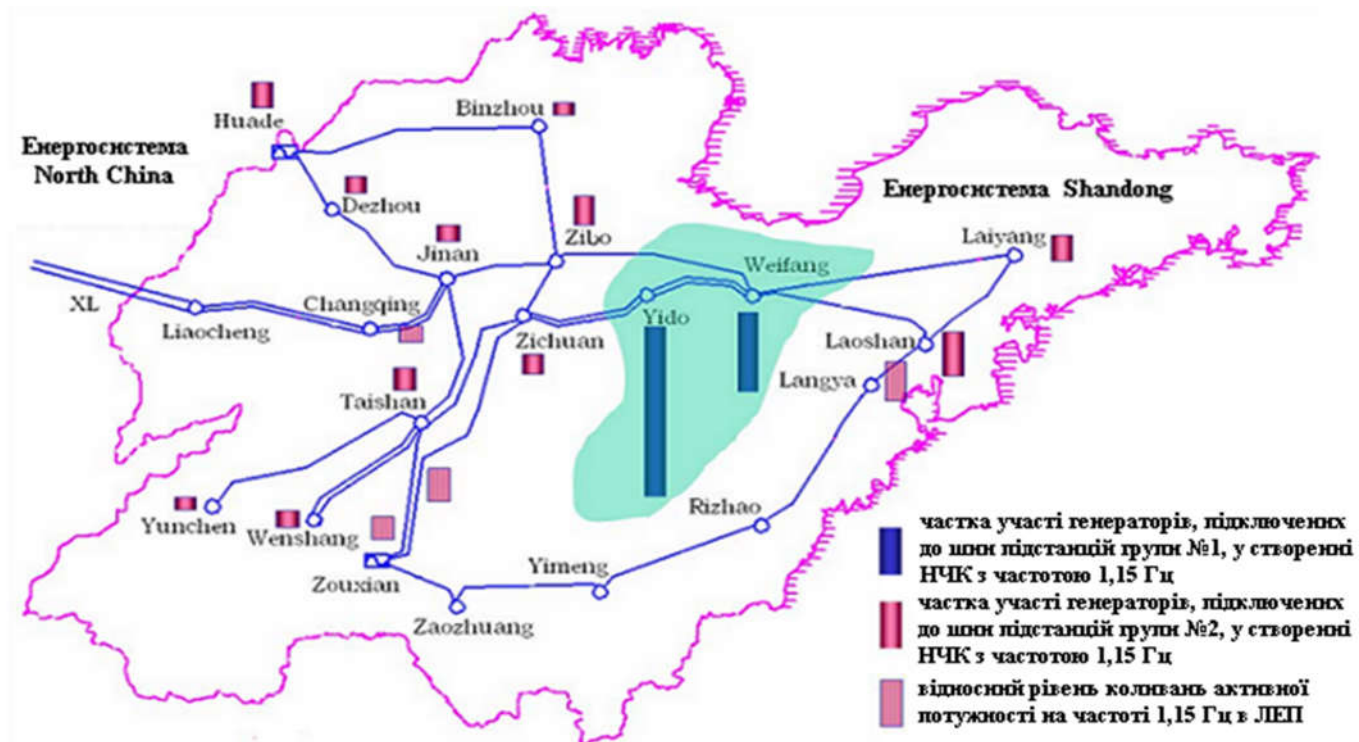


Рисунок 1.8 – Участь СГ ЕС Шандонг (КНР) у внутрішньосистемних НЧК

Причини виникнення міжсистемних та внутрішньосистемних НЧК можуть бути однаковими, але у випадку міжсистемних НЧК коливаються у протифазі ротори груп СГ, розташованих у двох ЕС, поєднаних “слабким” зв’язком. Частота таких коливань, зазвичай, не перевищує 0,3 Гц. Приклади міжсистемних НЧК розглянуто в підрозділі 1.2.

Джерелами коливань, пов’язаних з особливостями систем регулювання та керування в ЕС (ЕО), зазвичай є СГ з невідповідним чином налаштованими САКЗ, турбіни, вставки постійного струму, статичні компенсатори реактивної потужності, трансформатори з можливістю регулювання напруги під навантаженням. Такі НЧК можуть спостерігатися в широкому діапазоні частот. Наприклад, між ЕС Туреччини та ЕО УСТЕ було зареєстровано НЧК з частотою 0,03...0,05 Гц, викликаних “особливостями” налаштування САКЗ групи гідрогенераторів в ЕС Туреччини [43]. Низькочастотні коливання, викликані налаштуваннями САКЗ на гідрогенераторі ЕСт “Кеттл” (Kettle) в ЕС Канади, мали з частоту близько 5 Гц (графіки коливань наведено на рис. 1.9.) [167].

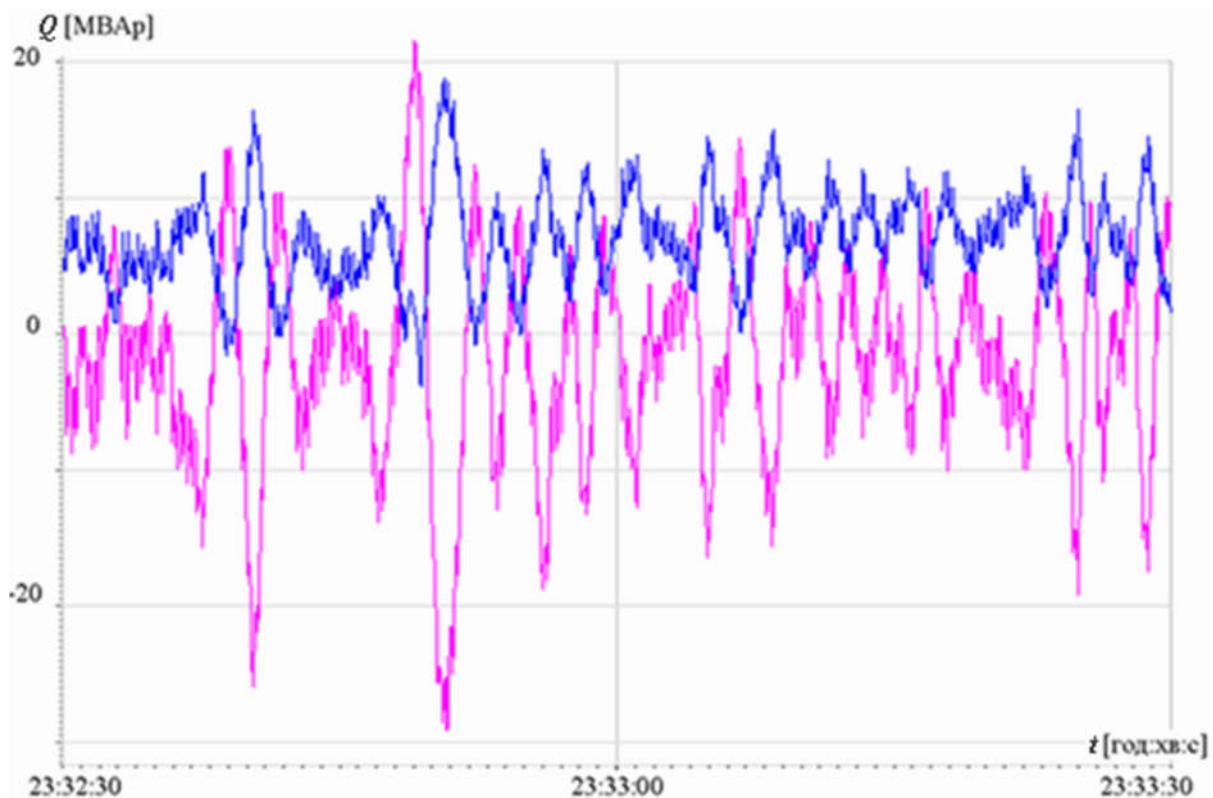


Рисунок 1.9 – НЧК, викликані налаштуваннями САКЗ на гідрогенераторів ЕСт “Кеттл” (Канада)

Крутильні коливання пов'язані з обертовою системою турбіни та генератора. Такі коливання можуть бути викликані взаємодією САКЗ, регуляторів швидкості обертання турбін, засобів HVDC, ємнісних засобів ППК [19]. Але найчастіше такі коливання проявляють себе в ЕС, де певна група генераторів пов'язана з ЕС за допомогою зв'язку, який містить установку повздовжньої компенсації. Частота крутильних коливань зазвичай перебуває в діапазоні 10...46 Гц. Приклад крутильних коливань з частотою близько 24,65 Гц, зареєстрованих на генераторі з номінальною напругою 10,5 кВ, який виконує функцію живлення дослідницького токамака ASDEX Upgrade (Німеччина), наведено на рис. 1.10 [107].

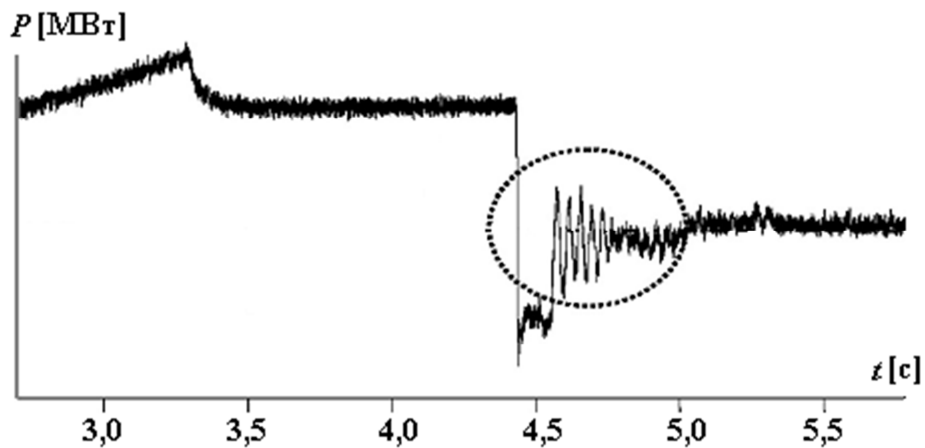


Рисунок 1.10 – Приклад крутильних коливань

Результати аналізу причин виникнення НЧК та сучасний стан ОЕС України дають підстави вважати, що небезпечними для функціонування ОЕС України, зокрема і під час паралельної роботи з ЕО країн Європи, можуть бути міжсистемні, внутрішньосистемні та міжстанційні електромеханічні коливання. Оскільки абсолютну більшість значних аварій в ЕО світу було спричинено міжсистемними та внутрішньосистемними НЧК, то першочергову увагу має бути приділено ідентифікації НЧК з частотами до 1 Гц.

1.4 Підходи до виявлення в ЕО НЧК та визначення параметрів їхніх складових

Впродовж тривалого часу дослідження стійкості ЕС (ЕО) виконували offline [64, 91] за допомогою апарату модального аналізу, що потребувало лінеаризації системи

диференціально-алгебричних рівнянь (1.1) у певній робочій точці, розрахунку власних значень лінеаризованої системи і визначення характеру стійкості за знаками їх дійсних частин. Зазначений підхід вимагає врахування в математичній моделі ЕС (ЕО) значних обсягів актуальної інформації про параметри та схеми електричних з'єднань ЕС (ЕО), що суттєво ускладнює здійснення відповідного аналізу в режимі реального часу. Подальший розвиток систем автоматизованого керування призвів до значного ускладнення математичних моделей регуляторів, що, разом із укрупненням ЕС (ЕО), зробило задачу дослідження стійкості ЕС (ЕО) надскладною для оперативного розв'язання її згаданим вище методом.

З метою вирішення зазначеної проблеми в роботі запропоновано використання нового підходу до дослідження стійкості ЕС (ЕО), в основу якого покладено аналіз сигналів – режимних параметрів ЕС (ЕО). Реалізація такого підходу стала можливою завдяки застосуванню принципово нових систем моніторингу параметрів режимів ЕС (ЕО). Сучасні системи глобального моніторингу (англ. – Wide Area Measurement System, WAMS) застосовують сигнали від системи глобального позиціонування (англ. – Global Positioning System, GPS). Вимірювальними засобами в складі WAMS є пристрої вимірювання електричних параметрів (насамперед – напруги) у векторній формі (англ. – Phasor Measurement Unit, PMU), які завдяки GPS дають можливість отримувати інформацію про значення режимних параметрів із зазначенням точного часу моменту вимірювання. Загальну структуру WAMS наведено на рис. 1.11.

У складі WAMS, які наразі функціонують у національних ЕС та транс-національних ЕО, використовують PMU всесвітньо відомих виробників [6, 61, 173]:

- RES-521 компанії “ABB” (Швеція–Швейцарія);
- NCT2000 Type A компанії “Toshiba” (Японія);
- PowerLog PL134 компанії “AENEAS GmbH” (Німеччина);
- N60 компанії “General Electric” (США);
- 1133 A компанії “Arbiter Systems” (США);
- ADX-3000s компанії “ADX” (Тайвань).

В Україні впровадження в експлуатацію на об'єктах ОЕС України PMU вітчизняного виробництва (ЄВРП “Регіна-Ч”) здійснює МПП “Анігер”.

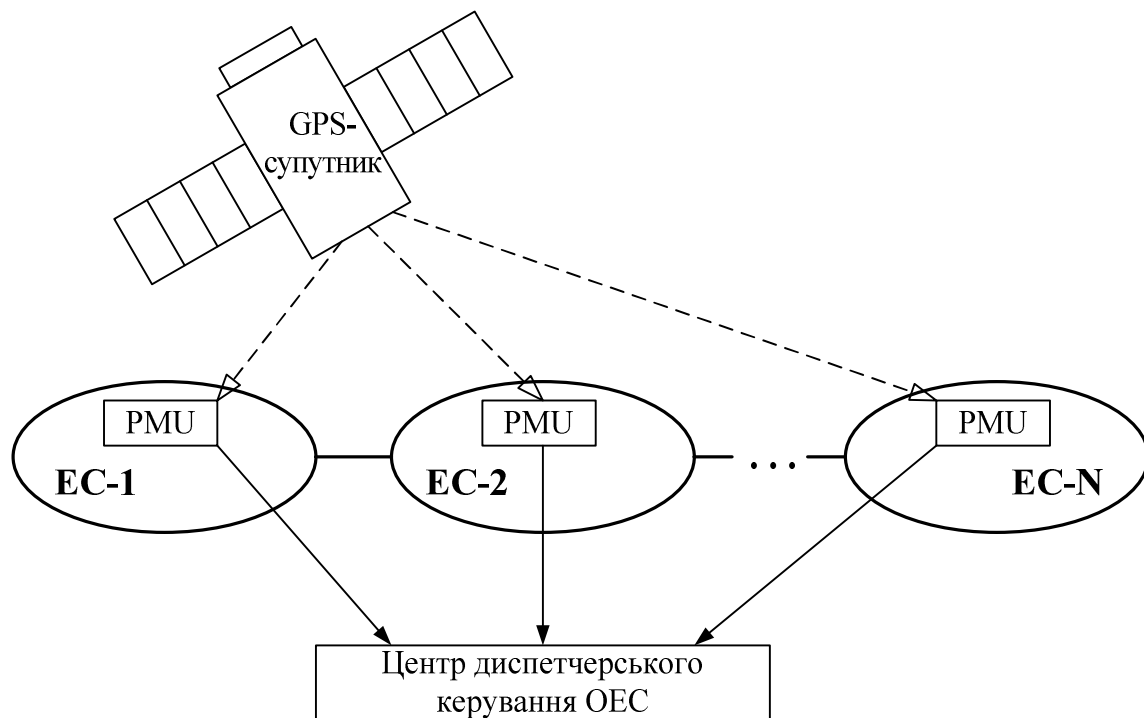


Рисунок 1.11 – Структура системи глобального моніторингу

Впровадження PMU надало змогу здійснювати синхронізовані вимірювання режимних параметрів у векторній формі одночасно на багатьох об'єктах ЕО в нормальних режимах роботи і в процесі розвитку аварійних ситуацій. Дослідження отриманих даних із застосуванням методів аналізу сигналів не лише вказали на появу НЧК в ЕС (ЕО) при виникненні в них збурень, але і підтвердили існування НЧК за нормальних режимів ЕС (ЕО) [34, 80, 108, 113, 120].

Для забезпечення розв'язання в режимі реального часу задачі ідентифікації мод НЧК та оцінювання загрози функціонуванню ЕО у роботі запропоновано створення у складі ІСД НЧК спеціалізованого комплексу ідентифікації та визначення параметрів (КІВП) мод НЧК, для якого визначено такі основні вимоги:

- оперативність виявлення НЧК у визначеному діапазоні частот;
- точне (адекватне) визначення основних параметрів мод НЧК – частот, амплітуд та показників демпфірування;
- висока роздільна здатність аналізу сигналу за частотою для “відокремлення” (розрізнення) мод з близькими частотами;

– надійність отримання результатів розрахунку параметрів складових НЧК у різних експлуатаційних режимах ЕС (ЕО).

Вимога до оперативності виявлення НЧК базується на тому, що за наявності певних передумов процес “розвитку” НЧК (зміна характеру НЧК із згасаючих на незгасаючі, поступове збільшення амплітуд мод НЧК) в ЕС (ЕО) може проходити доволі швидко. Так, під час аварії 10 серпня 1996 р. в ЕО США та Канади між відключенням лінії з номінальною напругою 500 кВ Росс–Лексінгтон (Ross–Lexington), яке викликало появу НЧК, до відключення МЗ минуло 74с, а з моменту початку зростання амплітуди незгасаючих коливань до відключення МЗ – лише 35с (рис. 1.3) [134]. Під час аварії 14 серпня 2003 р. в ЕО США та Канади ЛЕП з номінальною напругою 345 кВ Іст Ліма – Фосторія Сентрел (East Lima – Fostoria Central), приблизно, за 10с після початку НЧК у ній було відключено автоматикою, що призвело до виникнення в перетині “Нью Йорк – Онтаріо” (New York – Ontario) коливань потоку активної потужності з амплітудою до 400 МВт [57].

Значна частина WAMS, які сьогодні функціонують в ЕО, забезпечує можливість виявлення НЧК із застосуванням діапазону відліків сигналу (далі цей діапазон відліків сигналу називатимемо вікном спостереження), які охоплюють часові відрізки від 40с і більше [46, 59, 78, 80, 113], що пояснюється можливостями застосованих РМУ, періодичністю передачі даних від РМУ до інформаційного серверу та обчислювальними характеристиками застосованих методів аналізу сигналів.

У низці робіт [10, 65, 76, 100, 106, 120, 126] йдеться про можливість використання окремих методів аналізу сигналів для виявлення НЧК і розрахунку їх параметрів із застосуванням вікон спостереження, які охоплюють часові відрізки від 4...30с, проте усі зазначені дослідження було виконано offline та, переважно, із застосуванням сигналів, отриманих у результаті імітаційного моделювання процесів. Крім того, застосування для розрахунку параметрів складових НЧК вікон спостереження, які охоплюють такі часові відрізки, суттєво знижує оперативність виявлення незгасаючих та нестійких коливань в ЕС (ЕО). Причиною цьому є поступове (порційне) надходження нових значень параметрів режиму ЕС (ЕО) від РМУ, тому в перші секунди після збурення, яке призводить до виникнення НЧК, розрахункові значення амплітуд НЧК може бути суттєво занижено відносно їх реальних значень через наявність у вікні спостереження

даних, які відповідають значенням режимних параметрів ЕС (ЕО) до виникнення збурення. З огляду на зазначену “інерційність” вікон спостереження в дисертації запропоновано мінімізувати інтервал між моментами часу, які відповідають першому та останньому відлікам вікна спостереження певного сигналу, яке підлягає аналізу.

Вимога до точності визначення параметрів складових НЧК пов’язана із особливостями реалізації заходів щодо їх демпфірування. У випадку застосування з метою демпфірування НЧК системних стабілізаторів (англ. – Power System Stabilizer, PSS) результати розрахунку частот та показників демпфірування НЧК може бути в подальшому використано з метою підвищення ефективності PSS завдяки можливості налаштування їх параметрів на частоти “проблемних” мод НЧК. Крім того, отримані результати може бути використано з метою автоматичного налаштування параметрів PSS тих моделей, які передбачають таке налаштування [125, 156, 157]. За відсутності PSS в ЕС (ЕО) чи в разі його неефективності в певному режимі наявність інформації щодо низькочастотних мод дає змогу оперативному персоналу ЕС (ЕО) встановити склад груп СГ, які викликають НЧК, і забезпечити розвантаження ліній перетину ЕС (ЕО), який поєднує зазначені групи СГ, шляхом перерозподілу навантаження між окремими ЕСт ЕС (ЕО).

Забезпечення високої роздільної здатності за частотою параметрів складових НЧК викликано можливістю існування в ЕС (ЕО) одночасно декількох мод з близькими частотами. У [106] було наведено випадок одночасного існування п’яти мод з частотами 0,32 Гц, 0,52 Гц, 0,62 Гц, 0,77 Гц та 0,92 Гц в ОЕС Мексики. Крім того, в ЕС (ЕО) можуть існувати моди на дуже близьких до нуля частотах. Так, в ЕС Колумбії 12 серпня 2008 р. було зафіксовано НЧК із частотою близько 0,06 Гц [121]. Зазначені приклади окреслюють вимоги до роздільної здатності за частотою систем моніторингу за НЧК в ЕС (ЕО).

Важливою особливістю (з огляду на точність та адекватність виявлення НЧК і визначення параметрів їхніх складових) створених на основі WAMS систем виявлення НЧК є застосування в кожній такій системі лише одного методу аналізу – швидкого перетворення Фур’є (Fourier) (ШПФ), Проні (Prony), перетворення Гільберта-Хуанга (англ. – Hilbert-Huang Transform, ННТ), пучка матриць (англ. – Matrix Pencil, МР), вейвлет-перетворення (ВП), перетворення Стоквелла (англ. – Stockwell Transform, ST) тощо [46, 59, 78, 80, 85, 113, 168]. Кожен із зазначених методів має свої “слабкі місця”

(обмежені можливості застосування для аналізу перехідних режимів, недостатня роздільна здатність за частотою, необхідність застосування вікон спостереження, які охоплюють широкі часові відрізки тощо), що не дає можливості гарантувати отримання з їх застосуванням своєчасних та адекватних результатів аналізу параметрів складових НЧК для всіх нормальних та аварійних режимів ЕС (ЕО).

Висновки по розділу 1

1) За результатами ретроспективного аналізу системних аварій в ЕС (ЕО) країн світу встановлено, що причиною частини зазначених аварій стало виникнення та подальший “розвиток” низькочастотних (з частотою до 3 Гц) коливань режимних параметрів, які створювали загрозу для стійкої роботи ЕС (ЕО). Виявлено, що з огляду на ймовірність спричинення зазначеного порушення стійкості найбільш небезпечними є НЧК з частотами до 1 Гц.

2) Показано, що наявні в ЕО засоби, призначені для демпфірування НЧК, не завжди здатні забезпечити ефективне виконання зазначеної функції.

3) Для оцінювання в реальному часі загрози коливного порушення стійкості ОЕС України необхідно створити відповідні засоби, що забезпечуватимуть необхідні оперативність та точність визначення параметрів складових НЧК і надійність вищезазначеного оцінювання. Такі засоби мають використовувати результати синхронізованих вимірювань параметрів режиму ЕО електровимірювальними реєструючими приладами “Регіна-Ч”.

РОЗДІЛ 2

ДЕМПФІРУВАННЯ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ В ЕНЕРГООБ'ЄДНАННЯХ

2.1 Засоби демпфірування НЧК в ЕО

Об'єднання ЕС на паралельну роботу та утворення ОЕС (ЕО) призводить до зміни характеру проблеми стійкості і може суттєво впливати на умови використання (з огляду на можливий рівень завантаження) міжсистемних електричних зв'язків внаслідок виникнення небезпечних для функціонування ЕО НЧК.

Для демпфірування НЧК у сучасних ЕС (ЕО) застосовують такі засоби:

- гнучкі системи передачі змінного струму (англ. – Flexible Alternating Current Transmission Systems, FACTS) [60, 77, 86];
- високовольтні системи постійного струму (англ. – High-Voltage Direct Current, HVDC) [105, 144, 175];
- накопичувачі енергії (НЕ) [32, 111, 150];
- автоматичні регулятори збудження сильної дії (АРЗ СД) СМ [7, 24, 31];
- системні стабілізатори (PSS) [52, 56, 82].

Засоби FACTS являють собою системи ПК, ППК або поздовжньо-поперечної компенсації (ПППК), параметри яких можуть доволі швидко змінюватися за допомогою тиристорних ключів. Гнучкі системи передачі змінного струму застосовують з різною метою. Так, FACTS може бути призначено для компенсації реактивних складових фізичних параметрів ЛЕП та потоків реактивної потужності з метою підвищення пропускної здатності перетинів, підтримання заданого рівня напруги на шинах ПС, зменшення втрат активної потужності в ЛЕП, підвищення стійкості ЕС (ЕО) до різноманітних збурень. Крім того, в [60, 77, 86] показано можливість та доцільність застосування засобів FACTS з метою якісного покращення процесів демпфірування НЧК в ЕС (ЕО).

Умовно виділяють три покоління засобів FACTS [66]. До FACTS першого покоління належать статичні компенсатори реактивної потужності (SVC) та тиристорно-керовані поздовжні ємності (англ. – Thyristor Controlled Series Capacitor, TCSC). Засоби FACTS другого покоління являють собою статичні синхронні компенсатори (англ. – STATic synchronous COMpensator, STATCOM) та статичні поздовжні синхронні компенсатори (англ. – Static Series Synchronous Compensator, SSSC). Пристрої FACTS третього покоління – це уніфіковані контролери потоків потужності (англ. – Unified Power Flow Controller, UPFC) та обертові статичні компенсатори (англ. – Convertible Static Compensator, CSC).

Застосування FACTS ПК (TCSC, SSSC) дає можливість варіювати значення еквівалентного реактивного опору перетину між двома ЕС шляхом зміни власного реактивного опору вмиканням або вимиканням ємнісних або індуктивних секцій, з'єднаних послідовно з ЛЕП зі складу зазначеного перетину (для FACTS на рис. 2.1 зміну значення власного опору здійснюють шляхом комутації тиристорними ключами T_1 та T_2 секцій індуктивних опорів x_L , підключених паралельно до блоку з незмінним ємнісним опором x_C).

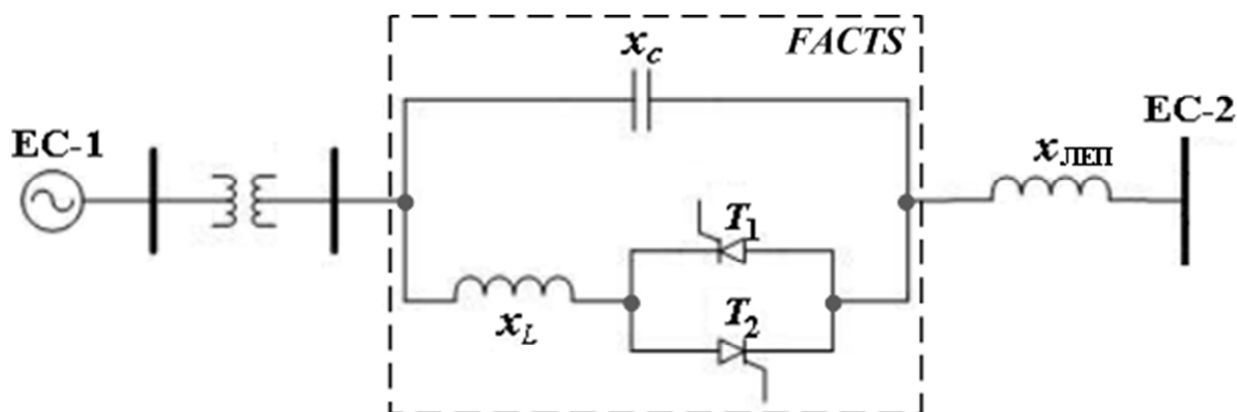


Рисунок 2.1 – Схема FACTS ПК

Ефективність FACTS ПК з огляду на якісне покращення процесу демпфірування НЧК підтверджено результатами досліджень на моделях ЕС (ЕО) і прикладами їх застосування в складі діючих ЕО. Зокрема, застосування FACTS ПК на ПС “Імператриц” (Imperatriz) та “Серра да Меса” (Serra da Mesa) в ОЕС Бразилії дало змогу змінити з від’ємного на додатний характер демпфірування НЧК з частотою 0,2 Гц, які спостерігалися в перетині “Північ–Південь” за раптового зниження на 300 МВт генерування потужності ГЕС “Тукуруї” (Tucuruí) в Північній ЕС ОЕС Бразилії [60]. Графіки коливань потоку активної потужності в цьому перетині за вимкнених FACTS ПК та за ввімкненої FACTS ПК на ПС “Імператриц” наведено на рис. 2.2. В обох випадках завантаження перетину “Північ–Південь” до виникнення зазначеного збурення становило 500 МВт.

Засоби ППК (статичний компенсатор реактивної потужності (англ. – Static Var Compensator, SVC), STATCOM) дають можливість варіювати значення генерованої реактивної потужності шляхом вмикання або вимикання ємнісних або індуктивних

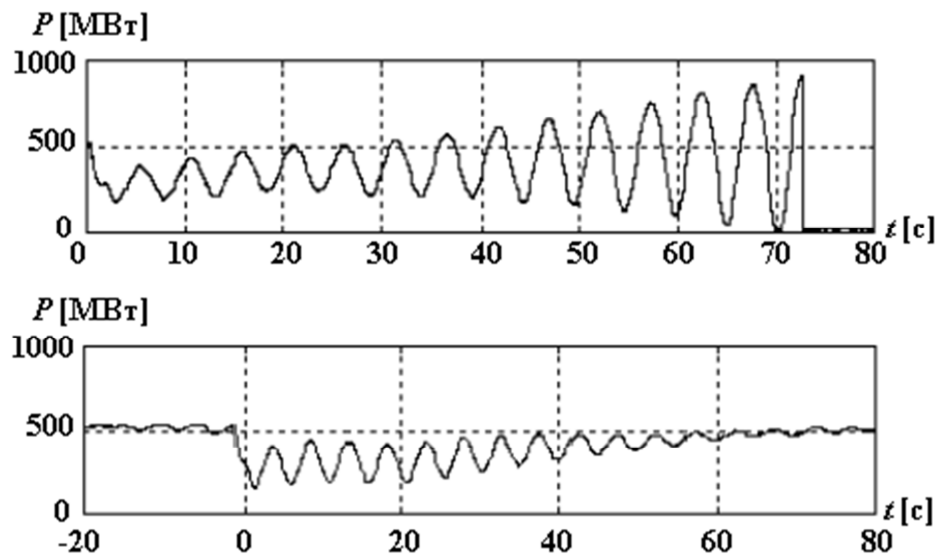


Рисунок 2.2 – Графіки НЧК в ЕО Бразилії без FACTS ПК (верхній) та з FACTS ПК (нижній)

секцій, підключених паралельно до землі (для FACTS на рис. 2.3 зміну значення генеруємої реактивної потужності здійснюють шляхом комутації тиристорними ключами T_1 та T_2 секцій з індуктивними провідностями b_L , підключених паралельно до блоку з незмінною ємнісною провідністю b_c) [47].

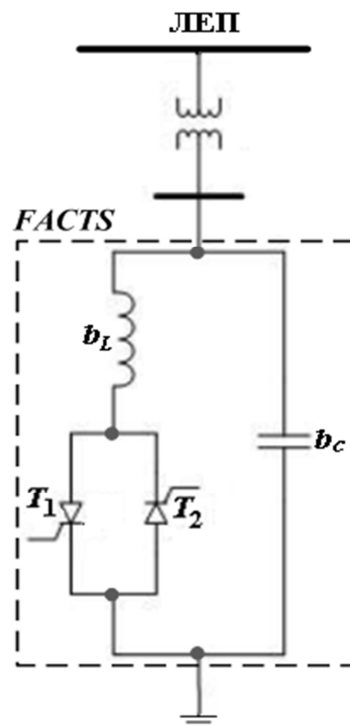


Рисунок 2.3 – Схема FACTS ППК

Якісне покращення демпфірування НЧК в ЕС (ЕО) внаслідок застосування FACTS ППК підтверджено, зокрема, розрахунками, проведеними на моделі Східної ЕС США [174], де внаслідок трифазного короткого замикання (КЗ) тривалістю 0,083с на ПС “Північний Нешвіл” (North Nashville) спостерігалися НЧК з частотою близько 0,6 Гц. Графіки коливань активної потужності СГ №2 ЕСт “Галлатін” (Gallatin) за відсутності FACTS ППК на шинах цієї ЕСт та за наявності там FACTS ППК потужністю 8 МВАр або 50 МВАр наведено на рис. 2.4.

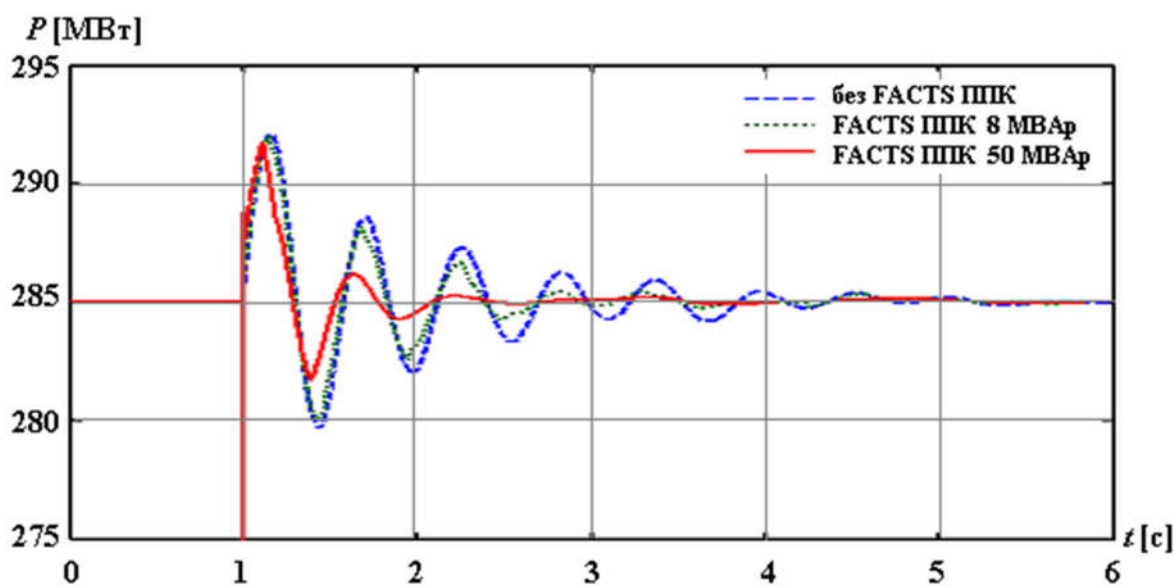


Рисунок 2.4 – Графіки НЧК у Східній ЕС США без FACTS ППК та з FACTS ППК

Засоби FACTS ППК (UPFC, CSC) дають змогу здійснювати незалежне регулювання активної та реактивної потужностей, завдяки чому вони набувають все більшого розповсюдження і є найперспективнішими серед FACTS [33]. Загальну схему таких FACTS наведено на рис. 2.5.

Суттєвий вплив засобів UPFC на демпфірування НЧК в ЕС (ЕО) підтверджено, зокрема, результатами досліджень, проведених на моделях чотирнадцятивузлової схеми IEEE та схеми ЕС Нігерії [114]. Графіки відхилень значень потоку активної потужності від відповідних значень до аварійного режиму (аварію було спричинено нестійким трифазним КЗ) по одній з ЛЕП ЕС Нігерії за відсутності та за наявності UPFC наведено на рис. 2.6.

Застосування систем HVDC набуло широкого розповсюдження в ЕС (ЕО) таких високорозвинених країн як США, Канада, Японія, Німеччина, Франція, Італія,

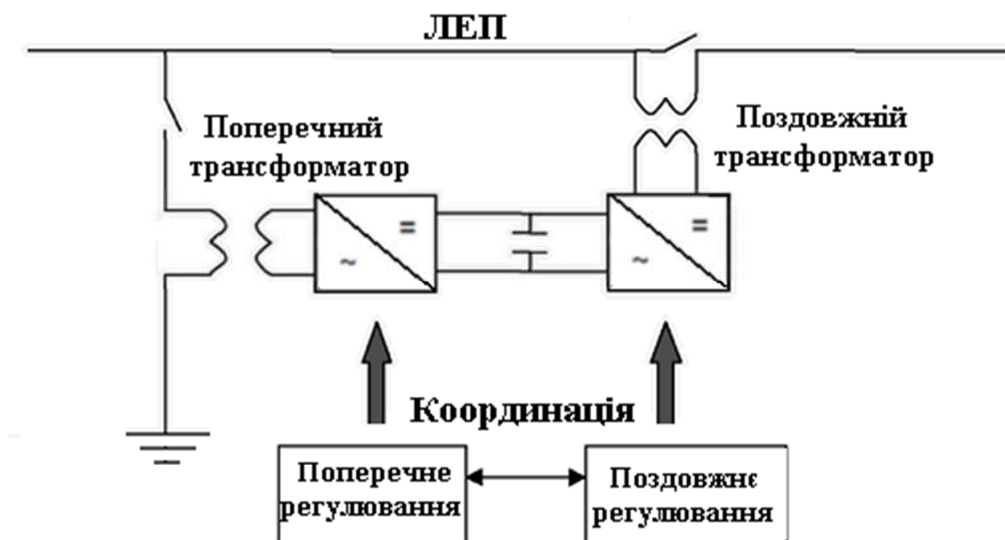


Рисунок 2.5 – Схема FACTS ПППК

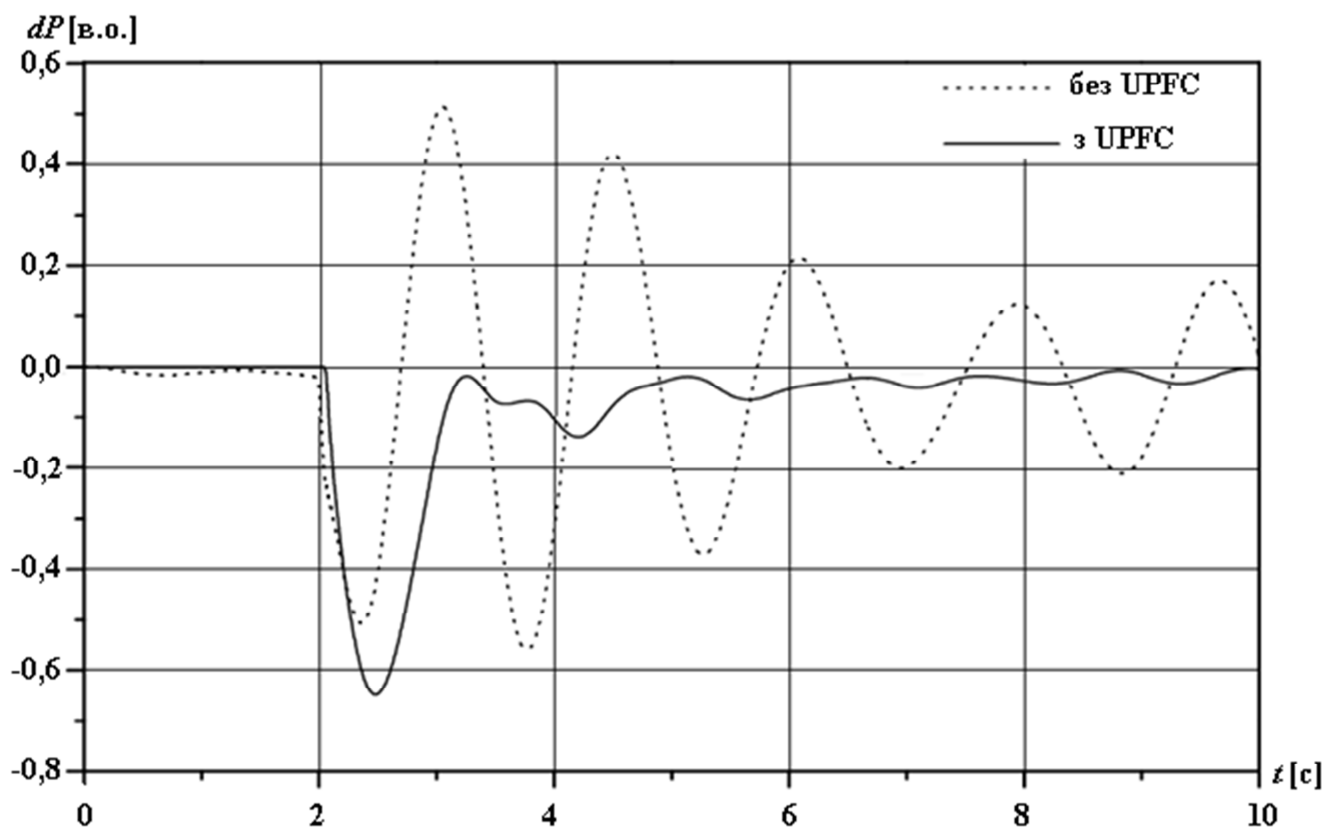


Рисунок 2.6 – Графіки НЧК потоку активної потужності по одній з ЛЕП ЕС Нігерії за відсутності та за наявності UPFC

Великобританія, КНР, Індія, Бразилія. На сьогодні існує широкий спектр типових схем, які застосовують для HVDC-систем – монополярні, біполярні, “B2B”, триполярні, багато-термінальні. Основні компоненти HVDC-системи електропередачі наведено на рис. 2.7 [136].

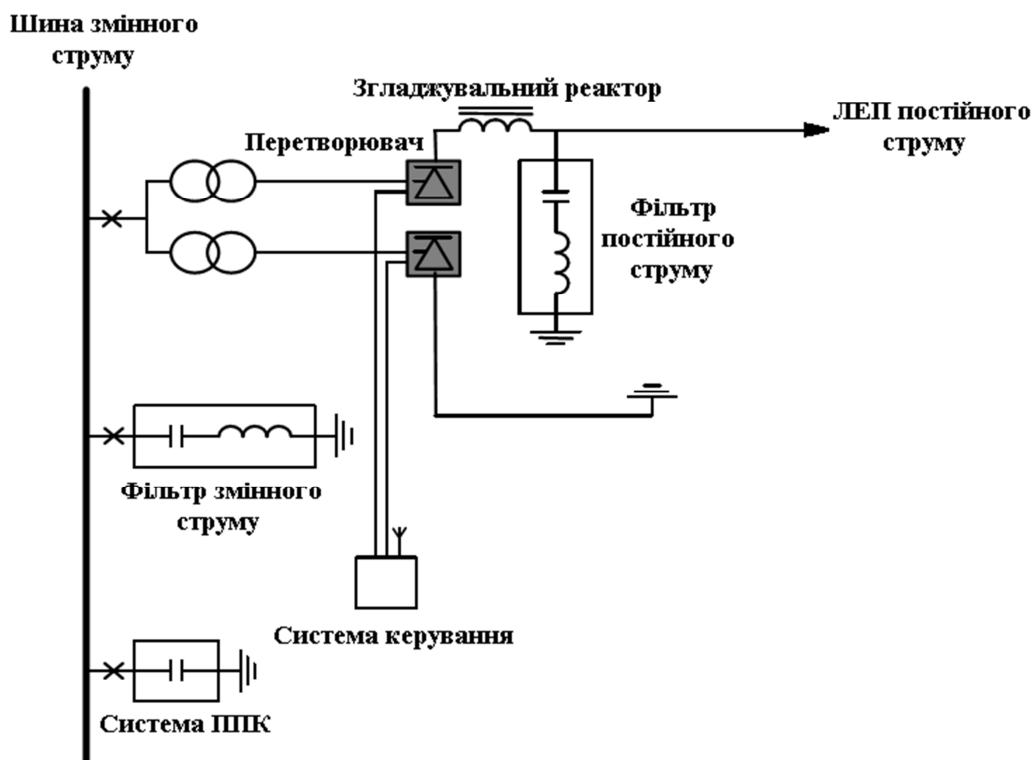


Рисунок 2.7 – Загальна структура HVDC-системи електропередачі

Системи HVDC дають змогу збільшити значення потоків активної потужності між ЕС у складі ЕО, забезпечити динамічну стійкість ЕО, зменшити втрати потужності, об'єднати на паралельну роботу ЕС з різними частотами основної гармоніки струму тощо [175]. Крім того, в [105, 144, 175] показано можливість та доцільність застосування HVDC-систем з метою якісного покращення процесів демпфірування НЧК в ЕС (ЕО).

Підвищення ефективності демпфірування НЧК за наявності HVDC-систем підтверджено результатами досліджень на моделях ЕС (ЕО) і прикладами їх застосування в складі реальних ЕО. Зокрема, застосування виконаного за біполярною схемою HVDC-зв'язку з номінальною напругою ± 500 кВ у Південно-східній ЕС ОЕС Мексики між ПС "Темаскал" (Temascal) та "ММТ" дало змогу змінити з від'ємного на додатний характер демпфірування НЧК з частотою близько 0,5 Гц, які спостерігалися в перетині "Північ–Південь" за аварійного відключення ЛЕП з номінальною напругою 400 кВ між ПС "PDB" та ПС "TEX" [105]. Графіки коливань модуля напруги на шинах ПС "Темаскал" за відсутності HVDC-зв'язку та за наявного HVDC-зв'язку в двох режимах роботи наведено на рис. 2.8.

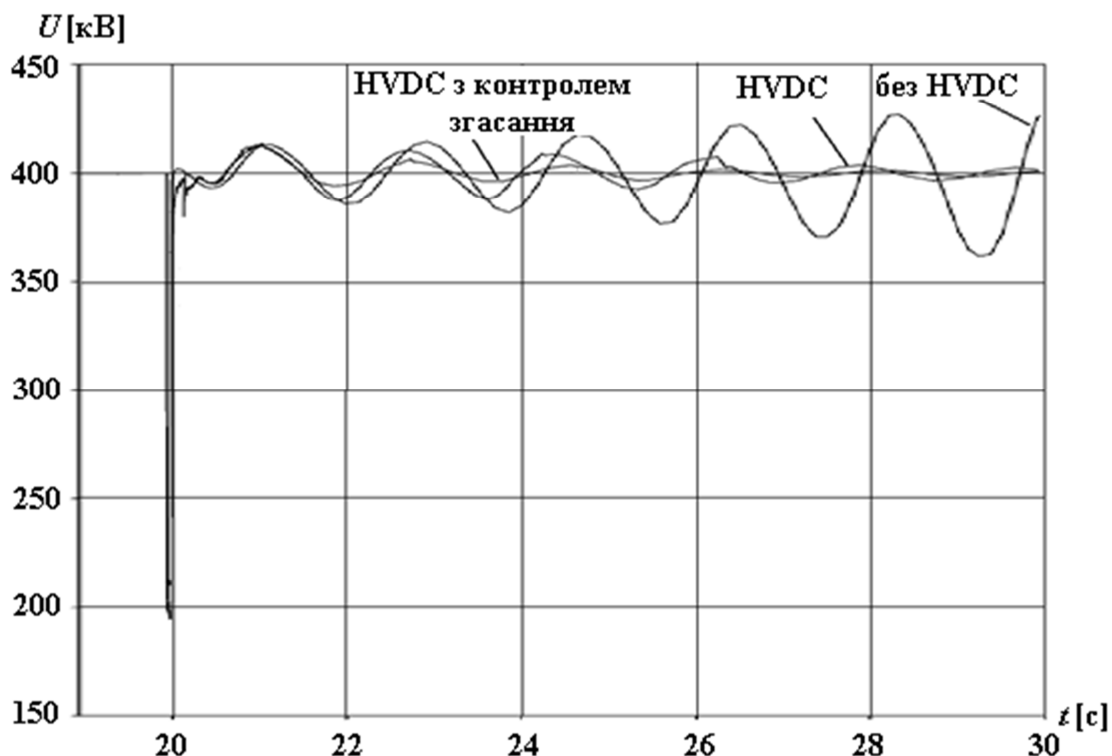


Рисунок 2.8 – Графіки коливань модуля напруги на ПК “Темаскал” в ОЕС Мексики без HVDC-зв’язку та з HVDC-зв’язком у двох режимах роботи

Накопичувачі енергії, які застосовують у сучасній електроенергетиці, базуються на різних принципах: механічному (гідроакумуюча ЕСт, пневмоакумуюча ЕСт, супермаховик), тепловому (ЕСт з тепловими акумуляторами), хімічному (електрохімічний акумулятор), електричному (суперконденсатор), електромагнітному (надпровідниковий індукційний накопичувач). Наявність високих показників питомої масової (об’ємної) енергетичної ємності, низьких питомих витрат на зберігання накопиченої енергії, висока мобільність установок обумовило широке розповсюдження НЕ на основі супермаховиків та суперконденсаторів. Приклад схеми застосування НЕ на основі суперконденсаторів наведено на рис. 2.9.

Перевагою НЕ, створених із застосуванням супермаховиків та суперконденсаторів, є можливість здійснювати швидке перемикання між режимом накопичення енергії та режимом її видачі в мережу [150]. Ця особливість дає можливість застосовувати зазначені НЕ з метою зменшення або ліквідації миттєвих дефіцитів потужності (енергії) в ЕС (ЕО), які виникають в ЕС (ЕО) в перші секунди після відключення потужних СГ чи МЗ.

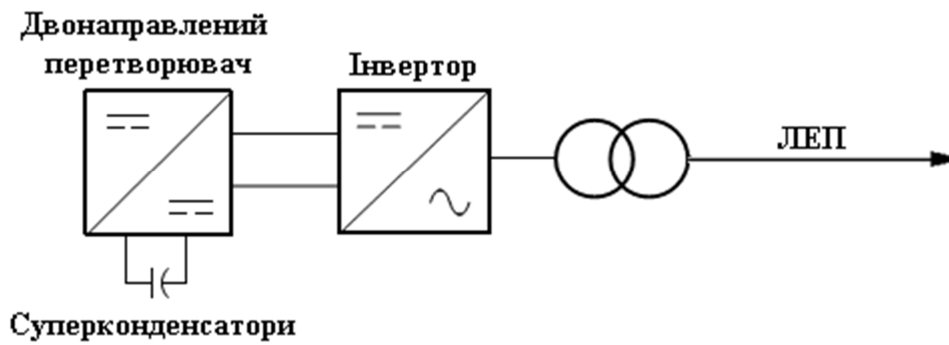


Рисунок 2.9 – Схема застосування НЕ на основі суперконденсаторів

Крім того, в [32, 111, 150] показано можливість застосування НЕ, створених на основі супермаховиків та суперконденсаторів, з метою якісного покращення процесів демпфірування НЧК в ЕС (ЕО). Підвищення ефективності демпфірування НЧК з використанням зазначених НЕ підтверджено результатами досліджень, проведених на основі тестових моделей ЕС. Зокрема, для тестової моделі чотиримашинної ЕС з [91] (відомої також як “IEEE 2-area benchmark system”) застосування таких НЕ дало змогу змінити з від’ємного на додатний характер демпфірування НЧК з частотою близько 0,5 Гц, які виникли в МЗ номінальної напруги 230 кВ. Графіки коливань потоків активної потужності по МЗ за відсутності НЕ та у разі використання НЕ з різними засобами керування наведено на рис. 2.10 [150].

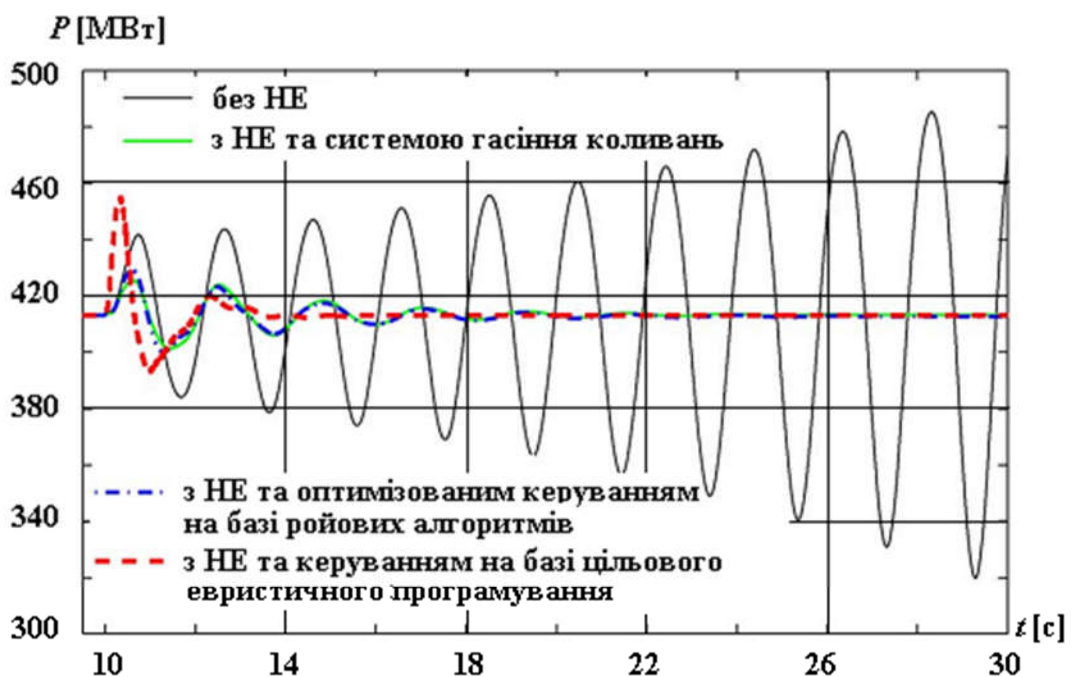


Рисунок 2.10 – Графіки коливань потоку активної потужності по МЗ без НЕ та з НЕ

Автоматичні регулятори збудження сильної дії в складі САКЗ СМ є, фактично, єдиними наявними в ОЕС України засобами демпфірування НЧК [7]. На сьогодні САКЗ СМ закордонного виробництва виконують, переважно, згідно типових схем, наведених у [72]. Основними функціями САКЗ СМ є стабілізація напруги на шинах СМ відповідно до заданого значення уставки та демпфірування коливань ротора СМ (з метою демпфірування застосовують конструктивно незалежні PSS, які входять до складу САКЗ СМ). Зазвичай під час налаштування параметрів АРЗ СД проблема демпфірування НЧК, які можуть виникати в ЕС (ЕО) між окремими групами СМ, залишається поза увагою, хоча застосування певним чином налаштованих АРЗ СД СМ дає можливість якісно покращити процес демпфірування НЧК в ЕС (ЕО), що підтверджено результатами досліджень на тестових моделях ЕС. Зокрема, для тестової моделі чотиримашинної ЕС [91] зменшення в автоматичному регуляторі напруги (англ. – Automatic Voltage Regulator, AVR) САКЗ СМ коефіцієнтів підсилення за напругою з 200 до 10 дало змогу змінити з від'ємного на додатний характер демпфірування НЧК з частотою близько 0,65 Гц, які виникли в ЛЕП, що з'єднує дві частини ЕС [7].

Основною функцією PSS є покращення демпфірування НЧК роторів СГ шляхом регулювання їх збудження із застосуванням допоміжних стабілізуючих сигналів, які формують на основі вхідних сигналів активної потужності, кутової швидкості, частоти або їх відхилень від певного опорного значення [72, 91]. На сьогодні саме PSS є найбільш розповсюдженим способом демпфірування НЧК в ЕС (ЕО). Системні стабілізатори виконують, переважно, у відповідності до типових схем, наведених у стандарті [72]. Ефективність їх застосування з огляду на покращення демпфірування НЧК в ЕС (ЕО) підтверджено результатами низки досліджень, проведених як на тестових моделях ЕС, так і в реальних ЕС (ЕО). Зокрема, для Південної ЕС ОЕС Бразилії встановлення чотирьох PSS дало змогу якісно покращити процес демпфірування НЧК з частотою близько 1,2 Гц, які виникали в ЕС у результаті раптового збільшення на 5 % вхідного механічного моменту СГ, підключеного до шин ПС “Барракао” (Barracão) [56]. Графіки коливань кутової швидкості СГ ГЕС “Сальто Осоріо” (Salto Osorio) за відключених PSS у Південній ЕС ОЕС Бразилії та за їх роботи в двох режимах наведено на рис. 2.11.

В ОЕС України номенклатура наявних технічних засобів, придатних для демпфірування НЧК режимних параметрів, на сьогодні, фактично, обмежується САКЗ СМ [7].

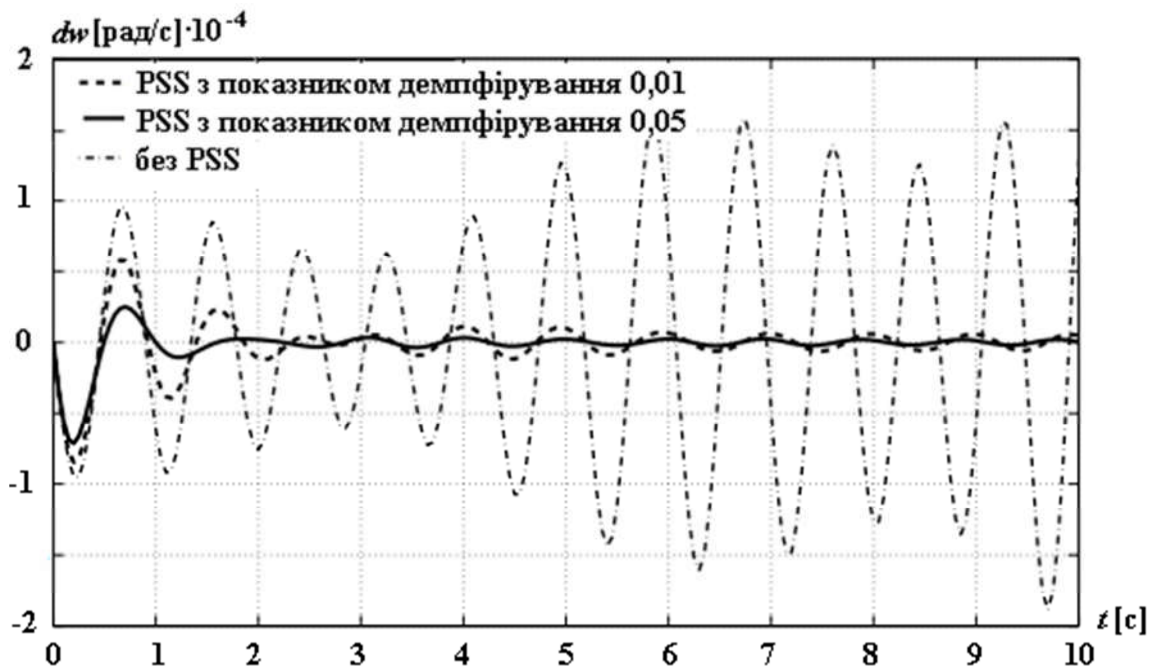


Рисунок 2.11 – Графіки коливань кутової швидкості СГ без PSS та з PSS у двох режимах роботи

Зважаючи на значну вартість засобів FACTS (орієнтовно, 100 тис. \$ США/МВ Ар [33]), HVDC (орієнтовно, 10 млн. €/км [146]) та HE (орієнтовно, 250...500 тис. \$ США/МВт год [138]) впровадження в ОЕС України зазначених засобів не передбачено, принаймні, до 2030 р. [14, 15], у той же час вартість стабілізаторів PSS є значно меншою (від 7,5 тис. \$ США за одиницю [152]) (якщо ж обмежитися використанням в ОЕС України існуючих САКЗ СМ, то потреби в додаткових витратах на обладнання взагалі не виникне). Таким чином, зазначені передумови окреслюють у найближчому майбутньому можливість застосування в ОЕС України лише САКЗ СМ для демпфірування НЧК.

2.2 Демпфірування НЧК в ЕО за допомогою САКЗ СМ

Автоматичні регулятори збудження, які зараз перебувають в експлуатації, реалізують значну кількість функцій, але найбільш важливими для ЕС функціями є дві [7]:

1) стабілізація напруги на шинах СМ відповідно до заданого значення уставки V_{ref} із урахуванням існуючих обмежень на значення напруги і струму ротора (відповідно, V_f та I_f) та статора (відповідно, V_t та I_s), а також підтримання статизму за напругою в разі зміни реактивного струму;

2) демпфірування коливань ротора СМ (які визначають за відхиленнями кута ротора $\Delta\delta$ від початкового значення δ_0) на основі відхилень швидкості обертання $\Delta\omega$ або частоти Δf відносно початкових номінальних значень (відповідно, ω_0 або f_0) або за прискорюючою потужністю P_a .

Прискорююча потужність виникає як небаланс механічної та електричної потужностей:

$$P_a = P_m - P_e = P_m - \left[P_e(\varphi_{\Delta E'_q}) + P_D(\varphi_{\Delta\omega}) + P_S(\varphi_{\Delta\delta}) \right],$$

де P_m – механічна потужність (потужність турбіни);

P_e – електрична потужність СМ;

$P_e(\varphi_{\Delta E'_q})$ – складова P_e , пропорційна до перехідної синхронної ЕРС E'_q і обумовлена дією САКЗ з деяким фазовим запізненням $\varphi_{\Delta E'_q}$ відносно збурення (причини виникнення перехідного процесу) через наявність електромагнітної інерційності обмотки ротора СМ і САКЗ;

$P_D(\varphi_{\Delta\omega})$ – демпферна складова P_e , пропорційна до зміни швидкості обертання ротора $\Delta\omega$, яка визначається з деяким фазовим запізненням $\varphi_{\Delta\omega}$ відносно збурення через наявність електромагнітної та механічної інерційності ротора СМ;

$P_S(\varphi_{\Delta\delta})$ – синхронізуюча складова P_e , пропорційна до зміни кутового положення ротора $\Delta\delta$, яка визначається з деяким фазовим запізненням $\varphi_{\Delta\delta}$ відносно збурення через наявність електромагнітної та механічної інерційності ротора СМ.

На сьогодні в ОЕС України та ОЕС (ЕС) країн пострадянського простору в експлуатації перебувають, переважно, САКЗ з АРЗ СД, тоді як в ЕС більшості країн світу – САКЗ з конструктивно незалежними AVR та PSS.

Структуру АРЗ СД утворюють пропорційно-диференціальний регулятор (вхідними сигналами якого є відхилення і похідна напруги статора (відповідно, ΔV_t та V_t)) та канали стабілізації (вхідними сигналами яких є відхилення і похідна струму ротора (відповідно, ΔI_f та I_f) та відхилення і похідна частоти струму (відповідно, Δf та f)), які забезпечують демпфірування НЧК ротора СМ. Закон регулювання такого АРЗ СД можна подати у вигляді

$$\Delta V_{AP3} = -(K_{0u} + K_{1u}p)\Delta V_t + K_f W_f \Delta f - K_{1if} W_{1if} \Delta I_f p, \quad (2.1)$$

де ΔV_{AP3} – приріст напруги виходу АРЗ СД;

ΔV_t , Δf , ΔI_f – вхідні сигнали, пропорційні, відповідно, до приростів напруги статора, частоти та струму ротора;

K_{0u} , K_{1u} , K_f , K_{1if} – коефіцієнти підсилення за приростом напруги статора, похідної напруги статора, приростом частоти та похідної струму ротора відповідно;

W_f , W_{1if} – передавальні функції каналів зворотного зв'язку за приростом частоти та похідною струму ротора відповідно;

p – оператор диференціювання [7].

Залежність (2.1) відображає властивості АРЗ СД в області частот електромеханічних коливань. У цьому разі K_f є узагальнюючим коефіцієнтом, який відображає спільний вплив каналів відхилення та похідної частоти напруги (відповідно, K_{0f} та K_{1f}) за умови, що під час налаштування ці коефіцієнти в шкалах АРЗ обирають однаковими. Після ряду перетворень та з урахуванням рівності похідної струму ротора і похідної приросту перехідної синхронної ЕРС, закон (2.1) для регулятора типу АРЗ СД набуде вигляду

$$\Delta V_{AP3} = -(K_E + pK_{1E})\Delta E_q + (K_\delta + pK_{1\delta})\Delta \delta,$$

де коефіцієнти K_E , K_{1E} , K_δ , $K_{1\delta}$ залежать як від режиму роботи СМ, так і від певних інших чинників (опору електричного зв'язку СМ з ЕС, конструкції СМ, значень коефіцієнтів K_{0u} , K_{1u} , K_f , K_{1if}).

Структурну схему САКЗ з АРЗ СД у разі одночастотного руху СМ з урахуванням фазових запізнень, що мають місце під час зміни потокозчеплення $\Phi_{\Delta\psi}$ і положення ротора $\Phi_{\Delta\delta}$, наведено на рис. 2.12 [7]. Параметри W_f , W_p , W_y , позначені на рис. 2.12, є передавальними функціями, відповідно, збудника, ротора та якоря СМ.

До переваг такої структури САКЗ можна віднести наявність стабілізуючого каналу за похідною струму ротора, що, як відомо, в разі вірного налаштування забезпечує значні запаси стійкості СМ у режимах мінімального збудження. До недоліків такої структури відносять велику кількість зворотних зв'язків та використання пропорційно-диференціального регулятора за відхиленням напруги статора, що призводить

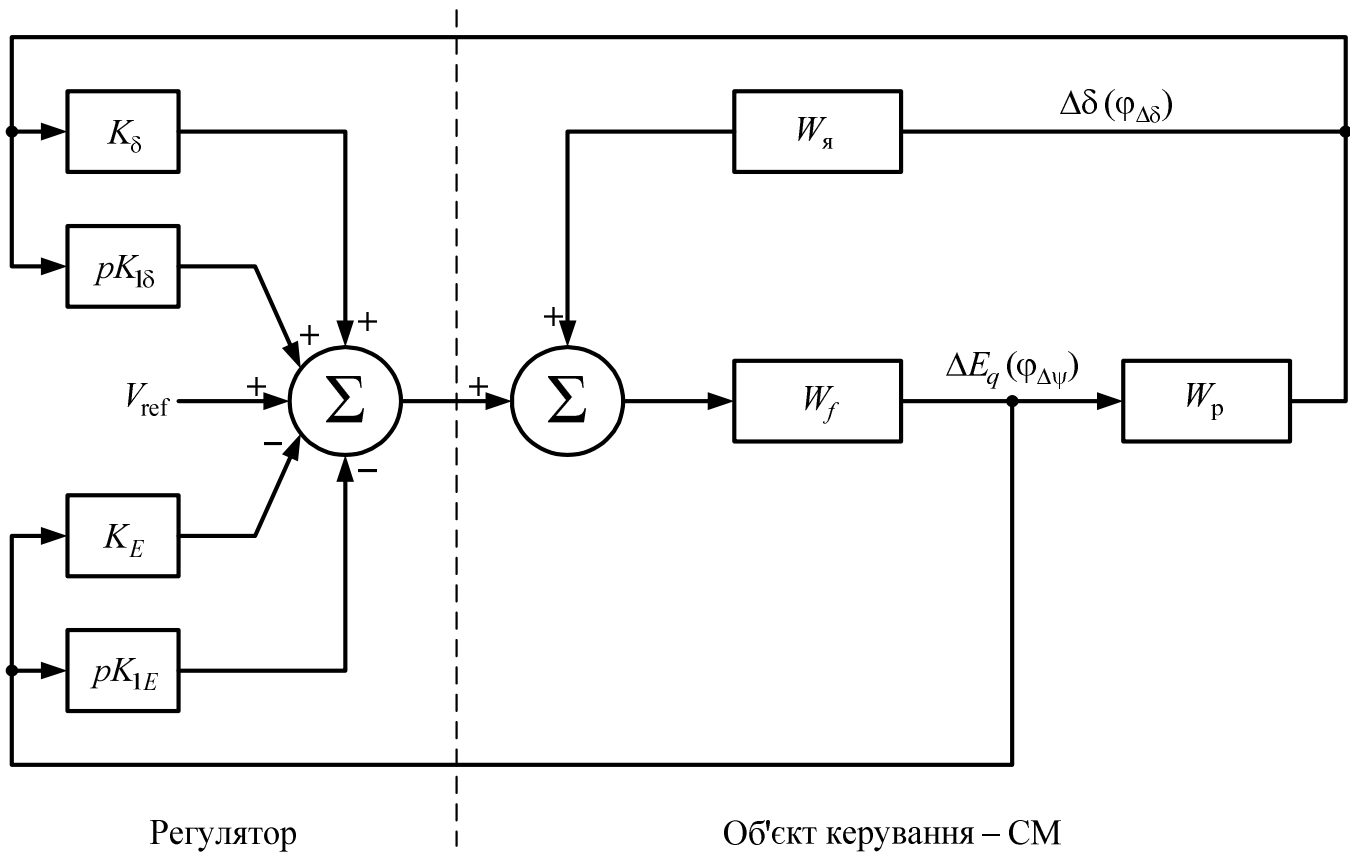


Рисунок 2.12 – Структурна схема САКЗ з АРЗ СД

до значного впливу на його функціонування високочастотних шумів і ускладнює налаштування та експлуатацію САКЗ СМ.

У регуляторах типу АРЗ СД використовують пропорційно-диференціальний закон (2.1) щодо скалярної помилки регулювання, яку можна подати у вигляді

$$\Delta V = V_{\text{ref}} - V_{tc} = V_{\text{ref}} - K_P \cdot |V_t + (R_c + jX_c)I_s|, \quad (2.2)$$

де K_P – сумарний коефіцієнт перетворення контуру зворотного зв'язку за напругою статора; R_c , X_c – активний та індуктивний опори навантаження, врахування яких дає змогу компенсувати падіння напруги, яка виникає під час протікання струму I_s .

Таким чином, контур зворотного зв'язку за напругою статора дає змогу реагувати на збурення стану СМ, обумовлене струмом навантаження I_s . Необхідно зазначити, що сучасні АРЗ СД не мають стандартизованих типових схем виконання, проте мають задовольняти низці вимог відповідно до [24].

Узагальнену структурно-функціональну схему САКЗ СМ, що містить AVR та PSS, наведено на рис. 2.13 [7]. Відповідно до двох зазначених функцій САКЗ СМ, схема має два основних контури зворотних зв'язків (на рис. 2.13 зазначені контури показано суцільними стрілками). Функції регулювання напруги відповідно до заданої уставки V_{ref} виконує верхній контур, визначений сигналами V_t , I_s та V_{tc} , а демпфірування коливань ротора СМ – нижній контур, визначений сигналами f , ω , P_a та $V_{f(\omega, Pa)}$ (тут V_{tc} – сигнал після вимірювальних трансформатора струму або трансформатора напруги; $V_{f(\omega, Pa)}$ – сигнал після перетворювачів, що надходить до PSS). Параметри I_{FD} та E_{FD} , позначені на рис. 2.13, є, відповідно, струмом та напругою збудження СМ.

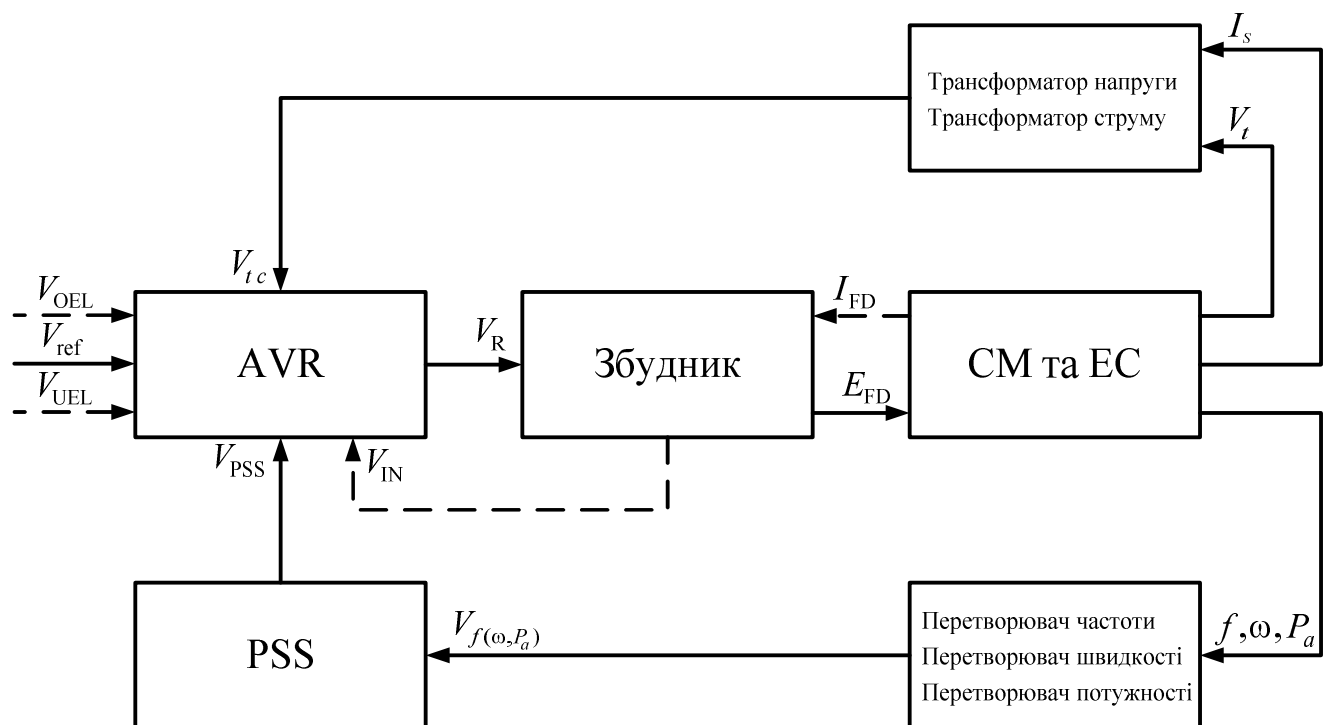


Рисунок 2.13 – Структурна схема САКЗ з AVR та PSS

Схема також містить зворотні зв'язки-обмежувачі (на рис. 2.13 показані штриховими стрілками), пов'язані з граничними режимами функціонування СМ:

- V_{OEL} – сигнал від обмежувача переобтяження за струмом ротора або статора (обмежувача максимального збудження (англ. – OverExcitation Limiter, OEL)) у разі форсування збудження;
- V_{UEL} – сигнал від обмежувача мінімального збудження (англ. – UnderExcitation Limiter, UEL)), характеристику якого визначають, виходячи з умов допустимого нагріву осердя статора або стійкості роботи СМ за мінімально допустимих значень напруги статора в мережі;

– V_{IN} – сигнали від внутрішніх обмежувачів і захистів САКЗ (обмежувачі кратності напруги збудження в разі форсування, обмежувачі системи охолодження тиристорного перетворювача, релейний захист і автоматика САКЗ та ін.).

На відміну від АРЗ СД, в схемах AVR реалізують, переважно, пропорційний або пропорційно-інтегральний закон регулювання за похибкою (2.2), фазу якої коригують додатковою ланкою фазового зсуву (випередження/затримки) зі сталими часу T_1 , T_2 , T_3 та T_4 з метою компенсації фазових запізнь $\varphi_{\Delta\delta}$ та $\varphi_{\Delta\omega}$. З урахуванням (2.2), додаткового входу від PSS та фазозсувної ланки, “вихід” блоку “AVR” може бути описано рівнянням

$$V_R = \frac{K_R}{1 + pT_R} \cdot \frac{(1 + pT_1)(1 + pT_3)}{(1 + pT_2)(1 + pT_4)} (V_{ref} + V_{PSS} - V_{tc}),$$

де K_R – постійна, пов’язана з регулятором та джерелом живлення збудника;

T_R – постійна часу фільтра на вході регулятора.

Стандарт [72] регламентує три типи схем САКЗ СМ, які містять AVR та PSS:

– DC – САКЗ зі збудником, що містить генератор постійного струму (моделі “Amplidyne” (виробник – “General Electric”), “AB” (“ABB”), “Mag-A-Stat” (“Westinghouse”, США) тощо);

– AC – САКЗ зі збудником, що містить генератор змінного струму і випрямляч (моделі “ALTERREX” (“General Electric”), “THYRISIEM” (“Siemens AG”, Німеччина), “PRISMIC” (“FKI”, Великобританія) тощо);

– ST – САКЗ зі збудником статичного типу (моделі “Silcomatic” (“General Electric”), “WTA” (“Westinghouse”), “Eurorec” (“ALSTOM”, Франція) тощо).

Можливості САКЗ СМ (як АРЗ СД, так і AVR+PSS) у контексті демпфірування НЧК було досліджено із застосуванням моделей двох тестових схем (ТС) ЕС: чотиримашинної з [91] (далі – ТС-I), та шестимашинної з [9] (далі – ТС-II). Структурні схеми та параметри ТС-I та ТС-II наведено в додатках А та Б відповідно.

З метою дослідження впливу типу САКЗ з AVR зі “штатними” та налаштовувемими значеннями параметрів на демпфірування НЧК було обрано по два “представника” кожного типу САКЗ (із найбільш широко пропонуємих виробниками): DC1A, DC2A, AC1A, AC5A,

ST1A, ST2A. Реалізовані в середовищі “Matlab” структурні схеми AVR цих САКЗ та значення їх параметрів за [72] наведено в додатку В. Модельно-розрахункові дослідження було виконано з використанням пробних версій продуктів “Matlab” та “Simscape Power Systems”.

Аналіз САКЗ СМ щодо можливостей демпфірування НЧК було здійснено за допомогою таких досліджень (СМ було змодельовано рівняннями Парка–Горєва з урахуванням одного демпферного контуру за поздовжньою віссю роторів та одного – за поперечною):

- визначення граничного потоку активної потужності по МЗ за умови застосування для всіх СМ ТС параметрів AVR САКЗ згідно з [72] (необхідно зазначити, що “набори” параметрів для налаштування AVR САКЗ наведено в [72] лише як зразок і вони не є єдиним можливим варіантом налаштувань, проте зазначені “набори” параметрів є узгодженими (збалансованими) та їх може бути задіяно на практиці, що зумовлює їх використання в подальших дослідженнях);
- визначення коефіцієнта підсилення AVR за відхиленням напруги, який забезпечує максимальний потік активної потужності по МЗ;
- визначення коефіцієнта підсилення AVR за відхиленням напруги, за якого досягається максимальний час тривалості трифазного КЗ, що не призводить до коливного порушення стійкості ЕО.

Зазначені дослідження було проведено шляхом імітаційного моделювання в середовищі “Matlab” із застосуванням відповідних моделей ТС-I та ТС-II (структурні схеми моделей ТС-I та ТС-II у середовищі “Matlab” наведено на рис. А.2 додатку А та на рис. Б.2 додатку Б відповідно) за таких умов:

- стабілізатори PSS відключено;
- граничні значення потоку потужності по МЗ (або контрольованим ЛЕП) та тривалості трифазного КЗ відповідали режиму на межі коливного порушення стійкості ЕС;
- навантаження електроспоживання змодельовано постійними значеннями активних та реактивних потужностей;
- зміна потоку потужності по МЗ (або контрольованим ЛЕП), які поєднують дві частини ЕО (ЕС), здійснювалася шляхом зміни активної потужності навантаження та перерозподілом навантажень між СГ ЕС з метою недопущення переобтяження СГ за робочим струмом статора та забезпечення резерву активної потужності на СГ, що виконує роль балансуєчого пункту (БП) (G_2 для ТС-I та СГ 101 для ТС-II).

У нормальному режимі роботи ЕС МЗ має нести навантаження, яке забезпечує, принаймні, мінімальний коефіцієнт запасу за активною потужністю, що становить 20% від межі статичної стійкості МЗ згідно з керівними вказівками [23]. Слід зазначити, що визначення межі статичної стійкості МЗ згідно [23] є доволі складною задачею, оскільки потребує виконання досліджень із застосуванням широкого ряду траєкторій обваження режиму ЕО, частини якого поєднує зазначений МЗ. Зважаючи на це в дисертаційній роботі з метою визначення відносного завантаження МЗ у різних режимах роботи ЕО ТС-I та ТС-II було застосовано не значення активної потоку потужності, яка передається по МЗ у граничному за статичною стійкістю режимі, а значення граничної потужності передачі.

Відомо, що активну потужність, яка передається по МЗ, може бути визначено як:

$$P = \frac{U_1 U_2}{x} \sin \delta, \quad (2.3)$$

де U_1, U_2 – модулі напруги пунктів, поєднаних МЗ (кВ);

x – реактивний (або еквівалентний реактивний) опір МЗ (Ом);

δ – кут між векторами напруги пунктів, які поєднує МЗ (ел. град.) [28].

Відповідно до (2.3), ідеальної межі потужність передачі досягає за $\delta = \pi/2$:

$$P_{\max} = \frac{U_1 U_2}{x}. \quad (2.4a)$$

Застосування виразу (2.4a), який враховує лише реактивний опір, для визначення ідеальної межі потужності передачі призводить до певного завищення цієї межі та може стати причиною хибної оцінки запасу МЗ за активною потужністю передачі. Можна показати, що максимальну активну потужність, яку можна передати до кінця МЗ, з урахуванням всіх параметрів симетричної П-подібної заступної схеми ЛЕП необхідно розраховувати так:

$$P'_{\max 2} = \frac{2U_1U_2(r \cos \delta + x \sin \delta) - U_2^2(g(r^2 + x^2) + 2r)}{2(r^2 + x^2)}, \quad (2.46)$$

де r – активний опір ЛЕП (Ом);

g – активна провідність ЛЕП (См).

Кут δ , який забезпечує максимальне значення $P'_{\max 2}$, визначають так:

$$\delta = -2 \arctg \left(\frac{r \pm \sqrt{r^2 + x^2}}{x} \right).$$

Аналіз (2.46) дає змогу зробити висновок, що гранична потужність передачі МЗ змінюється разом зі зміною рівнів напруги на початку та в кінці МЗ, які відбуваються внаслідок зміни навантаження цього МЗ.

Результати досліджень з визначення граничного потоку активної потужності $P_{\text{гр}}$ по МЗ 7–9 для ТС-І наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Граничні (за умовою недопущення коливного порушення стійкості ЕС) потоки активної потужності МЗ у ТС-І з параметрами AVR САКЗ всіх СГ згідно з [72]

Параметри	Тип AVR САКЗ							
		AC1A	AC5A	DC1A	DC2A	ST1A	ST2A	AP3CD за [9]
$P_{\text{СГ}}$, МВт ($I_{\text{СГ}}$, в. о.)	1	700 (0,779)	800* (0,912)	700 (0,785)	850* (0,981)	700 (0,779)	700 (0,779)	700 (0,779)
	2	293 (0,331)	782 (0,925)	718 (0,821)	798 (0,982)	293 (0,331)	293 (0,331)	293 (0,331)
	3	719 (0,800)	719 (0,811)	719 (0,805)	719 (0,817)	719 (0,800)	719 (0,800)	719 (0,800)
	4	700 (0,778)	700 (0,806)	700 (0,784)	700 (0,827)	700 (0,778)	700 (0,778)	700 (0,778)
Модулі напруги на початку та в кінці МЗ, кВ	п	236,6	218,9	228,0	213,2	236,6	236,6	236,6
	к	237,7	223,4	230,5	219,0	237,7	237,7	237,7
$P_{\text{гр}}$ (у кінці МЗ), МВт		0	528	396	>574	0	0	0
$0,8P'_{\max 2}$ за (2.46), МВт		693	601	646	574	693	693	693

* Примітка: перерозподіл навантаження між СГ відносно вихідного розподілу (табл. А.4 додатку А) з метою недопущення переобтяження СГ за робочим струмом статора та забезпечення резерву активної потужності на СГ–БП.

За аналогією з наведеними в [23] вимогами до мінімального коефіцієнта запасу за активною потужністю МЗ у нормальному режимі роботи ЕС, під час проведення

досліджень завантаження МЗ 7–9 було обмежено $0,8P'_{\max 2}$. Знак “>” перед значенням $P_{\text{гр}}$ у табл. 2.1 означає, що граничний потік потужності по МЗ 7–9 перевищив прийняте обмеження в $0,8P'_{\max 2}$. Слід підкреслити, що значення граничної потужності передачі МЗ 7–9, визначені за виразами (2.4а) та (2.4б) за умови застосування для всіх СГ ТС-І САКЗ з AVR, наприклад, типу DC2A, становили, відповідно, 802 МВт та 717 МВт. Значна відмінність між отриманими значеннями підтверджує необхідність врахування усіх параметрів заступної схеми ЛЕП під час розрахунку її граничної потужності передачі.

Аналіз результатів, наведених у табл. 2.1. свідчить про неможливість паралельної роботи ЕС-1 та ЕС-2 за умови застосування для всіх СГ ТС-І САКЗ з AVR типів AC1A, ST1A, ST2A з параметрами відповідно до [72], а також АРЗ СД з прийнятими за [9] параметрами, оскільки за таких умов передача активної потужності з однієї ЕС до іншої призводить до виникнення НЧК, амплітуда яких зростає з плином часу. Приклад таких НЧК з частотою близько 0,6 Гц у МЗ, які виникли в ТС-І за умови застосування для всіх СГ САКЗ з AVR типу AC1A, наведено на рис. 2.14.

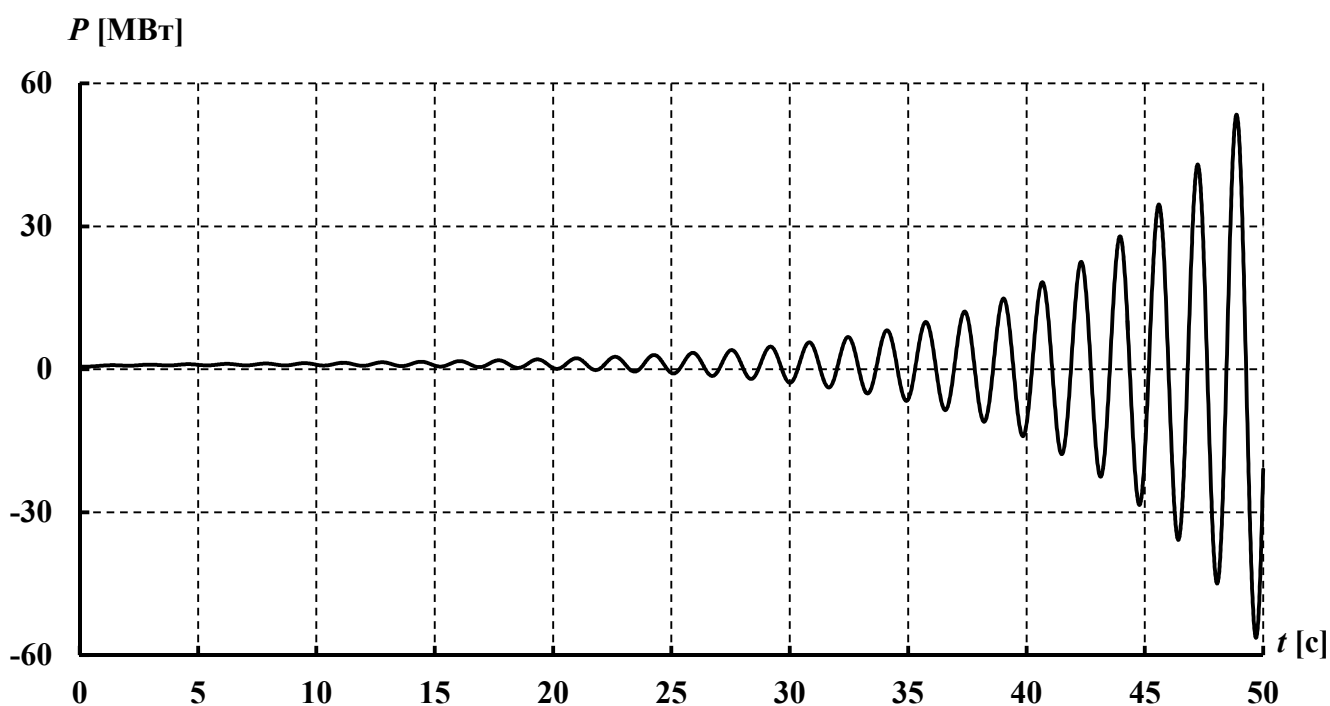


Рисунок 2.14 – Графік потоку активної потужності в кінці МЗ ТС-І за умови застосування для всіх СГ САКЗ з AVR типу AC1A з параметрами згідно з [72]

Слід зазначити, що за умови застосування для всіх СГ ТС-I САКЗ з AVR типів AC5A та DC1A граничні значення потоків активної потужності $P_{гр}$ по МЗ 7–9 є меншими за значення $P_{гр}$, досягнуте за умови застосування САКЗ з AVR типу DC2A, що вказує на певну неоптимальність (з огляду на необхідність забезпечення максимального значення $P_{гр}$ для МЗ) параметрів налаштувань САКЗ цих типів, прийнятих згідно з [72].

Результати аналогічних досліджень, проведених для МЗ 200–5 та 202–100 ТС-II, наведено в табл. 2.2. З урахуванням структури ТС-II зміна потоків потужності по МЗ тут здійснювалася виключно шляхом зміни генерування активної потужності СГ 201 та СГ 203. Знак “>” перед значенням $P_{гр}$ у табл. 2.2 означає, що граничний потік потужності по МЗ перевищив прийняте обмеження в $0,8P'_{\max 2}$ (розрахунок $P'_{\max 2}$ здійснювався за (2.4б)).

Таблиця 2.2 – Граничні (за умовою недопущення коливного порушення стійкості ЕС) потоки активної потужності МЗ у ТС-II з параметрами AVR САКЗ всіх СМ згідно з [72]

Параметри		Тип AVR САКЗ						
		AC1A	AC5A	DC1A	DC2A	ST1A	ST2A	AP3CД[за[9]
$P_{СГ}$, МВт ($I_{СГ}$, в. о.)	1	400 (0,918)	400 (0,931)	400 (0,949)	400 (0,949)	400 (0,921)	400 (0,920)	400 (0,949)
	3	400 (0,903)	400 (0,908)	400 (0,915)	400 (0,915)	400 (0,904)	400 (0,904)	400 (0,915)
	101	1840 (0,953)	1631 (0,879)	1449 (0,831)	1449 (0,831)	1780 (0,931)	1796 (0,937)	1449 (0,831)
	201	1031 (0,749)	1153 (0,849)	1265 (0,948)	1265 (0,948)	1065 (0,777)	1056 (0,769)	1265 (0,948)
	203	1031 (0,756)	1153 (0,858)	1265 (0,959)	1265 (0,959)	1065 (0,784)	1056 (0,776)	1265 (0,959)
МЗ 200–5								
$P_{гр}$ (у кінці МЗ), МВт		864	954	>1033	>1033	888	882	>1033
$0,8P'_{\max 2}$ за (2.4б), МВт		1062	1048	1033	1033	1058	1059	1033
Модулі напруги на початку та в кінці МЗ, кВ	п	517,0	513,7	509,8	509,8	516,2	516,4	509,8
	к	499,1	496,0	492,3	492,3	498,3	498,5	492,3
МЗ 202–100								
$P_{гр}$ (у кінці МЗ), МВт		606	722	821*	821*	638	630	821*
$0,8P'_{\max 2}$ за (2.4б), МВт		903	893	881	881	900	901	881
Модулі напруги на початку та в кінці МЗ, кВ	п	238,1	236,7	235,0	235,0	237,7	237,8	235,0
	к	232,3	231,1	229,6	229,6	232,0	232,1	229,6

* Примітка: обмеження потоку внаслідок досягнення потоком по ділянці 200–5 значення $0,8P'_{\max 2}$.

У граничних (за умовою недопущення коливного порушення стійкості ЕС) режимах роботи в МЗ спостерігався процес виникнення слабкозгасаючих НЧК або незгасаючих НЧК з незмінною амплітудою. Приклад таких НЧК з частотою близько 0,65 Гц у МЗ 200–5, які виникли в ТС-II за умови застосування для всіх СМ САКЗ з AVR типу AC1A, наведено на рис. 2.15.

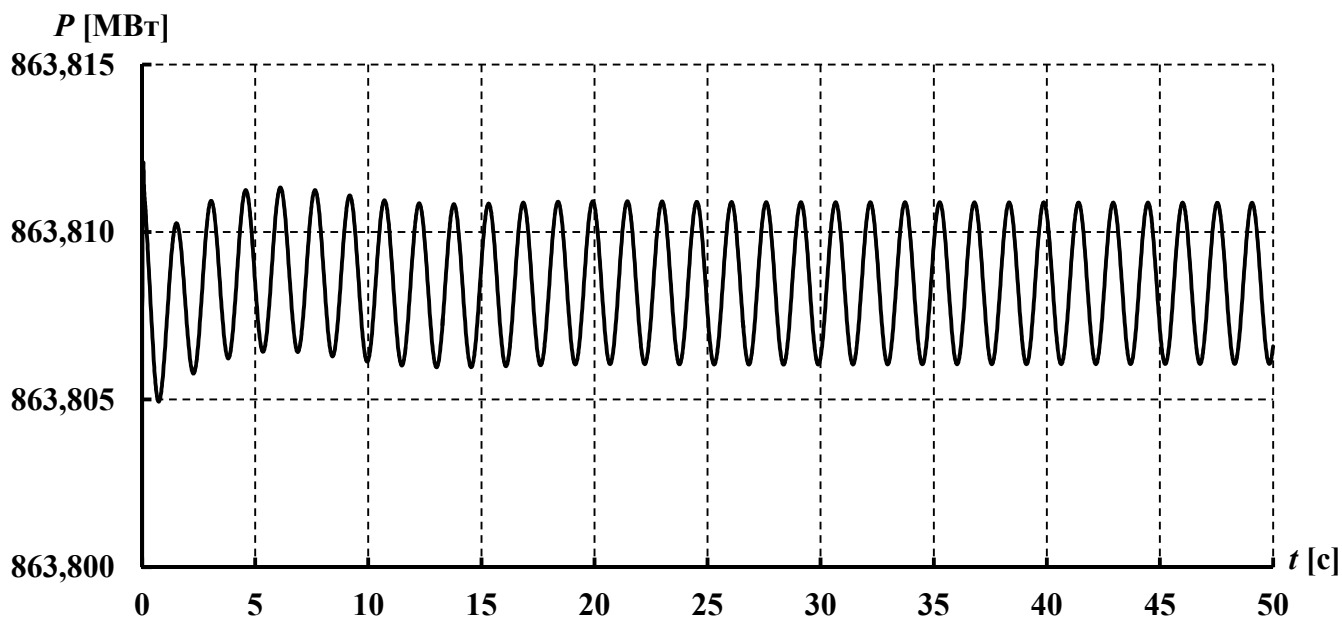


Рисунок 2.15 – Графік потоку активної потужності в кінці МЗ 200–5 ТС-II, який відповідає граничному (за умовою недопущення коливного порушення стійкості ЕС) режиму, у випадку застосування для всіх СМ САКЗ з AVR типу AC1A з параметрами згідно з [72]

Слід зазначити, що за умови застосування для всіх СГ ТС-I САКЗ з AVR типів AC1A, AC5A, ST1A та ST2A граничні значення потоків активної потужності $P_{гр}$ по МЗ 200–5 є меншими за значення $P_{гр}$, досягнуте за умови застосування САКЗ з AVR типів DC1A, DC2A та з АРЗ СД, що вказує на певну неоптимальність (з огляду на необхідність забезпечення максимального значення $P_{гр}$ для МЗ) параметрів налаштувань САКЗ цих типів, прийнятих згідно з [72].

Причиною зазначених обмежень значень потоків активної потужності в МЗ обох ТС (як і причиною неможливості забезпечення стійкої паралельної роботи ЕС–1 та ЕС–2 у ТС-I за умови застосування для СГ САКЗ з AVR типів AC1A, ST1A, ST2A та АРВ СД) є високе “стандартне” (згідно з [72]) значення коефіцієнта підсилення AVR САКЗ за відхиленням напруги, що суттєво погіршує можливості САКЗ щодо демпфірування НЧК в ЕС. Такий висновок було підтверджено результатами досліджень з визначення коефіцієнтів підсилення AVR САКЗ за відхиленням напруги (K_A для AVR (рис. В.1 – В.6 додатку В) або K_U для АРЗ СД (рис. Б.4 додатку Б)), які забезпечують максимальний потік активної потужності по МЗ у ТС-I та ТС-II. У

зазначених дослідженнях допустимий потік активної потужності по МЗ було обмежено $0,8P'_{\max 2}$ (розрахунок $P'_{\max 2}$ здійснювався за (2.4б)). Результати досліджень для ТС-I та ТС-II наведено в табл. 2.3 та табл. 2.4 відповідно. Знак “>” перед значенням $P_{гр}$ у табл. 2.3 і табл. 2.4 означає, що граничний потік потужності по МЗ перевищив прийняте обмеження в $0,8P'_{\max 2}$.

Таблиця 2.3 – Значення K_A , які забезпечують максимальний (за умови недопущення коливного порушення стійкості ЕС) потік активної потужності по МЗ у ТС-I

Тип AVR САКЗ	AC1A	AC5A	DC1A	DC2A	ST1A	ST2A	АРЗ СД
$P_{гр}$ (у кінці МЗ), МВт	>574*	>574*	>574*	>574*	>574*	>574*	0
K_A (K_U), що забезпечує $P_{гр}$	$2 \leq K_A \leq 31$	$2 \leq K_A \leq 85$	$1 \leq K_A \leq 39$	$2 \leq K_A \leq 1426$	$3 \leq K_A \leq 73$	$1 \leq K_A \leq 2$	–
K_A за [72] або K_U за [9]	400	400	46	300	190	120	200

* Примітка: перерозподіл навантаження між СГ відносно вихідного розподілу (табл. А.4 додатку А) з метою недопущення переобтяження СГ за робочим струмом статора та забезпечення резерву активної потужності на СГ–БП.

Таблиця 2.4 – Значення K_A , які забезпечують максимальний (за умови недопущення коливного порушення стійкості ЕС) потік активної потужності по МЗ у ТС-II

Тип AVR САКЗ	AC1A	AC5A	DC1A	DC2A	ST1A	ST2A	АРЗ СД
$P_{гр}$ (у кінці 200–5), МВт	>1033	>1033	>1033	>1033	>1033	>1033	>1033
$P_{гр}$ (у кінці 202–100), МВт	821*	821*	821*	821*	821*	821*	821*
K_A (K_U), що забезпечує $P_{гр}$	$1 \leq K_A \leq 41$	$1 \leq K_A \leq 73$	$1 \leq K_A \leq 111$	$K_A \geq 1$	$1 \leq K_A \leq 97$	$1 \leq K_A \leq 4$	$K_A \geq 1$
K_A за [72] або K_U за [9]	400	400	46	300	190	120	200

* Примітка: обмеження потоку внаслідок досягнення потоком по ділянці 200–5 значення $0,8P'_{\max 2}$.

Аналіз результатів, наведених у табл. 2.3 та 2.4, показує доцільність зниження значень коефіцієнтів підсилення AVR за напругою відносно прийнятих за [72] значень з метою забезпечення можливості збільшення навантажень МЗ за умови збереження стійкої роботи ЕС у нормальних режимах для AVR САКЗ типів AC1A, AC5A, DC1A (для ТС-I), ST1A та ST2A. Необхідно зазначити, що дослідження стійкості ЕС для ТС-I та ТС-II з нецілими значеннями K_A в рамках дисертаційної роботи не проводилися.

Визначення коефіцієнта підсилення AVR САКЗ за відхиленням напруги, за якого досягається максимальний час тривалості трифазного КЗ, що не призводить до коливного порушення стійкості ЕО, для ТС-I було проведено за таких умов:

- точка КЗ – шини 8а (рис. А.1 додатку А);
- відключення КЗ здійснювалося без відключення ділянки 7–9;
- завантаження МЗ у доаварійному режимі становило близько 574 МВт (потужність кінця), що відповідає $0,8P'_{\max 2}$ згідно з прийнятим вище обмеженням (розрахунок $P'_{\max 2}$ здійснювався за (2.4б)).

Виконання останньої умови призвело до виключення з дослідження АРЗ СД, оскільки із застосуванням САКЗ цього типу для усіх СГ ТС-І досягти завантаження МЗ за активною потужністю в кінці МЗ у 574 МВт з одночасним збереженням стійкої роботи ЕС виявилось неможливим.

Доцільність проведення цього дослідження зі значним доаварійним завантаженням МЗ пояснюється тим, що з підвищенням завантаження МЗ збільшується тривалість ініційованих збуренням НЧК, що підвищує рівень загрози коливного порушення стійкості ЕС (ЕО). Ілюстрацію, що підтверджує цей факт, наведено на рис. 2.16, де показано графіки потоку активної потужності в кінці МЗ ТС-І за умови трифазного КЗ на шинах 8а тривалістю 0,10с (граничний час трифазного КЗ за умови збереження стійкості ЕС у разі завантаження за активною потужністю в кінці МЗ на 574 МВт) та САКЗ з AVR типу DC2A з параметрами згідно з [72] за різного завантаження МЗ. Аналіз рис. 2.16 також дає змогу зробити висновок, що зміна доаварійного завантаження МЗ призводить до зміни частоти НЧК за оберненою залежністю (цей висновок узгоджується з результатами проведених раніше досліджень, наведеними, зокрема, в [89]).

Результати визначення коефіцієнтів підсилення AVR САКЗ за відхиленням напруги (K_A для AVR за [72] або K_U для АРЗ СД за [9]), за яких досягається максимальний час тривалості трифазного КЗ, що не призводить до коливного порушення стійкості ЕО, для ТС-І наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Значення K_A , за яких досягається максимальний час тривалості трифазного КЗ, що не призводить до коливного порушення стійкості ТС-І

Тип САКЗ	AC1A	AC5A	DC1A	DC2A	ST1A	ST2A
Максимальний час тривалості 3-ф. КЗ, $t_{\text{КЗ}}^{\max}, \text{с}$	0,58	0,55	0,52	0,56	0,53	0,39*
K_A (K_U), що забезпечує $t_{\text{КЗ}}^{\max}$	3	$3 \leq K_A \leq 4$	$3 \leq K_A \leq 8$	3	3	1*
K_A за [72] або K_U за [9]	400	400	46	300	190	120

* Примітка: граничний за стійкістю ЕС режим характеризується наявністю незгасаючих коливань з незмінною амплітудою 34 МВт

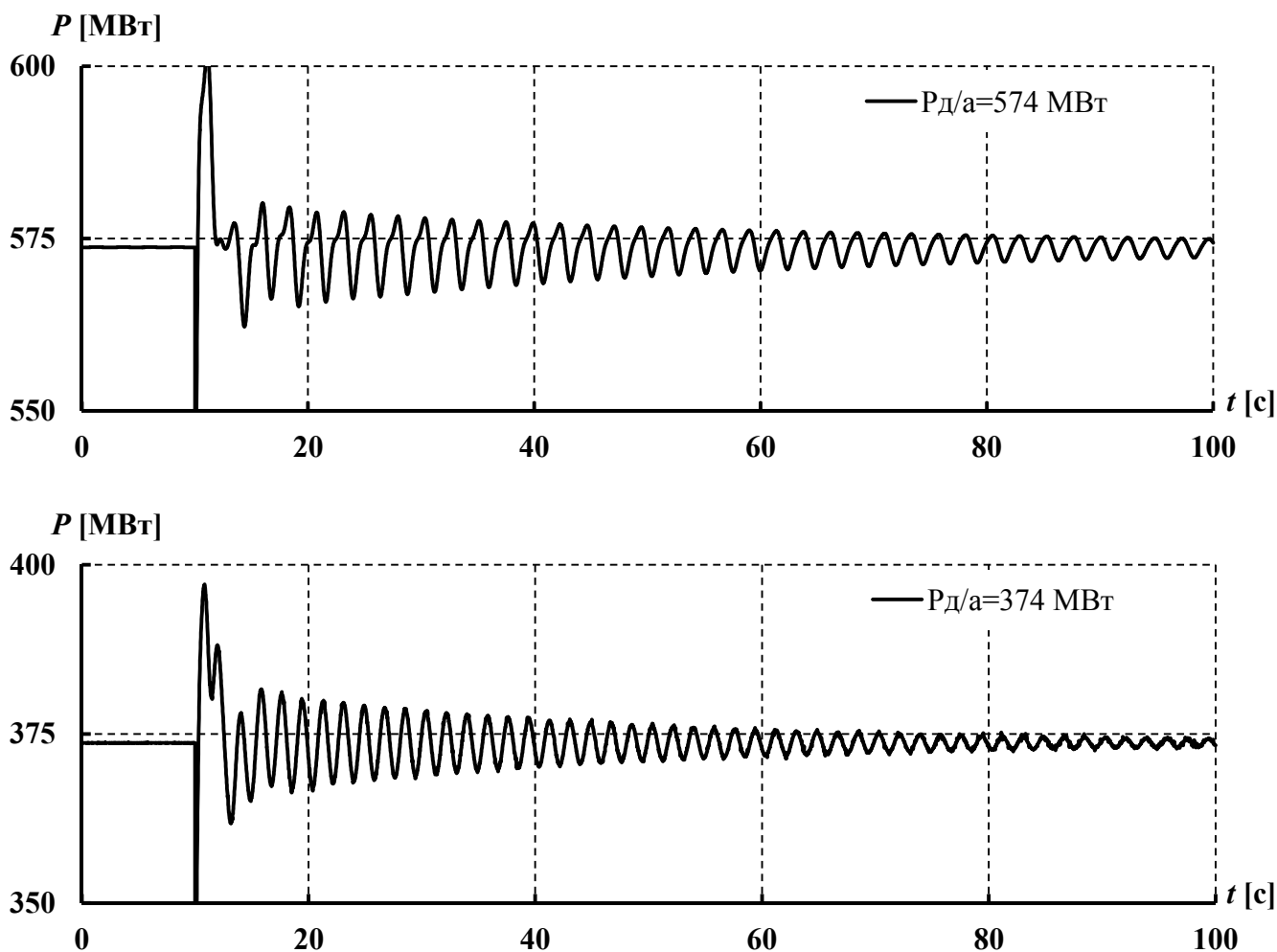


Рисунок 2.16 – Графіки потоків активної потужності в кінці МЗ ТС-I за умови трифазного КЗ на шинях 8а тривалістю 0,10с та застосування для всіх СГ САКЗ з AVR типу DC2A з параметрами згідно з [72] за різного доаварійного завантаження МЗ

Результати, наведені в табл. 2.5, показують доцільність зниження значень коефіцієнтів підсилення AVR САКЗ за відхиленням напруги відносно прийнятих згідно з [72] з метою покращення стійкості ЕС у післяаварійних режимах.

Графік НЧК потоку активної потужності, який відповідає граничному (за умовою недопущення коливного порушення стійкості ЕС) режиму завантаження МЗ у випадку застосування для всіх СГ ТС-I САКЗ з AVR типу DC2A з $K_A=3$, наведено на рис. 2.17. Частота коливань тут становить близько 0,59 Гц.

Порівняння графіків, наведених на рис. 2.16 та 2.17, підтверджує висновок, зроблений за результатами аналізу даних табл. 2.5. Так, зниження значення коефіцієнта підсилення AVR САКЗ за відхиленням напруги K_A з 300 (згідно з [72]) до 3 надало

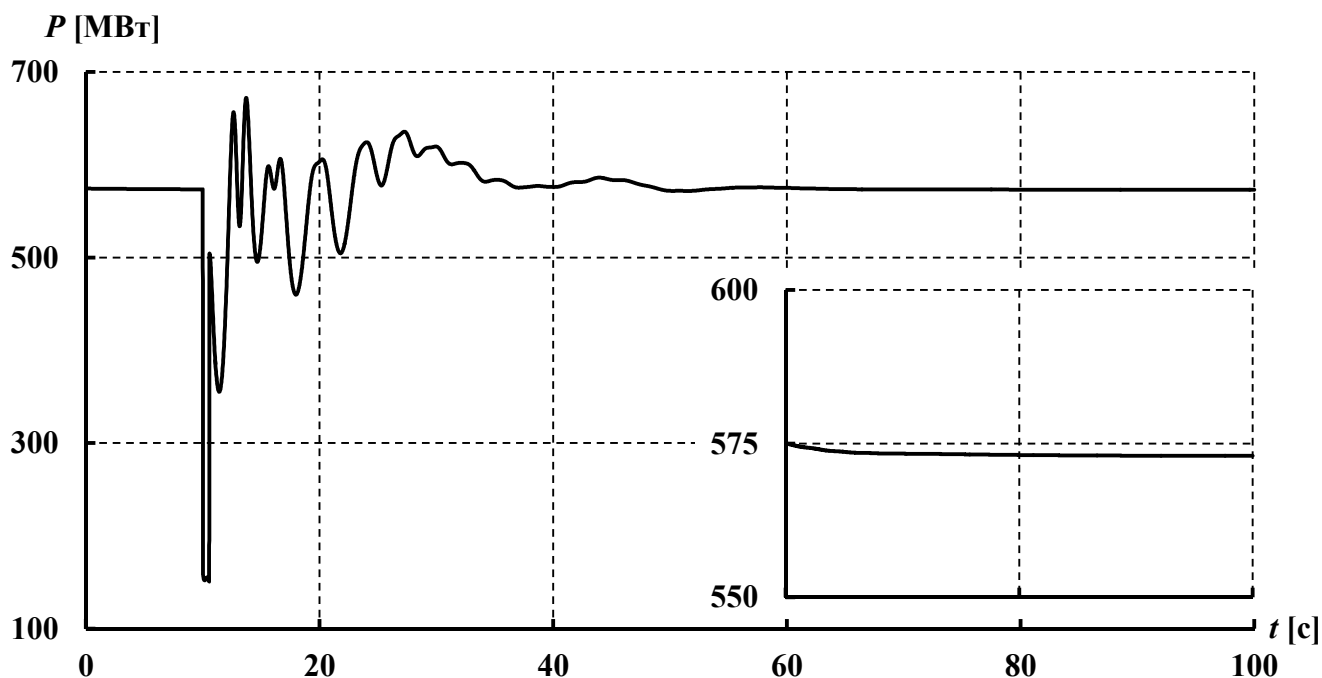


Рисунок 2.17 – Графік потоку активної потужності в кінці МЗ ТС-I за умови трифазного КЗ на шинах 8а тривалістю 0,56с та застосування для всіх СГ САКЗ з AVR типу DC2A з $K_A=3$

змогу збільшити граничний час тривалості трифазного КЗ з 0,10с до 0,56с. Слід відзначити, що отримані за знижених значень K_A значення граничного часу тривалості трифазного КЗ суттєво перевищують опорне значення, яке приймають у проектних розрахунках динамічної стійкості за [23]. Отже, можна констатувати можливість забезпечення певних “запасів” динамічної стійкості шляхом здійснення відповідних налаштувань САКЗ СГ. Крім того, за зниженого значення K_A згасання НЧК, які виникли в МЗ внаслідок зазначеного збурення, було більш швидким.

Отже, САКЗ СМ є дієвим засобом демпфірування НЧК в ЕС(ЕО). При цьому з метою покращення їх можливостей щодо демпфірування НЧК у нормальних та перехідних режимах ЕС (ЕО) доцільним є застосування AVR САКЗ з малими значеннями коефіцієнта підсилення AVR за напругою (K_A). Зазначений висновок призводить до виникнення протиріччя у вимогах до налаштування AVR САКЗ, оскільки для стабілізації напруги на шинах СМ відповідно до заданого значення уставки необхідним є застосування швидкодіючих САКЗ з великими значеннями коефіцієнтів підсилення за відхиленням напруги статора, що, в свою чергу, знижує гранично

допустимі (за умовою недопущення коливного порушення стійкості ЕС(ЕО)) значення потоків активної потужності по МЗ у нормальних та післяаварійних режимах.

Зазвичай під час налаштування САКЗ проблеми ЕС, пов'язані з виникненням коливань окремих груп СМ, залишаються “поза увагою” [7]. Причиною цього є застосування з метою налаштування САКЗ СМ, переважно, моделі одночастотного руху “СМ – шини нескінченної потужності”, в якій ЕС подають шинами нескінченної потужності. За таких умов перевірка функціонування САКЗ конкретних СМ у складі відповідної моделі ЕС не завжди спроможна виявити небажані “системні” ефекти (зокрема, виникнення коливань між певними групами СМ), спричинені великими значеннями коефіцієнтів K_A AVR, і, відповідно, не надає “протипоказань” для їх застосування. Ця обставина (зокрема, в обтяжених та післяаварійних режимах ЕС (ЕО)) сприяє збільшенню ймовірності виникнення незгасаючих НЧК, демпфірування яких із застосуванням лише наявних в експлуатації САКЗ СМ виявляється малоефективним через неможливість зміни в режимі online параметрів налаштувань САКЗ, насамперед, зменшення значень коефіцієнтів K_A в AVR (рис. В.1 – В.6 додатку В) та K_U в АРЗ СД (рис. Б.4 додатку Б).

2.3 Дослідження ефективності PSS в аспекті демпфірування НЧК

Системні стабілізатори широко застосовують в ЕС (ЕО) з метою покращення демпфірування НЧК роторів СГ. Стандарт [72] рекомендує до застосування 4 типи PSS:

- PSS1A – стабілізатор з одним вхідним сигналом, яким можуть бути кутова швидкість ротора СМ ω , частота f або електрична потужність СМ P_e (найбільш розповсюджений тип PSS);
- PSS2B – стабілізатор з двома вхідними сигналами, якими є електрична потужність СМ P_e та кутова швидкість ротора СМ ω або частота f (виробники – “ABB”, “ALSTOM”, “Eaton” (США), “General Electric”);
- PSS3B – стабілізатор із двома вхідними сигналами, якими є електрична потужність СМ P_e та відхилення кутової швидкості ротора СМ $\Delta\omega$ (виробники – “Siemens”, “ABB”);
- PSS4B – багатодіапазонний стабілізатор з низкою вхідних сигналів, якими є відхилення кутової швидкості ротора СМ $\Delta\omega$ (виробник – “ABB”).

Реалізовані в середовищі “Matlab” структурні схеми PSS типів PSS1A, PSS3B і PSS4B (за спрощеною моделлю) та пропонувані стандартом [72] значення параметрів цих PSS наведено в додатку Г. Системний стабілізатор типу PSS2B до досліджень не залучався, оскільки в [81] було виконано безпосереднє порівняння PSS2B та PSS4B і показано вищу ефективність останнього з огляду на демпфірування за їх допомогою НЧК. Необхідно зазначити, що “набори” параметрів для налаштування PSS наведено в [72] лише як зразок і вони не є єдиним можливим варіантом налаштувань, проте зазначені “набори” параметрів є узгодженими (збалансованими) та їх може бути задіяно на практиці, тому в подальших дослідженнях було використано саме ці “набори”.

Зазначені вище типи PSS відрізняються складом сигналів, але загальні принципи функціонування PSS різних типів є однаковими [7].

Синхронний генератор, що працює паралельно з ЕС, являє собою коливну структуру. Електричну потужність СМ P_e створюють обертові магнітні поля ротора і статора, зміщені на кут ротора δ_{SM} , а потужність, передану навантаженню, визначають за фазовим кутом δ_S між напругою генератора і напругою ЕС (рис. 2.18а).

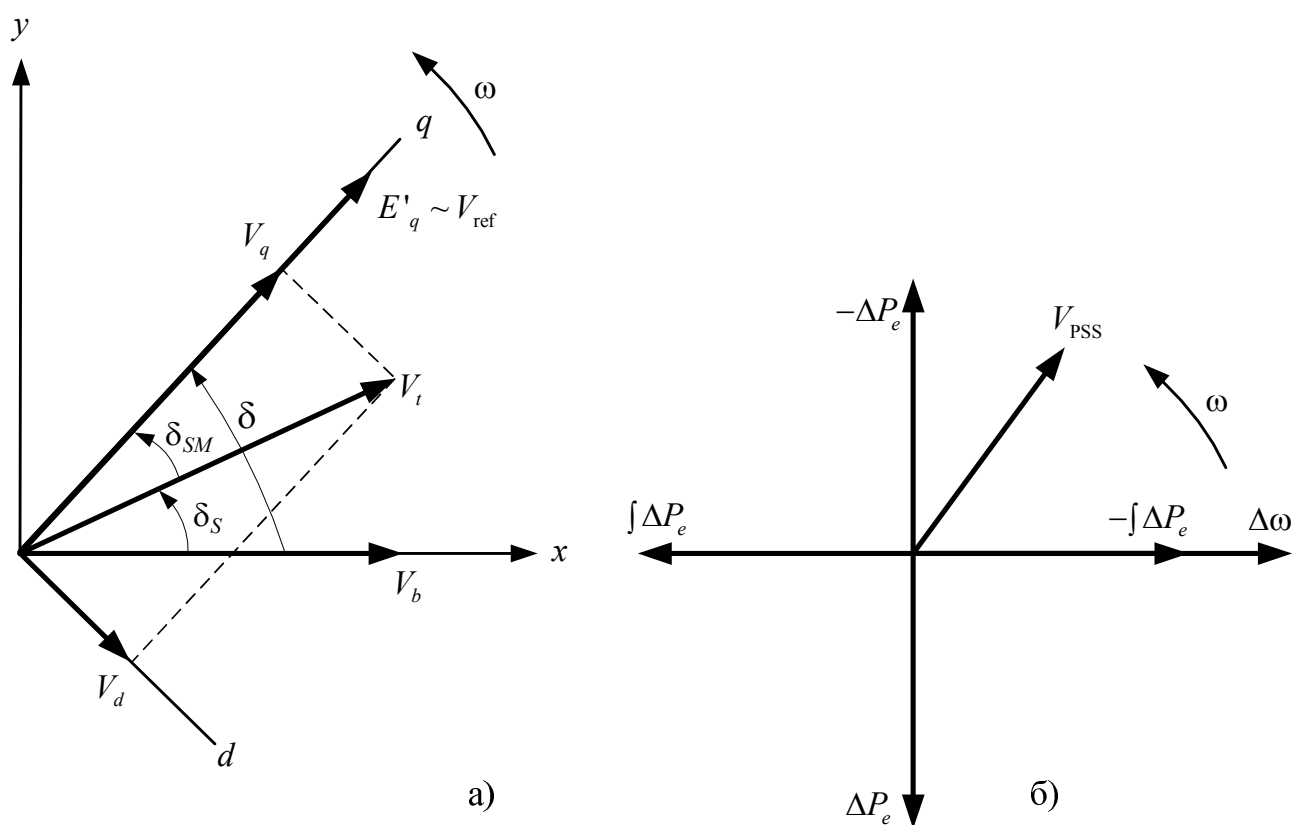


Рисунок 2.18. Векторні діаграми: а – СГ; б – PSS

Повний кут ротора СГ δ утворює сума внутрішнього δ_{SM} та зовнішнього δ_S кутів:

$$\delta = \delta_{SM} + \delta_S.$$

Демпфірування електромеханічних коливань досягають під час зміни електричної потужності СМ P_e у фазі зі зміною δ або δ_{SM} . Завданням PSS є створення додаткової складової електричної потужності ΔP_e , яка змінюється за фазою разом зі зміною кута δ (δ_{SM}), регулюючи при цьому напругу збудження V_f . З метою компенсації інерційності САКЗ (включаючи збудник і обмотку збудження СМ) зміна сигналу на виході PSS ΔV_{PSS} має випереджати зміну кута ротора δ (δ_{SM}) і, відповідно, зміну частоти обертання $\Delta\omega$ на певний кут. Як видно з векторної діаграми сигналів PSS (рис. 2.18б), приріст ΔP_e відстає від приросту $\Delta\omega$ на 90 ел. град. З метою компенсації цього фазового зсуву в PSS сигнал ΔP_e спочатку інтегрують, надаючи йому додаткове відставання за фазою на 90 ел. град., а потім інтегрований сигнал $\int P_e$ інвертують, що призводить до його збігу за фазою з сигналом зміни кутової швидкості $\Delta\omega$. Далі отриманий сигнал $\int P_e$ обробляють за допомогою пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора так, щоб вихідний сигнал PSS V_{PSS} випереджав за фазою сигнал $\Delta\omega$ на заданий кут, компенсуючи при цьому інерційність збудника і ротора СМ. Узагальнену структурну схему основних елементів PSS показано на рис. 2.19.

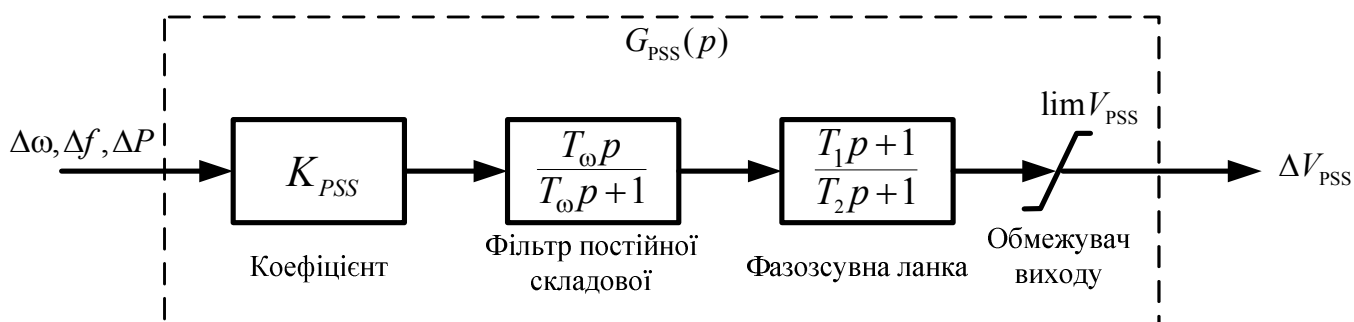


Рисунок 2.19. Узагальнена структурна схема основних елементів PSS

Системний стабілізатор має формувати сигнал, який компенсує коливання потужності або кута ротора СМ у фазі з їх зміною, тому в його структурі застосовують фільтр

постійної складової зі сталою часу T_{ω} , значно більшою за період коливань кута (швидкості) ротора СМ в усталеному режимі. Стала часу T_{ω} дає змогу PSS реагувати виключно на коливання кута (швидкості або частоти обертання) ротора або потужності СМ у разі порушення усталеного режиму, не впливаючи на поведінку САКЗ у разі усталеного експлуатаційного режиму. Фазозсувна ланка дає змогу задати необхідне випередження фази для компенсації фазового запізнення між виходом збудника ЕРС E'_q і електричним моментом T_e (або електричною потужністю P_e) СМ. Коефіцієнт K_{PSS} налаштовують для досягнення необхідного демпфірування мод незгасаючих НЧК або мод НЧК з малими додатними значеннями показників демпфірування. Сталі часу T_{ω} і T_2 визначають на етапі проектування PSS, інші параметри – під час налаштування.

Отже, суттєвими перевагами застосування PSS є можливість компенсації фазового запізнення між виходом збудника ЕРС E'_q і електричним моментом СМ та можливість забезпечення його селективності з метою “придушення” певних небезпечних мод НЧК. Зазначені функціональні особливості PSS визначають високу ефективність демпфірування НЧК за допомогою САКЗ СМ, які містять PSS.

Дослідження впливу PSS, наявного в структурі САКЗ СМ, на процеси демпфірування НЧК було здійснено для PSS типів PSS1A, PSS3B та PSS4B на основі ТС-I та ТС-II. Під час досліджень впливу САКЗ, які містять у своїй структурі PSS типу PSS1A із AVR типів DC1A, DC2A та ST1A було застосовано “стандартні” (згідно з [72]) налаштування PSS. З причини відсутності в [72] рекомендацій щодо налаштувань PSS типу PSS1A для роботи в структурі САКЗ з AVR типів AC1A і AC5A дослідження із зазначеними комбінаціями PSS та AVR не проводилися (слід зазначити, що застосування в цих випадках налаштувань PSS1A, пропонувані для AVR інших типів вкрай негативно позначилося на ефективності роботи PSS), а під час досліджень роботи PSS типу PSS1A в структурі САКЗ з AVR типу ST2A було застосовано налаштування PSS1A для AVR типу ST1A.

Ефективність PSS обраних типів було перевірено за допомогою таких досліджень:

– визначення граничного потоку активної потужності по МЗ за умови застосування для AVR та PSS усіх САКЗ СМ параметрів згідно з [72] (типові схеми AVR та PSS, а також значення їх параметрів наведено в додатках В та Г);

– визначення максимального часу тривалості трифазного КЗ, що не призводить до коливного порушення стійкості ЕС, за умови застосування для AVR та PSS всіх САКЗ СМ параметрів згідно з [72].

Зазначені дослідження було проведено шляхом імітаційного моделювання в середовищі “Matlab” із застосуванням відповідних моделей ТС-I та ТС-II (структурні схеми моделей ТС-I та ТС-II у середовищі “Matlab” наведено на рис. А.2 додатку А та на рис. Б.2 додатку Б відповідно) за таких умов:

- граничні значення потоку потужності по МЗ та тривалості трифазного КЗ відповідали режиму, який перебував на межі коливного порушення стійкості ЕС;
- навантаження електроспоживання змодельовано постійними значеннями активних та реактивних потужностей;
- зміна потоку потужності по МЗ, які поєднують дві частини ЕС, здійснювалася шляхом зміни активної потужності навантаження або (у разі необхідності) шляхом перерозподілу навантажень між СГ ЕС з метою недопущення переобтяження СГ за робочим струмом статора та забезпечення резерву активної потужності на СГ, які виконують роль балансуючих пунктів (БП) (G_2 для ТС-I та СГ 101 для ТС-II);
- типи використаних для PSS вхідних сигналів відповідали рекомендованим [72] типам сигналів: для PSS1A – швидкість обертання ротора СМ ω або відхилення швидкості обертання ротора СМ $\Delta\omega$, для PSS3B – електрична потужність СГ P_e та відхилення швидкості обертання ротора СМ $\Delta\omega$, для PSS4B – відхилення швидкості обертання ротора СМ $\Delta\omega$.

Результати досліджень з визначення граничного потоку активної потужності $P_{гр}$ за МЗ 7–9 для ТС-I наведено в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Граничні (за умовою недопущення коливного порушення стійкості ЕС) потоки активної потужності МЗ у ТС-I з параметрами AVR та PSS усіх САКЗ СГ згідно з [72]

Тип PSS	$P_{гр}$ (у кінці МЗ), МВт, у випадку САКЗ з AVR типу					
	AC1A	AC5A	DC1A	DC2A	ST1A	ST2A
Без PSS	0	528*	396	>574*	0	0
PSS1A	не дослідж.	не дослідж.	85	>574*	>574*	>574*
PSS3B	509*	534*	>574*	>574*	569*	540
PSS4B	>574*	514*	>574*	>574*	>574*	>574*

* Примітка: перерозподіл навантаження між СГ відносно вихідного розподілу (табл. А.4 додатку А) з метою недопущення переобтяження СГ за робочим струмом статора та забезпечення резерву активної потужності на СГ–БП

За аналогією з наведеними в [23] вимогами до мінімального коефіцієнта запасу за активною потужністю МЗ у нормальному режимі роботи ЕС, під час проведення досліджень завантаження МЗ 7–9 було обмежено $0,8P'_{\max 2}$ (розрахунок $P'_{\max 2}$ здійснювався за (2.4б)). Знак “>” перед значенням $P_{\text{гр}}$ у табл. 2.6 означає, що граничний потік потужності по МЗ 7–9 перевищив прийняте обмеження в $0,8P'_{\max 2}$.

Аналіз результатів табл. 2.6 та порівняння їх з даними табл. 2.1 призводить до висновку, що застосування PSS у складі САКЗ у більшості випадків надає змогу збільшити граничне значення потоку активної потужності по МЗ шляхом “відсунення” межі, перевищення якої призводить до виникнення незгасаючих НЧК які з часом призводять до втрати стійкості ЕС. Втім, зазначений позитивний вплив застосування PSS спостерігався не в усіх випадках. Так, наприклад, застосування для всіх СГ ТС-I САКЗ, які містять у своїй структурі PSS типу PSS1A і AVR типу DC1A або PSS типу PSS4B і AVR типу AC5A призвело до зниження значення $P_{\text{гр}}$ для МЗ ТС-I у порівнянні з результатами, отриманими внаслідок проведення аналогічних досліджень за відсутності PSS.

Слід зазначити, що наявність PSS у структурі САКЗ СМ не завжди надає змогу уникати виникнення НЧК у нормальних (за відсутності збурень) режимах роботи ЕС (ЕО). Так, наприклад, граничний (за умовою недопущення коливного порушення стійкості ЕС) режим роботи ЕС у випадку застосування для всіх СГ ТС-I САКЗ з AVR типу AC5A та PSS типу PSS4B супроводжувався наявністю незгасаючих НЧК з частотою близько 0,40 Гц та незмінною амплітудою близько 110 МВт. Графік потоку активної потужності в кінці МЗ ТС-I для цього режиму роботи ЕС наведено на рис. 2.20.

Причиною подібних ситуацій, пов’язаних з низькою ефективністю PSS, є, зокрема, “стандартні” (згідно з [72]) налаштування PSS, які не враховують фактичних значень режимних параметрів в ЕС (ЕО) і не дають змоги забезпечити ефективну роботу PSS в усьому спектрі нормальних та післяаварійних режимів. Цілком очевидно, що з метою забезпечення більш “гнучкої” (у розглянутому контексті) роботи PSS слід застосовувати PSS з адаптованими (з урахуванням фактичних показників режиму, отриманими в режимі реального часу) параметрами.

Результати досліджень з визначення граничного потоку активної потужності $P_{\text{гр}}$ для МЗ 200–5 та 202–100 ТС-II, наведено в табл. 2.7.

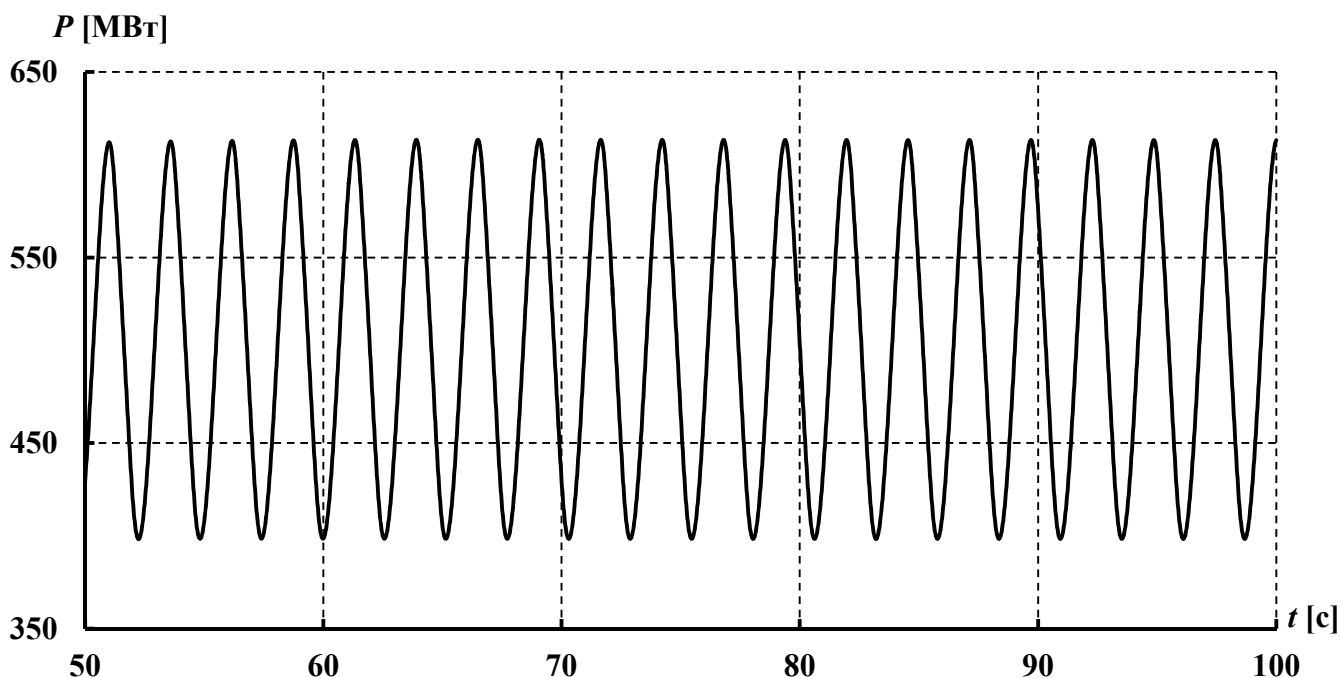


Рисунок 2.20 – Графік активної потужності в кінці МЗ ТС-I за умови застосування для всіх СГ САКЗ з AVR типу AC5A та PSS типу PSS4B з параметрами згідно з [72]

Таблиця 2.7 – Граничні (за умовою недопущення коливного порушення стійкості ЕС) потоки активної потужності МЗ у ТС-II з параметрами AVR та PSS усіх САКЗ СГ згідно з [72]

Тип PSS	$P_{гр}$ (у кінці МЗ), МВт, у випадку САКЗ з AVR типу											
	AC1A		AC5A		DC1A		DC2A		ST1A		ST2A	
	200-5	202-100	200-5	202-100	200-5	202-100	200-5	202-100	200-5	202-100	200-5	202-100
Без PSS	864	606	954	722	>1033	821*	>1033	821*	888	638	882	630
PSS1A	не дослідж.		не дослідж.		>1033	821*	>1033	821*	>1033	821*	>1033	821*
PSS3B	1026	811	983	758	>1033	821*	>1033	821*	835	720	801	686
PSS4B	990	767	904	658	>1033	821*	>1033	821*	1026	811	1018	801

* Примітка: обмеження потоку внаслідок досягнення потоком по ділянці 200–5 значення $0,8P'_{max 2}$.

У зазначеному дослідженні допустимий потік активної потужності по МЗ було обмежено $0,8P'_{max 2}$ (розрахунок $P'_{max 2}$ здійснювався за (2.4б)). Знак “>” перед значенням $P_{гр}$ у табл. 2.7 означає, що граничний потік потужності по МЗ перевищив прийняте обмеження в $0,8P'_{max 2}$.

Аналіз результатів табл. 2.7 підтверджує зроблені раніше висновки щодо позитивного (хоча і різного для різних типів PSS) впливу PSS на ЕС (ЕО) з огляду на можливість збільшення потоків активної потужності по МЗ та запобігання виникненню

стійких НЧК у нормальних режимах роботи. Так, наприклад, застосування для всіх СМ ТС-II САКЗ з PSS типу PSS1A та з AVR типів ST1A і ST2A надало змогу збільшити потік активної потужності по МЗ 5–200 до максимально допустимого (з урахуванням прийнятого в дослідженні обмеження) значення 1033 МВт. Втім, за умови застосування для всіх СМ ТС-II САКЗ з PSS цього типу та з AVR інших типів такого потоку активної потужності по МЗ 5–200 досягти не вдалося. У таких випадках у граничному режимі в МЗ виникали слабкозгасаючі НЧК активної потужності різної амплітуди. Графік слабкозгасаючих низькоамплітудних НЧК потоку активної потужності в МЗ 200–5 з частотою близько 0,75 Гц у випадку застосування для всіх СМ ТС-II САКЗ з AVR типу AC1A та PSS типу PSS4B наведено на рис. 2.21.

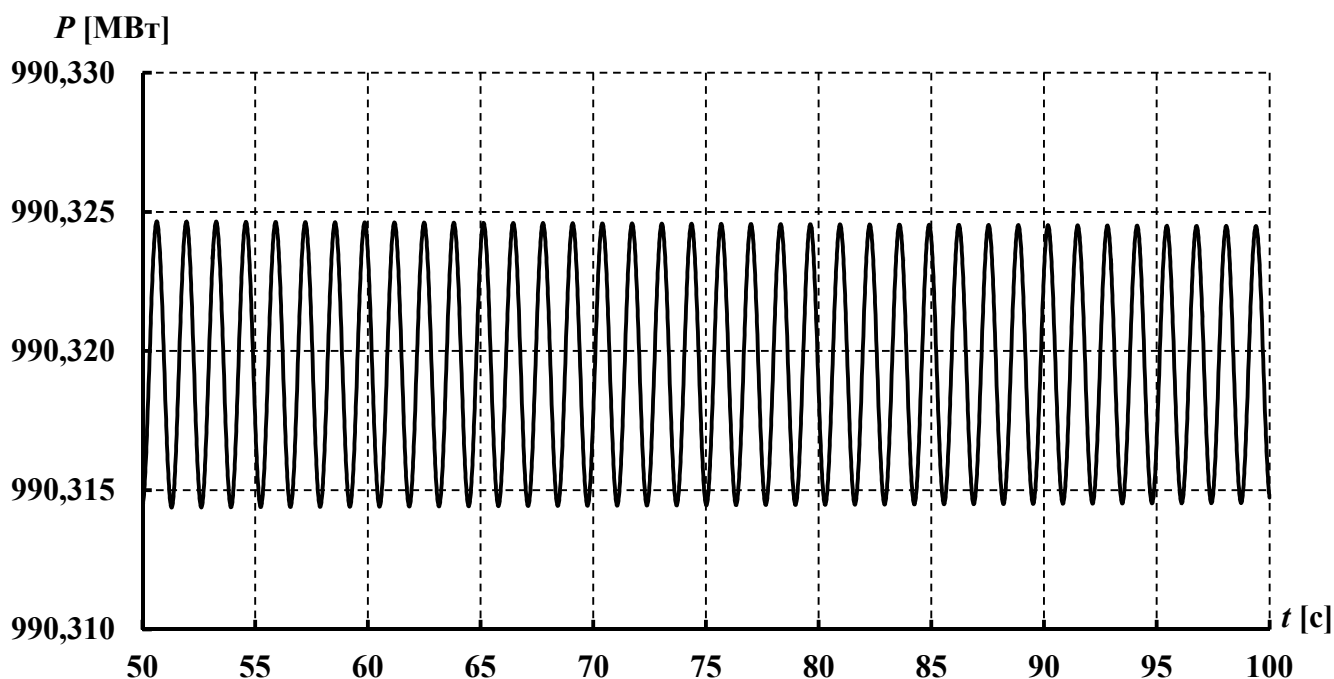


Рисунок 2.21 – Графік потоку активної потужності в кінці МЗ 200–5 ТС-II за умови застосування для усіх СМ САКЗ з AVR типу AC1A і PSS типу PSS4B з параметрами згідно з [72]

Аналогічно ТС-I, тут причиною невисокої ефективності PSS (з огляду на демпфірування з їх допомогою НЧК) стали “стандартні” (згідно з [72]) налаштування PSS. Необхідно зазначити, що можливим способом підвищення ефективності роботи PSS в обох ТС є зміна параметрів зазначених PSS з метою їх налаштування на

“проблемний” діапазон частоти, який відповідає фактичній частоті НЧК. Втім, раніше було показано, що частота НЧК може дещо змінюватися зі зміною завантаження МЗ, тому забезпечити високу ефективність PSS в усьому діапазоні нормальних режимів ЕС (ЕО) за такого підходу неможливо.

Аналіз результатів табл. 2.6 та табл. 2.7 показав, що ефективність (з огляду на забезпечення демпфірування НЧК) PSS одного типу в нормальних режимах роботи ЕС (ЕО) може суттєво відрізнятися залежно від типу AVR, застосованого в структурі САКЗ СМ, схемних особливостей ЕС (ЕО) тощо. Така ситуація ускладнює вибір типів PSS, застосування яких в ЕС (ЕО) має запобігти коливному порушенню стійкості ЕС (ЕО), спричиненому виникненням та “розвитком” НЧК.

На основі ТС–І для комбінацій типів AVR та PSS, які в нормальному режимі роботи забезпечили в кінці МЗ 7–9 потік активної потужності, більший за $0,8P'_{\max 2}$ (розрахунок $P'_{\max 2}$ здійснювався за (2.4б)), було проведено дослідження можливості передачі максимальної активної потужності по МЗ 7–9 за умови недопущення коливного порушення стійкості ЕС. Максимальне значення потоку активної потужності в кінці МЗ тут становило 626 МВт, що відповідає межі збіжності ітераційного процесу розрахунку поточкорозподілу схеми в середовищі “Matlab” за обмеження розрахунку 50 ітераціями (точність розрахунку за небалансом активних та реактивних потужностей у вузлах схеми становила 0,01 МВт та 0,01 МВ Ар відповідно). В цьому випадку з метою підвищення завантаження МЗ активною потужністю було підвищено активну потужність навантаження в ЕС–ІІ, а з метою недопущення переобтяження СГ робочим струмом статора активне навантаження в ЕС–І було знижено на 167 МВт відносно вихідного (табл. А.5 додатку А). Результати дослідження показали, що для всіх комбінацій AVR та PSS, які в нормальному режимі роботи (табл. 2.6) забезпечили в кінці МЗ 7–9 потік активної потужності, більший за 574 МВт ($0,8P'_{\max 2}$), було досягнуто обумовленого межами збіжності ітераційного процесу значення потоку активної потужності 626 МВт. Зазначений факт підтверджує доцільність застосування PSS у складі САКЗ з метою запобігання коливному порушенню стійкості ЕС (ЕО) внаслідок виникнення НЧК, спричинених збільшенням потоку активної потужності по МЗ. Слід підкреслити, що досягнуте із застосуванням PSS

значення максимального потоку активної потужності в кінці МЗ 7–9 склало 93,8% від значення граничної потужності передачі МЗ 7–9, розрахованої за (2.4б).

Визначення граничного часу тривалості трифазного КЗ, що не призводить до коливного порушення стійкості ЕС, для ТС-I було проведено за таких умов:

- точка КЗ – шини 8а (рис. А.1 додатку А);
- відключення КЗ здійснювалося без відключення МЗ 7–9;
- завантаження МЗ у доаварійному режимі становило близько 574 МВт (потужність кінця), що відповідає $0,8P'_{\max 2}$ згідно з прийнятим раніше обмеженням (розрахунок $P'_{\max 2}$ здійснювався за (2.4б)).

Виконання останньої умови призвело до виключення з дослідження певних комбінацій AVR та PSS, які не забезпечували виконання цієї умови в нормальному режимі роботи ТС-I (табл. 2.6). Результати проведеного дослідження наведено в табл. 2.8.

Таблиця 2.8 – Гранична (за умовою недопущення порушення коливної стійкості ЕС) тривалість трифазного КЗ, з параметрами AVR та PSS усіх САКЗ СГ згідно з [72]

Тип PSS	Гранична тривалість трифазного КЗ, с, у випадку САКЗ з AVR типу					
	AC1A	AC5A	DC1A	DC2A	ST1A	ST2A
Без PSS	не дослідж.	не дослідж.	не дослідж.	0,10	не дослідж.	не дослідж.
PSS1A	не дослідж.	не дослідж.	не дослідж.	0,56	0,49	0,25
PSS3B	не дослідж.	не дослідж.	0,41	0,43	не дослідж.	не дослідж.
PSS4B	0,27	не дослідж.	0,15	0,12	0,56	0,18

Аналіз результатів табл. 2.8 дав змогу зробити висновок, що застосування PSS у структурі САКЗ СМ для режиму ТС-I, для якого потік активної потужності в кінці МЗ 7–9 становив $0,8P'_{\max 2}$ (розрахунок $P'_{\max 2}$ здійснювався за (2.4б)), збільшило граничний час тривалості трифазного КЗ, за якого ще зберігається стійкість ЕО (у більшості випадків зазначений граничний час суттєво перевищив тривалість КЗ, яку приймають у проектних розрахунках під час аналізу динамічної стійкості ЕС (ЕО)). Отже, можна стверджувати, що застосування PSS у структурі САКЗ СМ дає можливість створювати в робочих режимах ЕС (ЕО) певні запаси за динамічною стійкістю.

Характерним наслідком КЗ у ТС-I є виникнення НЧК, тривалість яких залежить, крім іншого, від типу PSS, застосованих у структурі САКЗ СГ. На рис. 2.22 наведено графік

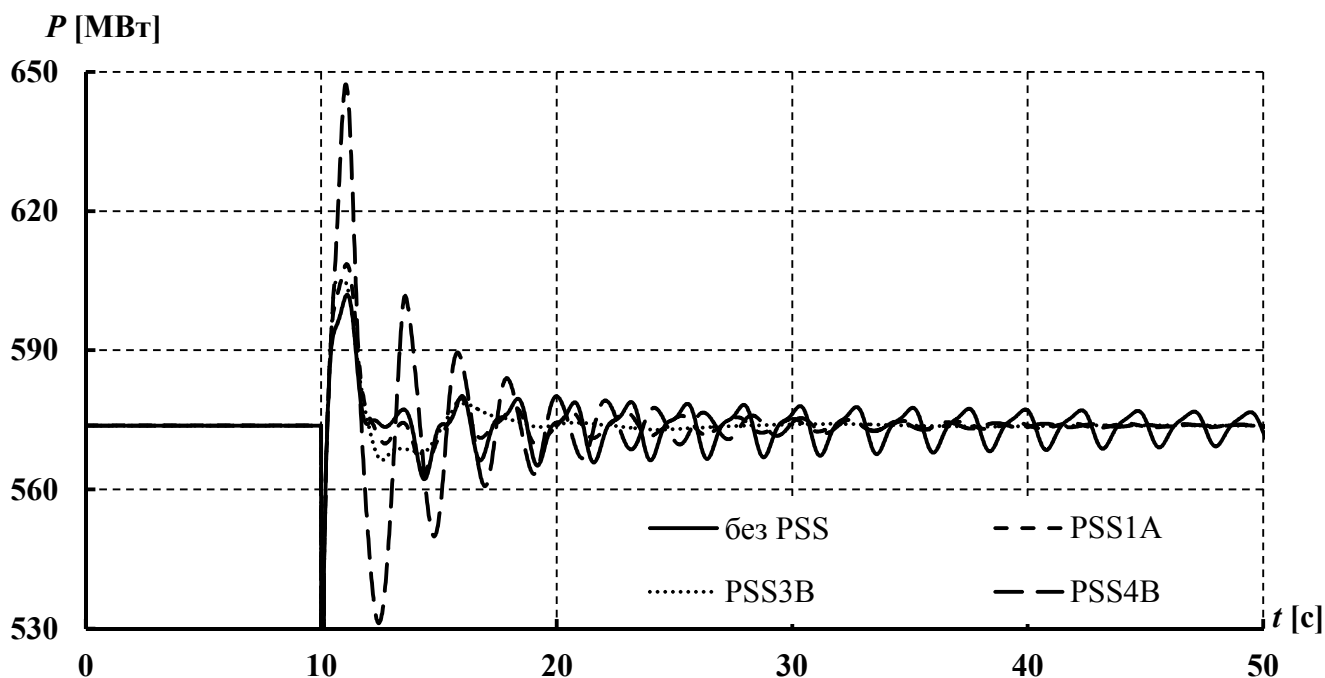


Рисунок 2.22 – Графік потоку активної потужності в кінці МЗ 7–9 ТС-I за умови трифазного КЗ тривалістю 0,10с у випадку застосування для всіх СГ САКЗ з AVR типу DC2A і PSS різних типів з параметрами згідно з [72]

процесу демпфірування НЧК, спричинених КЗ тривалістю 0,10с на шинах 8а ТС-I (рис. А.1 додатку А), у випадку застосування для всіх СГ САКЗ з AVR типу DC2A для різних типів PSS. Аналіз графіків на рис. 2.22 привів до висновку, що хоча усі типи PSS сприяють демпфіруванню НЧК, але неадаптовані до умов певної ЕС (ЕО) “стандартні” налаштування PSS можуть призвести, зокрема, до збільшення амплітуди НЧК у перші моменти після виникнення збурення.

На підставі аналізу даних табл. 2.6–2.8 було зроблено висновок щодо наявності впливу на ефективність PSS (з огляду на забезпечення за їх допомогою демпфірування НЧК) типів AVR у структурі САКЗ СМ та схемних особливостей ЕС (ЕО). Широка різноманітність типів AVR у САКЗ паралельно працюючих СМ та схем електричних з’єднань реальних ЕС (ЕО) практично унеможлиблює вибір ефективного “універсального” типу PSS, який забезпечить надійне демпфірування НЧК в усьому спектрі робочих режимів ЕС (ЕО). Окремою проблемою в цьому контексті є відсутність оптимальних параметрів налаштувань типових PSS, які б забезпечували найвищу ефективність

PSS з огляду на забезпечення за їх допомогою демпфірування НЧК (зокрема, в стандарті [72] підкреслено, що наведені в ньому “набори” параметрів для налаштування PSS не є ані типовими, ані оптимальними). З урахуванням різної ефективності PSS певного типу в нормальних та перехідних режимах (наприклад, PSS типу PSS4B показав найкращу ефективність у нормальному режимі, але значно гіршу (у деяких випадках) ефективність у післяаварійному режимі) ефективна (з огляду на забезпечення демпфірування НЧК) робота PSS в усіх режимах ЕС (ЕО) з єдиним “набором” параметрів є неможливою.

2.4 Інтегрована система демпфірування НЧК та модельно-розрахункові дослідження ефективності демпфірування НЧК в ЕО з її використанням

Як було показано, застосування сучасних засобів демпфірування НЧК (зокрема, PSS у складі САКЗ СМ) не вирішує повністю проблему виникнення стійких НЧК в ЕС (ЕО) в нормальних та післяаварійних режимах роботи. Зазначені стійкі НЧК можуть мати різну амплітуду і швидкість її зміни з плином часу, що, зокрема, висуває відповідні вимоги до швидкодії засобів демпфірування в контексті оцінювання рівня загрози порушення стійкості ЕС (ЕО) та вживання оперативним персоналом необхідних заходів, спрямованих на припинення (“придушення”) НЧК.

В аспекті загрози порушення стійкості ЕС (ЕО) усі випадки виникнення НЧК можна звести до трьох характерних:

- згасаючі НЧК – наявні технічні засоби забезпечують демпфірування коливань. За умови дуже повільного зменшення амплітуди НЧК (наприклад, рис. 2.22, суцільна крива лінія) оперативний персонал може вжити додаткові заходи з метою пришвидшення демпфірування НЧК (наприклад, прийняти рішення про перерозподіл навантаження між СГ ЕС з метою розвантаження “проблемного” МЗ);

- незгасаючі НЧК з незмінною амплітудою – потребують втручання оперативного персоналу або швидкого переналаштування наявних автоматичних засобів демпфірування, оскільки поточні налаштування цих засобів не здатні забезпечити демпфірування коливань;

- незгасаючі НЧК з амплітудою, що зростає з плином часу – потребують втручання оперативного персоналу або швидкого переналаштування наявних автоматичних засобів демпфірування, оскільки поточні налаштування таких засобів не забезпечують

демпфірування коливань. У разі високої швидкості зростання амплітуди НЧК оперативному персоналу бракуватиме часу на оцінювання рівня загрози НЧК у контексті стійкості ЕС (ЕО) та вживання необхідних заходів, спрямованих на недопущення її порушення.

З метою забезпечення вчасної реакції оперативного персоналу на виникнення НЧК та прийняття вірного рішення щодо необхідних для демпфірування НЧК заходів необхідною є така оперативна інформація:

1) дані щодо наявності коливань режимних параметрів у певній частині (“точці”) ЕС (ЕО);

2) дані щодо частоти коливань режимних параметрів, необхідні для визначення причин виникнення НЧК (виявлення окремих СГ або груп СГ, які “сприяють” існуванню слабкозгасаючих або незгасаючих локальних, внутрішньосистемних або міжсистемних НЧК) та відповідного вибору способів та засобів, які забезпечать надійне демпфірування НЧК.

Забезпечення вчасної реакції автоматичних засобів демпфірування на виникнення в ЕС (ЕО) НЧК здійснюється, зазвичай, на апаратному рівні шляхом застосування швидкодіючих засобів, створених на основі мікропроцесорів. Такі засоби може бути заздалегідь налаштовано на “проблемний” діапазон частот, в якому виникають НЧК. Виникнення незгасаючих НЧК в ЕС (ЕО) в цьому випадку вказує на неоптимальність поточних налаштувань засобів демпфірування та вимагає їх швидкого переналаштування на новий “проблемний” діапазон частот для забезпечення можливості ефективного демпфірування НЧК (можливість такого переналаштування забезпечують, зокрема, PSS моделей PSS-100 виробництва “Basler Electric” (США) та адаптивний PSS (APSS), який входить до складу САКЗ серій UNITROL[®] 5000 та UNITROL[®] 6000 виробництва “ABB” [125, 156, 157]. З метою забезпечення такого переналаштування необхідна певна інформація щодо режимних параметрів у “точці” ЕС (ЕО), де розташовано зазначений засіб демпфірування, – зокрема, щодо частоти НЧК.

Отже, важливим чинником забезпечення надійного демпфірування НЧК як за допомогою автоматичних засобів, так і діями оперативного персоналу, є наявність актуальної інформації щодо існування НЧК у певній “точці” ЕС (ЕО) та щодо параметрів мод таких НЧК. Очевидно, виконання вимоги щодо оперативності отримання такої інформації робить необхідним застосування автоматичних засобів

збору інформації, які можуть у режимі реального часу надавати зазначену інформацію засобам автоматичного керування параметрами режиму ЕС (ЕО) та оперативному персоналу. У свою чергу, виконання вимоги щодо забезпечення швидкого переналаштування автоматичних засобів демпфірування НЧК потребує застосування автоматичної системи визначення оптимальних параметрів налаштування.

Обидві зазначені вимоги може бути виконано завдяки створенню ІСД НЧК, здатної в режимі реального часу на підставі результатів аналізу параметрів режиму ЕС (ЕО) виявити існування небезпечних складових НЧК, визначити їх основні параметри (частоту, амплітуду, показник демпфірування) та сформувати необхідні керівні впливи для забезпечення їх ефективного демпфірування.

Загальну структуру ІСД НЧК наведено на рис. 2.24 [3, 8].

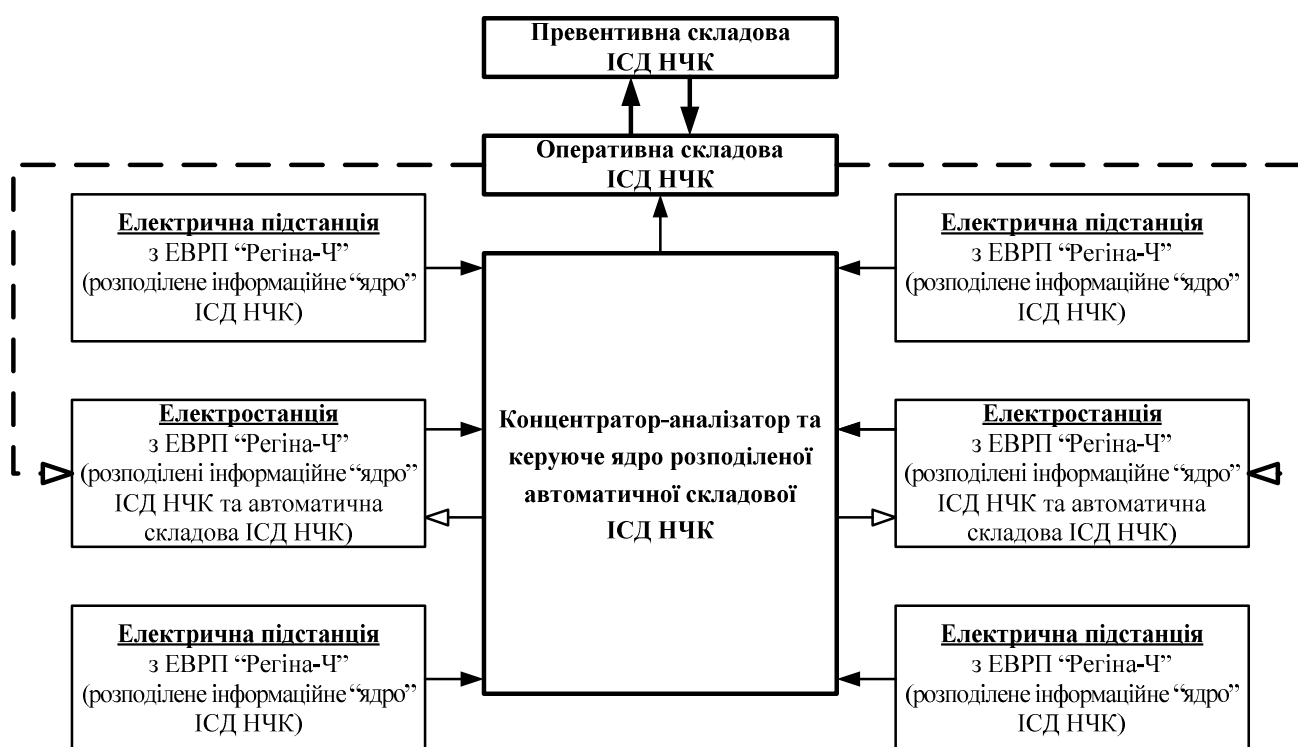


Рисунок 2.23 – Загальна структура ІСД НЧК

На рис. 2.23 суцільними “залитими” стрілками показано напрями передачі інформації щодо визначених параметрів домінантних мод НЧК (виняток становить стрілка від превентивної до оперативної складової, якою позначено надходження інструктивних

матеріалів щодо дій з демпфірування відповідних складових НЧК за конкретних схемно-режимних умов), суцільними контурними стрілками – керівні сигнали “ядра” автоматичної складової ІСД НЧК, а штриховими контурними стрілками – керівні дії диспетчерського персоналу, який застосовує інформацію оперативної складової ІСД НЧК.

В ІСД НЧК задачу виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх доміантних мод розв’язують за допомогою комплексу ідентифікації та визначення параметрів доміантних мод НЧК (інформаційного “ядра”). Отримані результати з рівня ЕВРП “Регіна-Ч” надходять до “концентратора-аналізатора” (який, водночас, здійснює функцію керування розподіленою автоматичною складовою ІСД НЧК), призначеного для:

- 1) визначення потреби в необхідності керуючих впливів на САКЗ певних СГ ЕСт з метою демпфірування виявлених доміантних мод коливань;
- 2) формування та видачі сигналів керування, спрямованих на забезпечення демпфірування доміантних мод НЧК;
- 3) видачі засобам оперативної складової ІСД НЧК всієї необхідної інформації щодо виявлених небезпечних доміантних мод НЧК (слід зазначити, що надходження інформації превентивній складовій ІСД НЧК здійснюється засобами оперативної складової ІСД НЧК).

Схему функціонування ІСД НЧК із залученням лише автоматичної складової наведено на рис. 2.24.

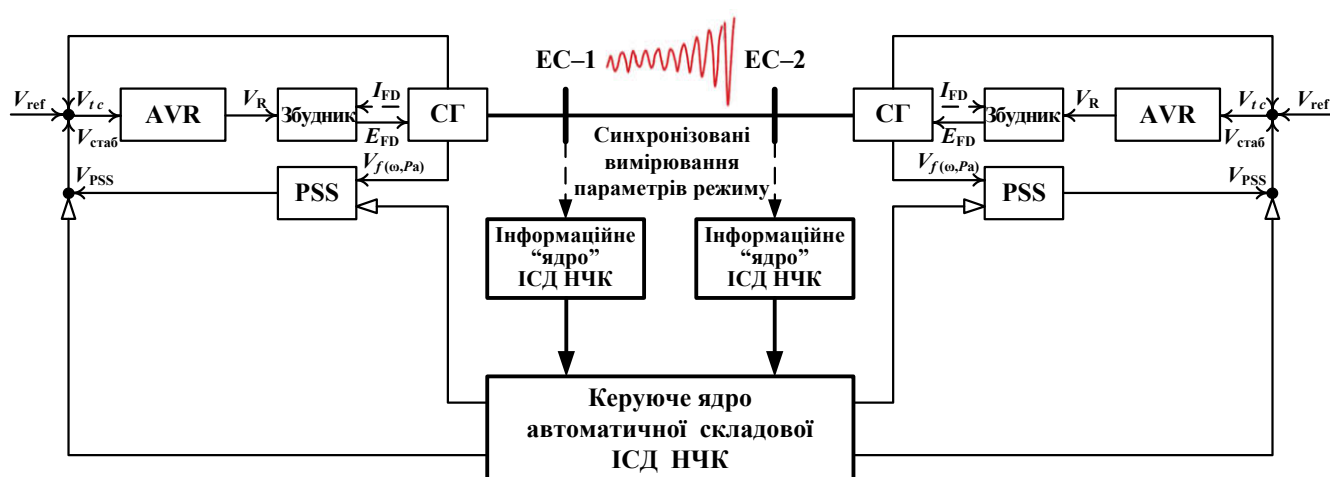


Рисунок 2.24 – Схема функціонування ІСД НЧК із залученням лише автоматичної складової

На рис. 2.24 стрілками вигляду “→” показано функціональні зв’язки всередині САКЗ СМ, штриховими “залитими” стрілками – результати синхронізованих вимірювань режимних параметрів ЕС (ЕО), решта позначень стрілок відповідає позначенням рис. 2.23, а позначення сигналів у каналах зворотних зв’язків САКЗ СМ – позначенням рис. 2.13. Слід зазначити, що наведена схема функціонування ІСД НЧК забезпечує її роботу як за наявності PSS, так і за їх відсутності (тобто, як для СМ з САКЗ з PSS, так і для СМ з САКЗ з модульно-фазовим АРЗ [42]).

Доцільність застосування ІСД НЧК з метою забезпечення ефективного демпфірування НЧК було показано на прикладах підвищення ефективності PSS у контексті демпфірування НЧК. Оскільки результати проведених досліджень показали, приблизно, однакову (у нормальному та післяаварійному режимах роботи ЕС (ЕО)) ефективність всіх досліджених типів PSS (з огляду на демпфірування за їх допомогою НЧК), то в подальших дослідженнях було застосовано багатодіапазонний PSS типу PSS4B, для налаштування якого в доволі простий спосіб може бути використано інформацію про параметри складових НЧК, отриману від спеціально розробленого КІВП НЧК – інформаційного “ядра” ІСД НЧК. Спрощена модель PSS типу PSS4B (рис. Г.3 додатку Г) має за параметри налаштування значення центральних частот трьох робочих діапазонів PSS (низькочастотного, середньочастотного (СЧ) та високочастотного), які для конкретного режиму роботи ЕС (ЕО) може бути скориговано на основі інформації, отриманої в режимі реального часу від КІВП НЧК ІСД.

Раніше було показано, що застосування налаштувань PSS, які не враховують актуальних (фактичних) частот наявних в ЕС (ЕО) НЧК (зокрема, для PSS типу PSS4B результати досліджень наведено в табл. 2.6 та рис. 2.20) може призвести до зниження ефективності PSS цього типу як засобу недопущення коливного порушення стійкості ЕС (ЕО). З метою підвищення ефективності PSS цього типу на підставі наявних даних (отриманих, наприклад, у результаті аналізу зареєстрованих вибірок даних режимних параметрів ЕС у режимі offline) щодо “схильності” ЕС ТС-І до виникнення в ній НЧК з частотою близько 0,40 Гц у випадку збільшення навантаження МЗ понад 500 МВт (за потужністю кінця) було виконано превентивне налаштування PSS усіх САКЗ СГ шляхом корекції центральної частоти СЧ-діапазону PSS (зміна значення параметра з 0,70 Гц, пропонуємого стандартом [72], на фактичне

значення частоти НЧК 0,40 Гц). Вибір СЧ-діапазону PSS з метою переналаштування його середньої частоти обумовлювався тим фактом, що актуальна (фактична) частота НЧК тут відповідала саме СЧ-діапазону PSS (понад 0,14 Гц, але менше 1,40 Гц). Результатом зазначеного переналаштування стало поліпшення процесу демпфірування НЧК, що дало змогу збільшити потік активної потужності по МЗ 7–9 ТС-I до 574 МВт за потужністю кінця (що відповідає $0,8P'_{\max 2}$ згідно з прийнятим раніше обмеженням (розрахунок $P'_{\max 2}$ здійснювався за (2.4б))) без виникнення високоамплітудних НЧК (рис. 2.25).

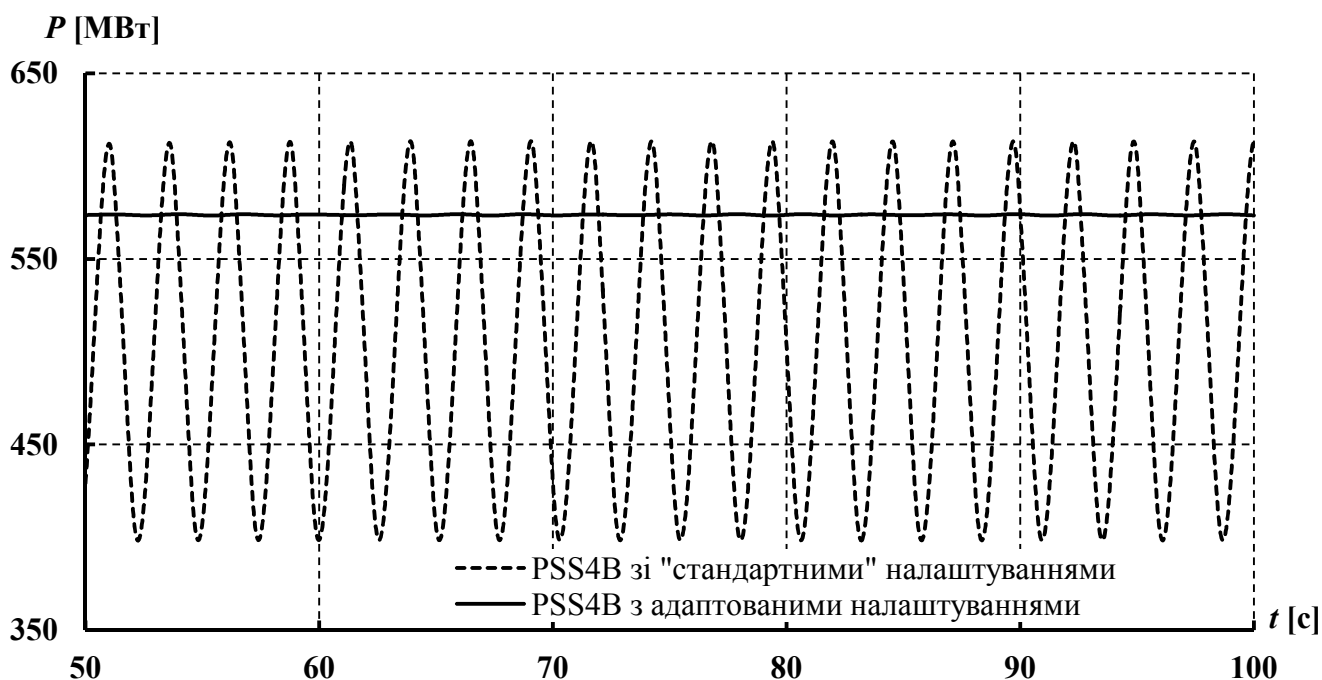


Рисунок 2.25 – Графік потоку активної потужності в кінці МЗ ТС-I за умови застосування для всіх СГ САКЗ з AVR типу АС5А з параметрами згідно з [72] та PSS типу PSS4В з параметрами згідно з [72] та з адаптованими параметрами

Можна показати, що шляхом здійснення аналогічного превентивного налаштування PSS типу PSS4В у структурі САКЗ всіх СМ ТС-II можна досягти стійкого режиму в разі передачі до кінця МЗ 200–5 активної потужності 1033 МВт (що відповідає $0,8P'_{\max 2}$ згідно з прийнятим раніше обмеженням (розрахунок $P'_{\max 2}$ здійснювався за (2.4б))), за умови застосування в структурі САКЗ всіх СМ AVR типів АС1А, АС5А, ST1А та ST2А (для AVR типів DC1А та DC2А зазначеного потоку потужності в кінці

МЗ 200–5 було досягнуто за “стандартних” налаштувань згідно з [72]). У цьому випадку центральна частота СЧ-діапазону PSS набула значення 0,75 Гц, що відповідає фактичній частоті НЧК, наявних у ТС-II за умови високого завантаження МЗ.

Однак превентивне налаштування PSS не може повністю забезпечити високу ефективність PSS (у контексті забезпечення демпфірування НЧК) в усьому діапазоні, принаймні, нормальних режимів роботи ЕС (ЕО), оскільки частота НЧК по МЗ може змінюватися під впливом різних факторів (зміни навантаження МЗ, схеми ЕС (ЕО) та її параметрів, налаштувань САКЗ СМ), що може призвести до невідповідності між превентивно зробленими налаштуваннями PSS і фактично необхідними (з огляду на фактичну частоту наявних НЧК) налаштуваннями. Саме тому необхідною є можливість переналаштування PSS на фактичну частоту наявних в ЕС (ЕО) НЧК у режимі реального часу, де функцію забезпечення PSS даними щодо фактичних параметрів складових НЧК виконує КІВП НЧК ІСД.

Ефективність такого підходу було досліджено на основі ТС-I за умови застосування для всіх СГ САКЗ з AVR типу AC5A та PSS типу PSS4B. За “стандартних” налаштувань AVR та PSS усіх САКЗ СГ згідно з [72] у випадку збільшення потоку активної потужності в кінці МЗ до 514 МВт в ЕС виникали стійкі НЧК з незмінною амплітудою близько 110 МВт (рис. 2.20). Починаючи з 50с від моменту виникнення в ЕС стійких НЧК з незмінною амплітудою було змодельовано початок роботи КІВП НЧК ІСД, в результаті чого усім PSS було надано інформацію щодо актуальної частоти домінантної моди НЧК. Починаючи з 60с від моменту виникнення коливань було змодельовано початок роботи усіх PSS з адаптованими налаштуваннями, виконаними на основі інформації щодо частоти домінантної моди, отриманої від КІВП НЧК ІСД, що надало змогу “придушити” стійкі НЧК в ЕС (рис. 2.26). Тут на основі отриманої від КІВП НЧК ІСД інформації щодо фактичного значення частоти НЧК було проведено коригування центральної частоти СЧ-діапазону PSS з 0,70 Гц до 0,40 Гц. Перехід від одного “набору” параметрів PSS до іншого в “Matlab” було імітовано шляхом перемикавання каналу стабілізації САКЗ СГ ТС-I з виходу PSS зі “стандартними” параметрами на вихід адаптивного PSS з новими параметрами (рис. 2.27), моделюючи процес зміни налаштувань адаптивних PSS (наприклад, PSS-100 виробництва “Basler Electric” та APSS виробництва “ABB” [125, 156, 157]).

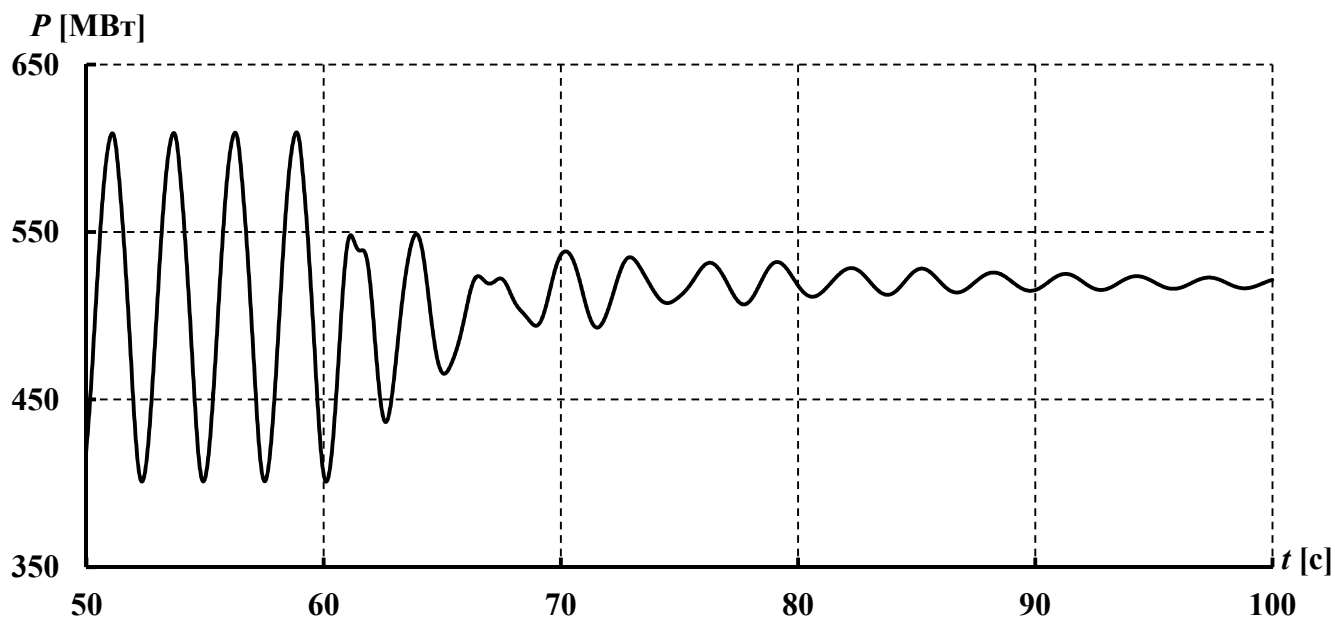


Рисунок 2.26 – Графік потоку активної потужності в кінці МЗ ТС-I за умови застосування для всіх СГ САКЗ з AVR типу AC5A з параметрами згідно з [72] та PSS типу PSS4B з адаптованими параметрами

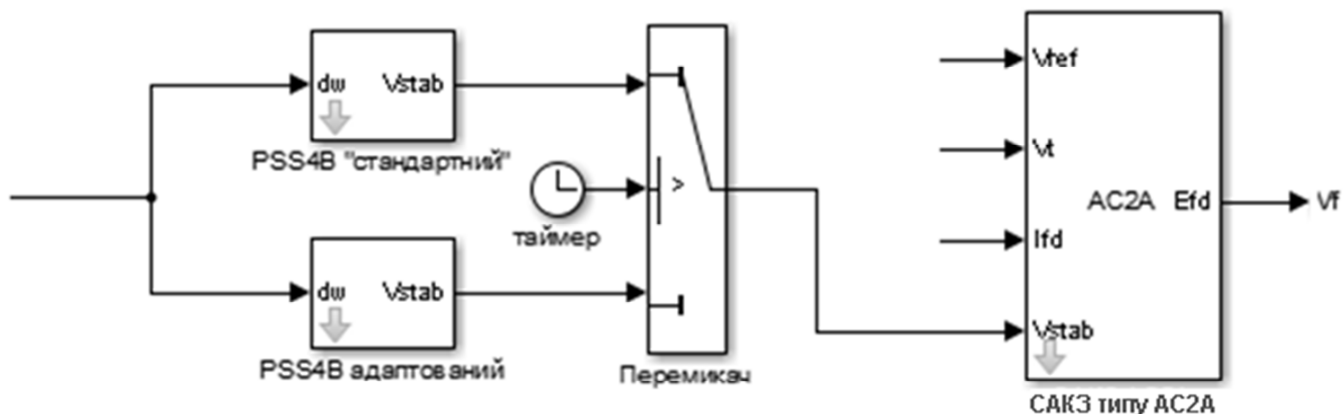


Рисунок 2.27 – Реалізація зміни параметрів PSS у середовищі "Matlab"

Таймер на рис. 2.27 імітує витрату часу на визначення актуальних (фактичних) параметрів коливань за допомогою КІВП НЧК ІСД (детально принципи організації та особливості функціонування цього комплексу наведено в розділах 3 та 4), який для забезпечення вимог щодо швидкодії систем автоматичного керування [26] та з метою покращення візуалізації результатів був прийнятий за 10с.

Аналіз графіка потоку активної потужності в кінці МЗ ТС-I за умови застосування САКЗ з AVR типу AC5A та PSS типу PSS4B з адаптованими параметрами для всіх СГ (рис. 2.26) показує, що перехід PSS до роботи з адаптованими параметрами призвів до зміни частоти НЧК з, приблизно, 0,40 Гц до близько 0,32 Гц.

Результати проведеного дослідження підкреслюють вимоги до КІВП НЧК ІСД які стосуються забезпечення високої точності визначення параметрів (зокрема, частоти) НЧК, оскільки для розглянутого прикладу різниця в 0,3 Гц між центральною частотою СЧ-діапазону PSS типу PSS4B (0,7 Гц згідно з [72]) та актуальною (фактичною) частотою НЧК (0,40 Гц) призвела до неможливості “придушити” наявні в ЕС НЧК.

Поліпшення ефективності PSS (з огляду на необхідність демпфірування НЧК) у разі застосування під час їх налаштування інформації про фактичні параметри складових НЧК, отриманої в режимі реального часу від інформаційного “ядра” ІСД НЧК, було експериментально підтверджено на прикладі ТС-II, для всіх СМ якої застосовано САКЗ з AVR типу AC1A та PSS типу PSS4B з налаштуваннями згідно з [72]. Вихідні параметри ТС-II та параметри її усталеного режиму, розглянутого в дослідженні, наведено в додатку Б та в табл. 2.9.

Таблиця 2.9 – Режимні параметри ТС-II за умови застосування для всіх СМ САКЗ з AVR типу AC1A та PSS типу PSS4B зі стандартними налаштуваннями згідно з [72]

Параметри	Номер пункту							
Навантаження пунктів, МВА	4	6	100	200	202			
	1000-j100	1100-j300	2000-j600	150-j0	500-j250			
Потужність СМ, МВА (струм СМ, в.о.)	Номер СМ							
	1	3	7	101	201	203		
	400-j181 (0,933)	400-j152 (0,909)	0-j103 (0,320)	1603-j914 (0,871)	1245-j356 (0,917)	1245-j398 (0,926)		
Модулі напруги пунктів, кВ	Номер пункту							
	2	4	5	6	8	100	200	202
	511,2	234,9	495,5	228,0	496,8	230,9	513,0	236,3

У розглянутому режимі роботи потік активної потужності в кінцях МЗ 200–5 і 202–100 становив, відповідно, 965 МВт і 739 МВт, ЕС перебувала в стійкому стані, НЧК були відсутні. У момент часу $t=10c$ в ЕС відбулося відключення навантаження

з активною потужністю 150 МВт у пункті 200, що призвело зростання потоків активної потужності по МЗ 200–5 і 202–100 до, відповідно, 997 МВт і 771 МВт та до виникнення стійких НЧК з частотою близько 0,75 Гц, амплітуда яких зростала з плином часу (раніше було показано (див. табл. 2.7), що застосування для всіх СМ ТС-II САКЗ з PSS типу PSS4B та AVR типів DC1A, DC2A, ST1A, ST2A з налаштуваннями згідно з [72] забезпечує стійку роботу ЕС ТС-II за умови більших завантажень МЗ 200–5 і 202–100). За 62с після відключення навантаження в пункті 200 зазначені НЧК призвели до втрати стійкості ЕС (графік НЧК потоку активної потужності в кінці МЗ 200–5 наведено на рис. 2.28).

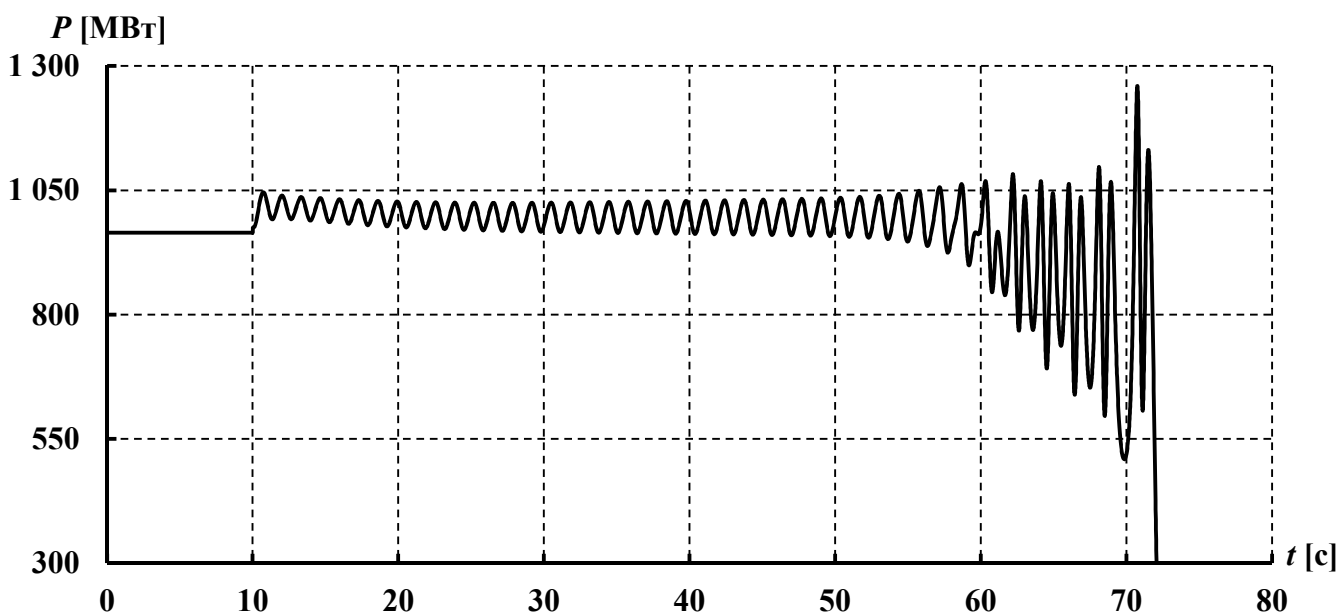


Рисунок 2.28 – Графік потоку активної потужності в кінці МЗ ТС-II за умови застосування для всіх СМ САКЗ з AVR типу AC1A та PSS типу PSS4B з параметрами згідно з [72]

Розрахунок частоти доміантної моди НЧК за допомогою КІВП НЧК ІСД та подальше застосування отриманих значень з метою корекції центральної частоти СЧ-діапазону PSS типу PSS4B (зміна значення параметра зі “стандартного” 0,70 Гц (згідно з [72]) на фактичне значення частоти НЧК 0,75 Гц) дали змогу запобігти подальшому “розвитку” стійких НЧК і забезпечити їх демпфірування. Вибір для переналаштування середньої частоти саме СЧ-діапазону PSS було обумовлено тим фактом, що актуальна (фактична) частота НЧК тут відповідала саме СЧ-діапазону (понад 0,14 Гц, але менше

1,40 Гц). Графік потоку активної потужності в кінці МЗ ТС-I за умови застосування САКЗ з AVR типу AC1A та PSS типу PSS4B з адаптованими параметрами для всіх СГ наведено на рис. 2.29.

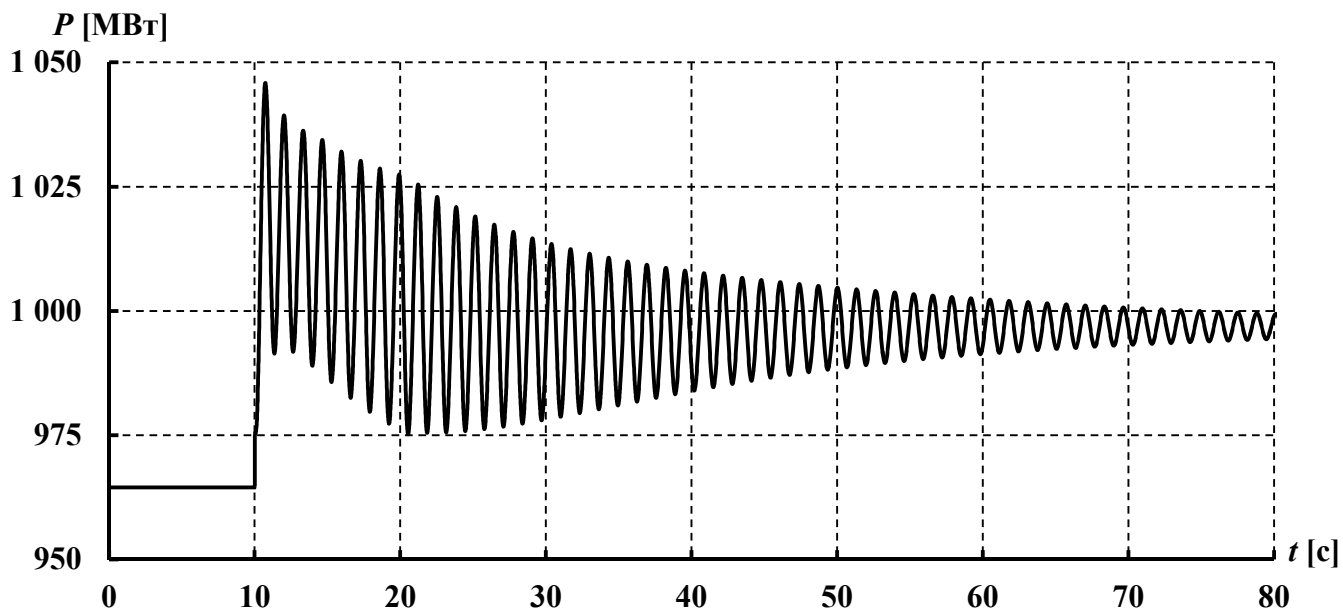


Рисунок 2.29 – Графік потоку активної потужності в кінці МЗ 200–5 ТС-II за умови застосування для всіх СМ САКЗ з AVR типу AC1A з параметрами згідно з [72] та PSS типу PSS4B з налаштуваннями згідно з [72] (до 20с) та з адаптованими налаштуваннями

Тут запуск КІВП НЧК ІСД тут було змодельовано починаючи з 10с процесу. Починаючи з 20с процесу PSS усіх САКЗ СГ працювали із новими налаштуваннями, які відповідали актуальній (фактичній) частоті НЧК. Використання PSS з новими налаштуваннями дало змогу забезпечити демпфірування НЧК (рис. 2.29), які неможливо було “придушити” за “стандартних” налаштувань PSS і на 32 МВт меншого значення потоку активної потужності по МЗ 200–5 (рис. 2.28). Це свідчить про суттєве підвищення ефективності демпфірування НЧК внаслідок застосування параметрів, розрахованих за допомогою даних, отриманих від інформаційного “ядра” ІСД НЧК.

Аналогічно до попереднього дослідження, проведеного на основі, ТС-I, результати дослідження, проведеного із застосуванням ТС-II, підкреслюють необхідність визначення з високою точністю параметрів (зокрема, частоти) НЧК у процесі роботи КІВП НЧК

ІСД, оскільки для розглянутого прикладу різниця в 0,05 Гц між “стандартною” центральною частотою СЧ-діапазону PSS типу PSS4В (0,70 Гц згідно з [72]) та актуальною (фактичною) частотою НЧК (0,75 Гц) призвела до неспроможності стабілізаторів “придушити” наявні в ЕС НЧК.

Отже, наведені приклади показали підвищення ефективності PSS в аспекті демпфірування НЧК за умови їх спільної роботи з ІСД НЧК та підтвердили необхідність визначення з високою точністю параметрів (зокрема, частоти) НЧК у процесі роботи КІВП НЧК ІСД. Втім, зазначені приклади було пов’язано з роботою ТС-І та ТС-ІІ у нормальних режимах і не вимагали від ІСД НЧК високої оперативності функціонування. Так у прикладі на основі ТС-І наявні в ЕС стійкі НЧК хоча і мали амплітуду близько 110 МВт, проте ця амплітуда була незмінною з плином часу, тому НЧК не призводили до порушення стійкості ЕС (рис. 2.20). У прикладі на основі ТС-ІІ час між втратою стійкості ЕС та початком збурення, яке спричинило зазначену втрату стійкості, становив 62с (рис. 2.28), що вимагало від ІСД НЧК надання з дуже високою оперативністю (до 10с з моменту виникнення збурення) актуальної інформації щодо параметрів складових НЧК з метою переналаштування наявних PSS та забезпечення надійного придушення НЧК. Необхідно зазначити, що вимоги до оперативності функціонування ІСД НЧК у контексті визначення актуальних параметрів складових НЧК можуть бути суттєво жорсткіші. Зокрема, із застосуванням ТС-І було змодельовано ситуацію, коли внаслідок хибного спрацювання релейного захисту було відключено ділянку 7–8б–9 (див. рис. А.1 додатку А). Для всіх СГ ТС-І було застосовано САКЗ з AVR типу DC2А (схему AVR наведено на рис. В.4 додатку В) та PSS типу PSS4В (схему PSS наведено на рис. Г.3 додатку Г) зі стандартними налаштуваннями згідно з [72]. Вихідні параметри ТС-ІІ та параметри її усталеного доаварійного режиму наведено в додатку А та в табл. 2.10.

Таблиця 2.10 – Режимні параметри ТС-І за умови застосування для всіх СГ САКЗ з AVR типу DC2А та PSS типу PSS4В зі стандартними налаштуваннями згідно з [72]

Параметри	Номер пункту або СГ			
	Навантаження пунктів (з урахуванням потужності УППК), МВА	7	9	
967+j287		1670+j437		
Модулі напруги пунктів, кВ	7	9		
	228,3	230,8		
Потужність СГ, МВА (струм СГ, в.о.)	1	2	3	4
	700-j91 (0,784)	709-j116 (0,798)	719-j81 (0,804)	700-j81 (0,783)

У доаварійному режимі роботи потік активної потужності в кінці МЗ 7–9 становив 388 МВт, ЕС перебувала в стійкому стані, НЧК були відсутні. У момент часу $t=10c$ внаслідок хибного спрацювання релейного захисту та відключення вимикача на ПС–7 було відключено ділянку 7–8б–9, що призвело до виникнення стійких НЧК з частотою близько 0,45 Гц, амплітуда яких зростала з плином часу. За, приблизно, 12с після відключення вимикача на ПС–7 зазначені НЧК призвели до втрати стійкості ЕС (графік НЧК потоку активної потужності в кінці МЗ наведено на рис. 2.30).

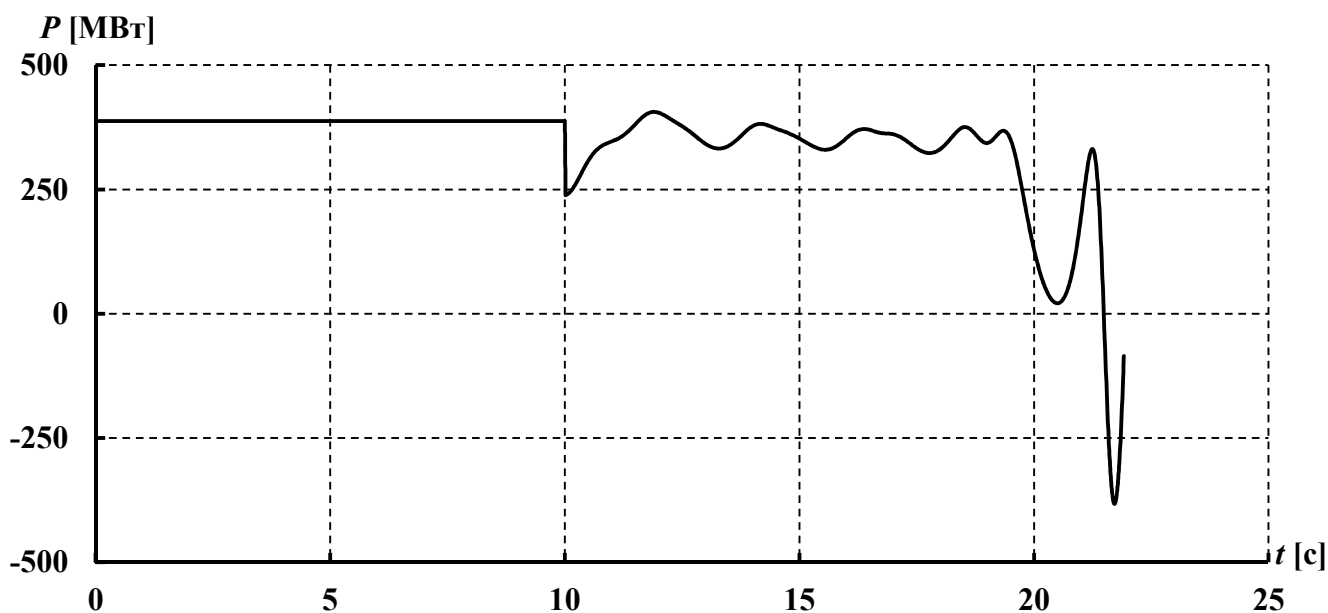


Рисунок 2.30 – Графік потоку активної потужності в кінці МЗ TC-I за умови застосування для всіх СГ САКЗ з AVR типу DC2A та PSS типу PSS4B з параметрами згідно з [72]

З графіка на рис. 2.30 причина втрати стійкості ЕС не є очевидною, оскільки наявні НЧК активної потужності мають тенденцію до згасання. Але з графіків рис. 2.31 стає зрозуміло, що причиною втрати стійкості ЕС стало поступове “розхитування” роторів СГ один відносно одного. Зазначений приклад показує, що в ЕС (ЕО) необхідно забезпечити демпфірування не лише незгасаючих НЧК, але і покращення демпфірування згасаючих НЧК, існування яких може бути наслідком розвитку в ЕС (ЕО) певних небезпечних процесів. У результаті роботи КІВП НЧК ІСД (час дії t_p якого, аналогічно до попередніх досліджень, був прийнятий за 10с) було отримано частоту домінантної моди НЧК на

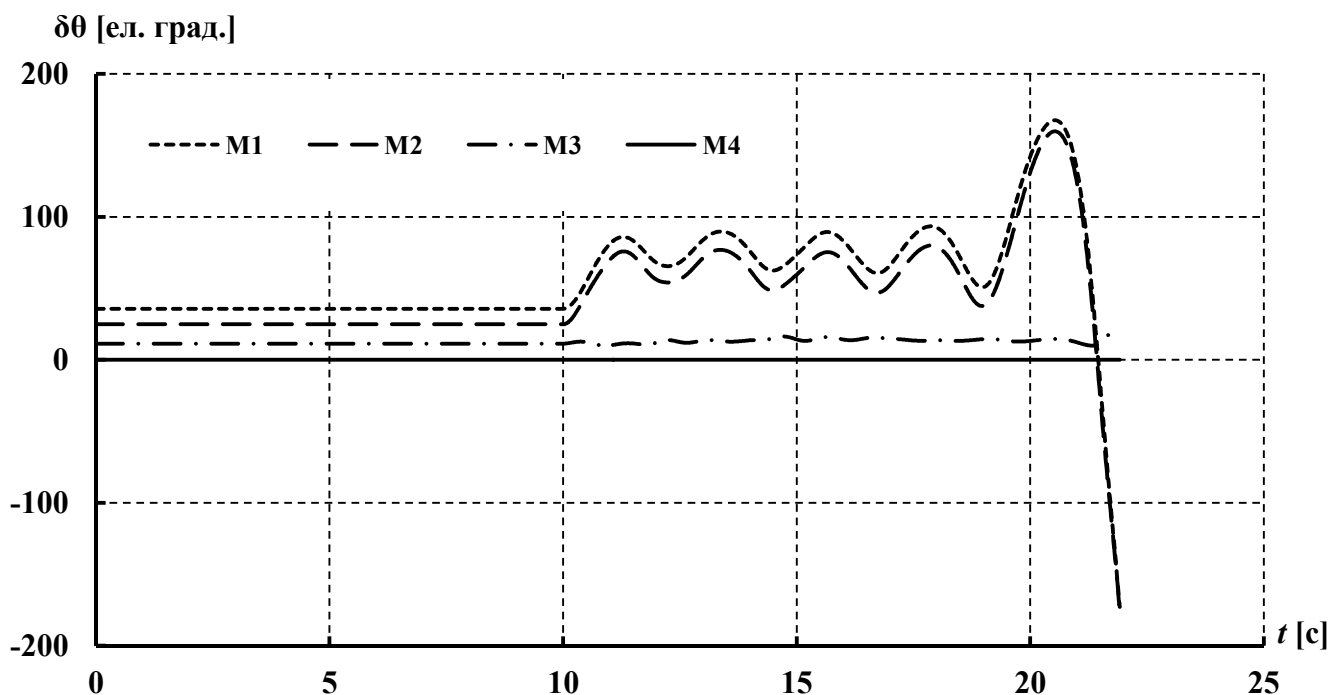


Рисунок 2.31 – Графіки кутів роторів СМ ТС-I за умови відключення ділянки 7–8б–9 та застосування для всіх СГ САКЗ з AVR типу DC2A та PSS типу PSS4B з параметрами згідно з [72]

рівні близько 0,45 Гц і, починаючи з 20с процесу, PSS усіх СГ перейшли на роботу з новою центральною частотою СЧ-діапазону (причини вибору саме СЧ-діапазону для переналаштування його середньої частоти тут є аналогічною попереднім дослідженням). Втім, на відміну від результатів попередніх досліджень з ТС-I та ТС-II, перехід від застосування PSS зі “стандартними” налаштуваннями згідно з [72] до застосування PSS з адаптованими параметрами не призвів до припинення подальшого “розвитку” стійких НЧК та не дав змоги запобігти коливному порушенню стійкості ЕС, яке (аналогічно випадку застосування PSS зі “стандартними” параметрами) сталося, приблизно, за 12с після відключення вимикача на ПС-7. Аналіз рис. 2.32, де наведено деталізовані графіки потоку активної потужності в кінці М3 ТС-I для випадків застосування PSS4B зі “стандартними” налаштуваннями згідно з [72] та адаптованими налаштуваннями ($t_p=10с$), дає змогу зробити висновок, що за проміжок часу між переходом PSS на роботу з новими параметрами та втратою ЕС стійкості (близько 1,8с) системні стабілізатори не змогли припинити процес “розвитку” НЧК в ЕС.

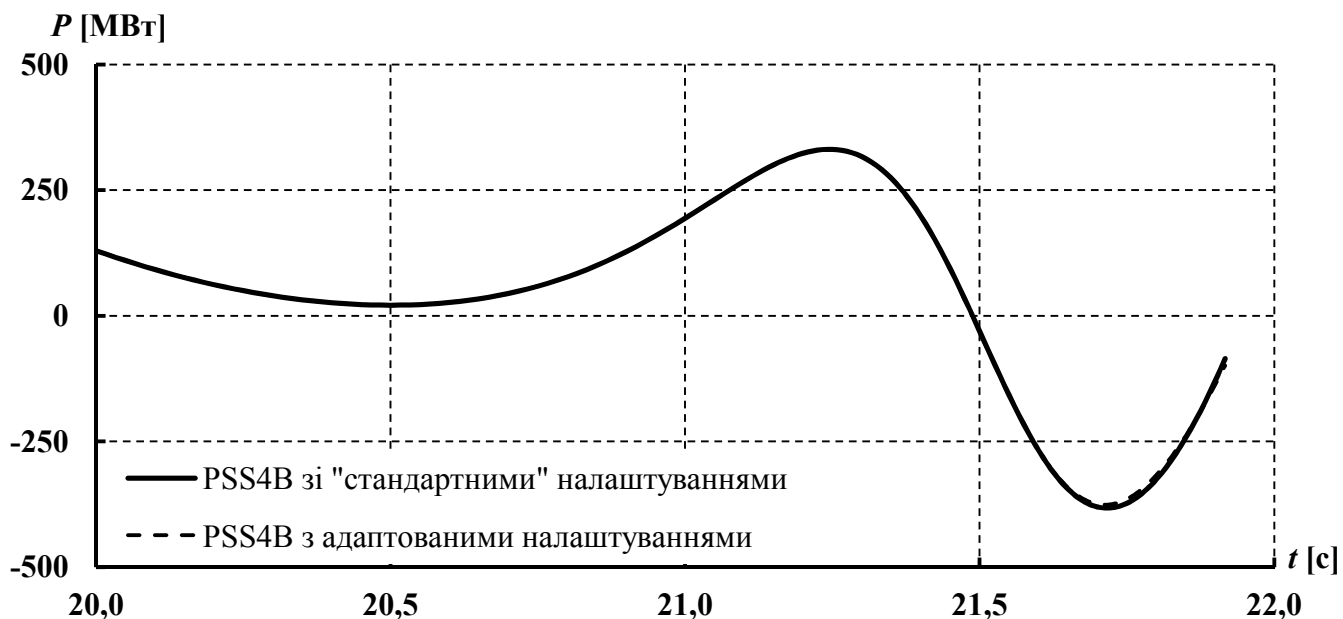


Рисунок 2.32 – Графік потоку активної потужності в кінці МЗ ТС-I за умови застосування для всіх СГ САКЗ з AVR типу DC2A з параметрами згідно з [72] та PSS типу PSS4B з налаштуваннями згідно з [72] та адаптованими налаштуваннями

Зменшення часу дії (t_p) КІВП НЧК ІСД з $10c$ до $5c$ та перехід PSS усіх СГ на роботу з новою центральною частотою СЧ-діапазону починаючи з $15c$ (а не з $20c$) процесу дали змогу змінити характер НЧК зі стійких з амплітудою, що зростає з плином часу, на стійкі з незмінною з часом амплітудою (рис. 2.33). Частота НЧК за таких умов знизилася до, приблизно, $0,3$ Гц. Подальше переналаштування центральної частоти СЧ-діапазону PSS усіх СГ ЕС дією ІСД НЧК на нове значення (близько $0,3$ Гц) не призвело до згасання НЧК. Стійкий характер НЧК (навіть за умови роботи PSS з адаптованими параметрами з $t_p = 5c$) тут обумовлено періодичним переобтяженням МЗ за активною потужністю, оскільки внаслідок коливань рівнів напруги на шинах ПС-7 та ПС-9 (рис. 2.34) гранична потужність передачі МЗ 7-9 (відповідно до (2.46)) періодично змінюється в діапазоні $306...455$ МВт. З метою припинення НЧК в ЕС оперативним персоналом у подальшому має бути прийняте рішення про спосіб розвантаження МЗ (шляхом зниження навантаження або шляхом підвищення генерування потужності СГ ЕС-2). Слід зазначити, що в разі роботи КІВП НЧК ІСД з часом $t_p=10c$ оперативний персонал практично не матиме можливості навіть для аналізу

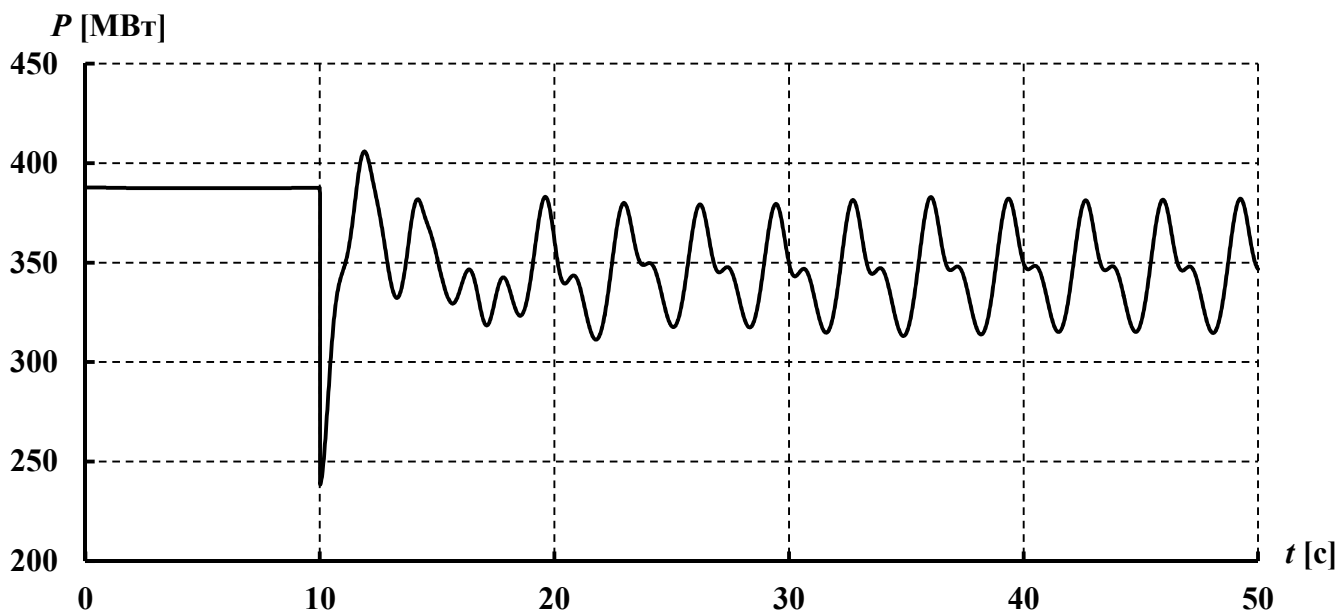


Рисунок 2.33– Графік потоку активної потужності в кінці МЗ ТС-І за умови застосування для всіх СГ САКЗ з AVR типу DC2A з параметрами згідно з [72] та PSS типу PSS4B з налаштуваннями згідно з [72] (до 15с) та адаптованими налаштуваннями

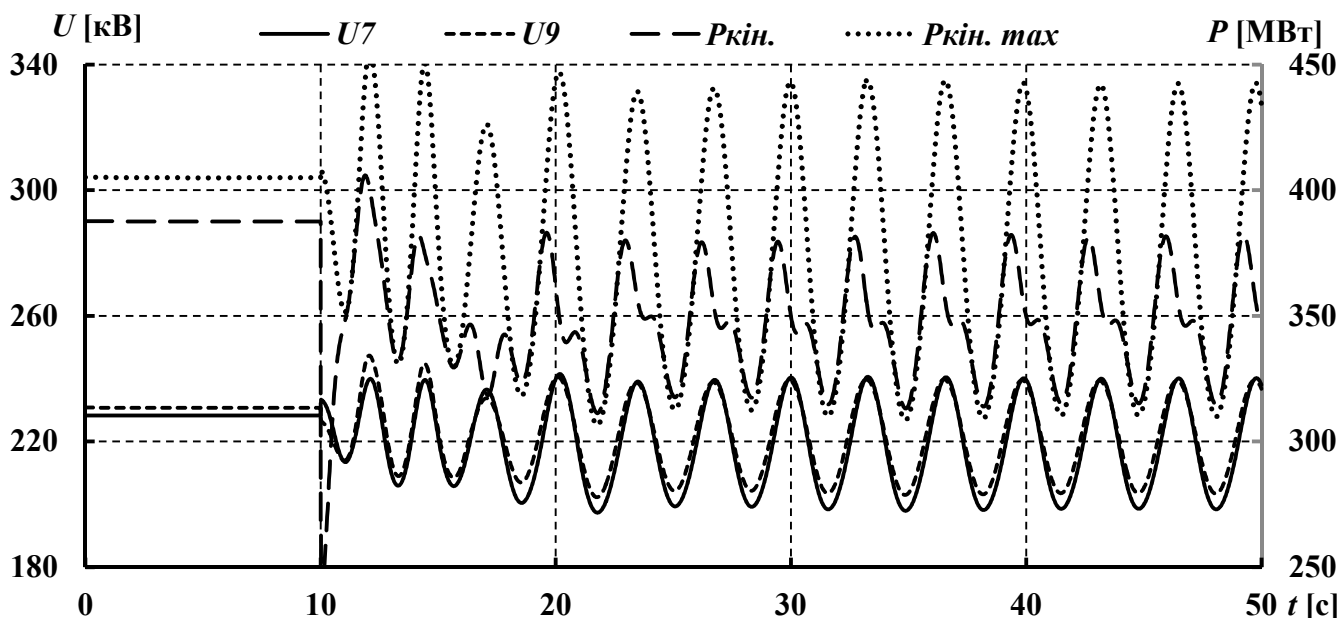


Рисунок 2.34 – Графіки напруги на шинах ПС-7 та ПС-9 ТС-І, а також фактичного і граничнодопустимого потоків активної потужності в кінці МЗ 7-9 за умови застосування для всіх СГ САКЗ з AVR типу DC2A з параметрами згідно з [72] та PSS типу PSS4B з налаштуваннями згідно з [72] (до 15с) та адаптованими налаштуваннями

ситуації, не кажучи вже про прийняття рішення та вживання відповідних заходів з розвантаження МЗ, оскільки в цьому випадку втрата стійкості ЕС відбулася за 12с з моменту виникнення збурення (рис. 2.32). В дослідженні розвантаження МЗ 7–9 дією автоматичної складової ІСД НЧК було змодельовано шляхом зниження навантаження на ПС–9 ЕС-2 на 100 МВт через 60с після виникнення збурення, яке призвело до виникнення в ЕО НЧК (графік потоку активної потужності в кінці МЗ ТС-І наведено на рис. 2.35).

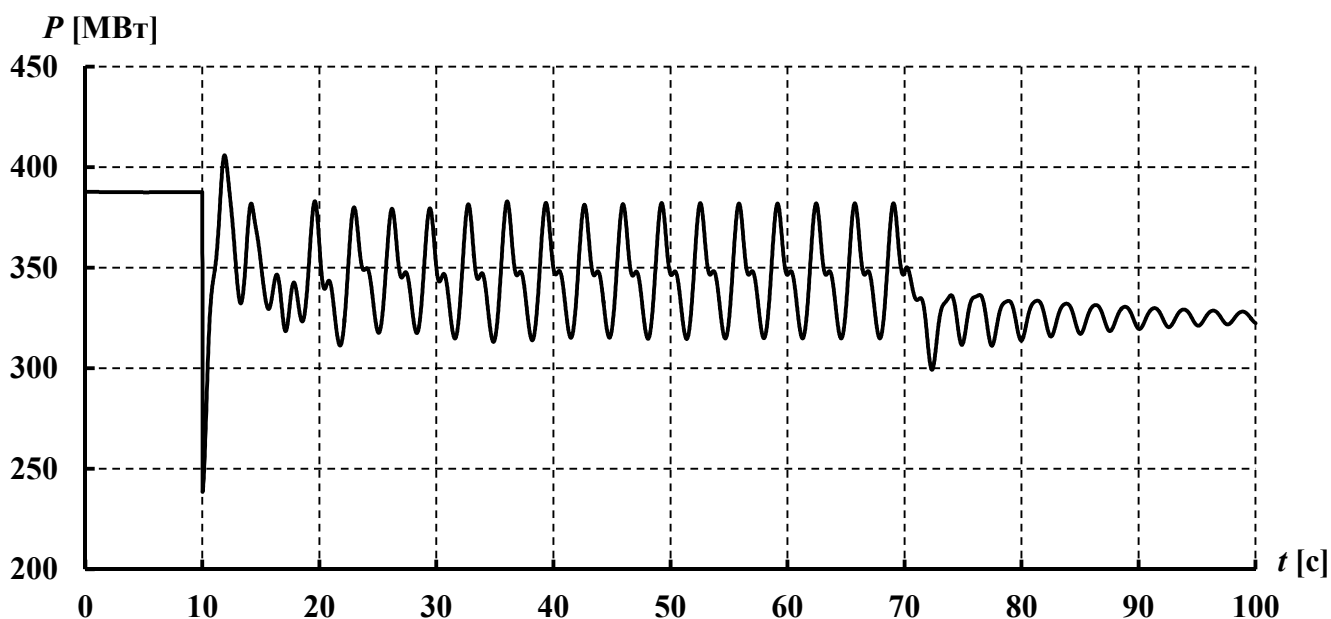


Рисунок 2.35 – Графік потоку активної потужності в кінці МЗ ТС-І за роботи автоматичної складової ІСД НЧК

Аналіз графіка на рис. 2.35 показує, що розвантаження МЗ дією автоматичної складової ІСД НЧК за 60с після виникнення збурення, яке призвело до виникнення в ЕО НЧК, спричинило зміну характеру НЧК зі стійких на нестійкі, які з часом згасають (слід відзначити, що зміна (зменшення) завантаження СГ ТС-І за незмінних параметрів PSS тут призвела до зростання частоти згасаючих НЧК з 0,3 Гц до 0,4 Гц). Тут можливість демпфірування НЧК було забезпечено завдяки швидкій (у межах 5с) роботі автоматичної складової ІСД НЧК, що підкреслює важливість забезпечення отримання інформації від КІВП НЧК ІСД у режимі реального часу.

Особливо важливу роль оперативність роботи автоматичної складової ІСД НЧК відіграє у випадку необхідності демпфірування НЧК, причиною яких стали інтенсивні збурення в ЕС (ЕО). Так раніше було показано, що у випадку застосування для всіх СГ ТС-І САКЗ з AVR типу АС1А та PSS типу PSS4В гранична тривалість трифазного КЗ на шинах 8а, за якої “розвиток” спричинених ним НЧК не призводить до коливного порушення стійкості ЕС, становить 0,27с (табл. 2.8). У випадку збільшення тривалості КЗ до 0,28с спричинені ним НЧК призводять до порушення стійкості ЕС за, приблизно, 7,5с після виникнення КЗ (рис. 2.36).

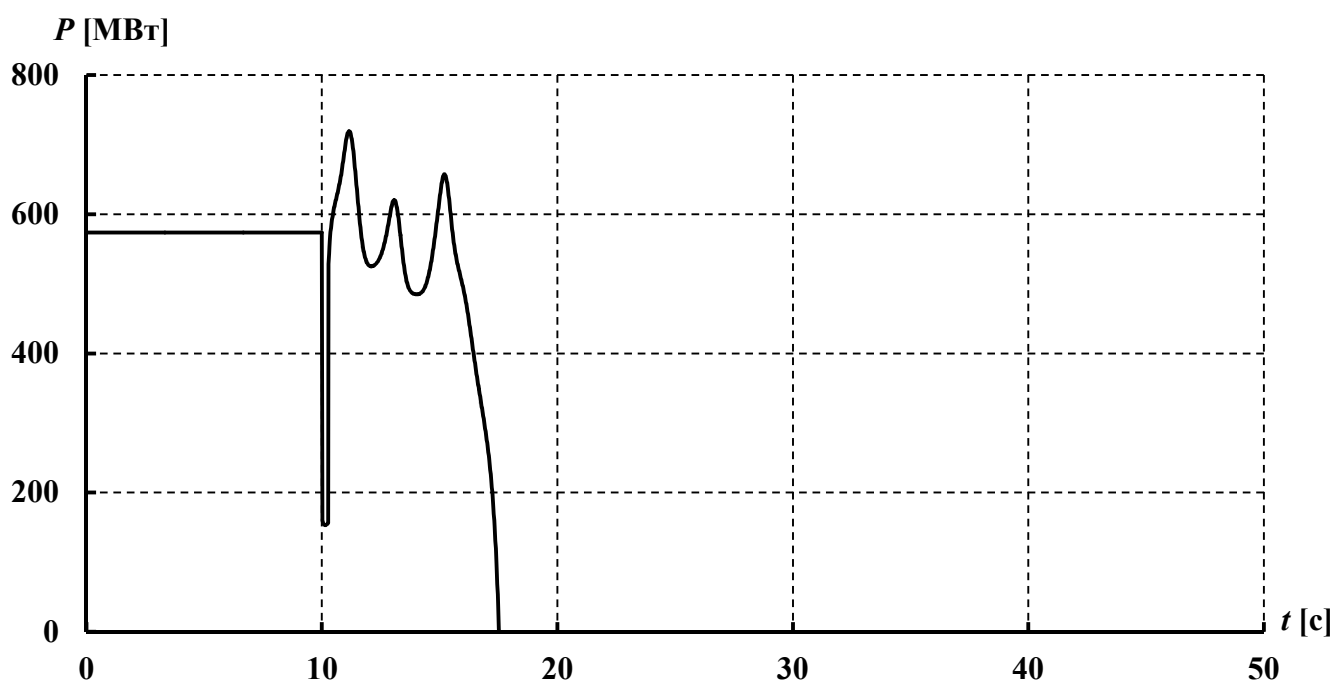


Рисунок 2.36– Графік потоку активної потужності в кінці МЗ ТС-І за умови застосування для всіх СГ САКЗ з AVR типу АС1А та PSS типу PSS4В з налаштуваннями згідно з [72]

Очевидно, що за таких умов час дії t_p КІВП НЧК ІСД має бути меншим за 7,5с, тому було змодельовано роботу КІВП НЧК ІСД з $t_p=5$ с. Внаслідок роботи цього комплексу було отримано частоту домінантної моди НЧК на рівні близько 0,50 Гц і за 5с після зняття КЗ імітовано перехід PSS усіх СГ на роботу з новою центральною частотою СЧ-діапазону. Тут робота PSS з новими налаштуваннями дала змогу забезпечити демпфірування НЧК (рис. 3.37), які неможливо було “придушити” за “стандартних” налаштувань PSS.

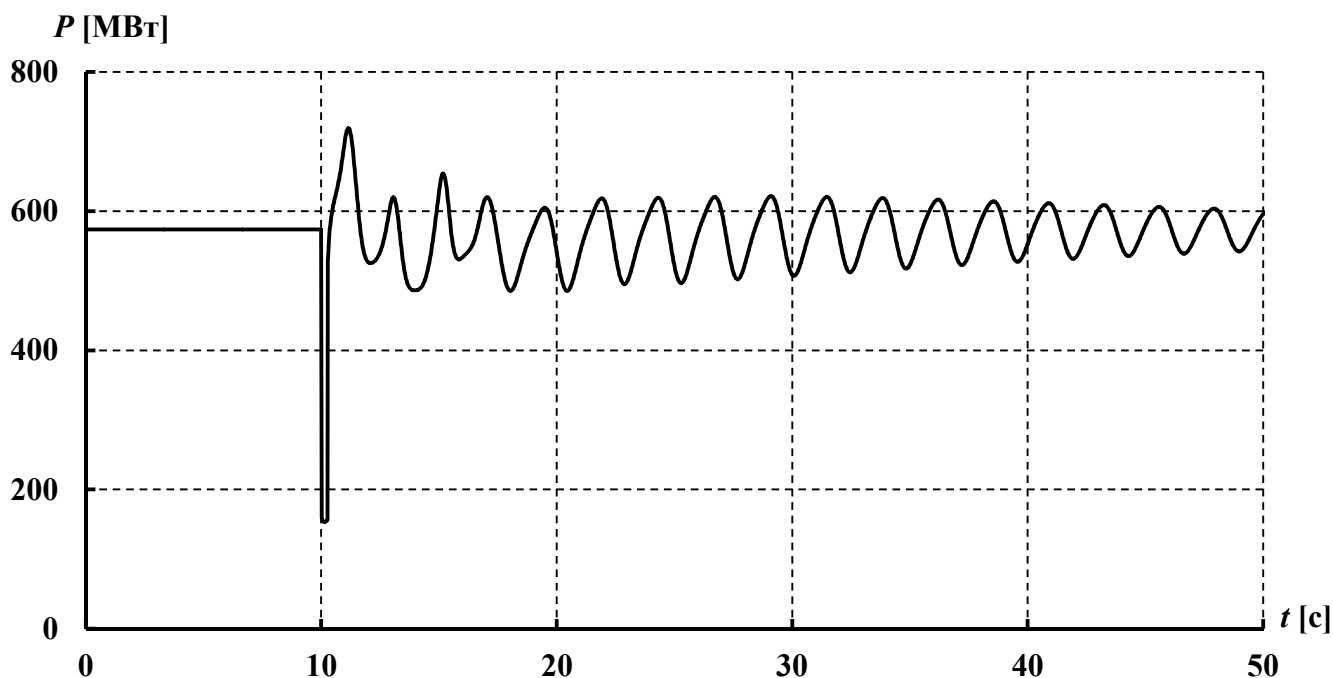


Рисунок 2.37 – Графік потоку активної потужності в кінці МЗ 7–9 ТС-I за умови застосування для всіх СМ САКЗ з AVR типу АС1А з параметрами згідно з [72] та PSS типу PSS4В з налаштуваннями згідно з [72] (до 15,29с) та з адаптованими налаштуваннями

Отже, результати проведених досліджень підтверджують суттєве підвищення ефективності PSS (з огляду на необхідність забезпечення демпфірування НЧК) за рахунок застосування адаптованих (з урахуванням фактичних параметрів складових НЧК) налаштувань, отриманих у режимі реального часу (час роботи $t_p = 5 \dots 10$ с) за допомогою КІВП НЧК ІСД. Теоретичні засади функціонування КІВП НЧК ІСД з урахуванням зазначених вище вимог до оперативності його роботи та точності визначення параметрів складових НЧК наведено в розділі 3.

Висновки по розділу 2

1) Внаслідок критичного аналізу існуючих засобів демпфірування НЧК в ЕС та ЕО розвинутих країн встановлено, що серед множини таких засобів (системні стабілізатори, гнучкі системи передачі змінного струму, високовольтні системи постійного струму, накопичувачі енергії різних типів та ін.) для ОЕС України, враховуючи її поточні технічний стан та фінансові можливості, реально можливим є застосування лише САКЗ СМ (як АРЗ СД, так і AVR+PSS).

2) Експериментально-розрахунковими дослідженнями підтверджено потребу застосування автоматичних регуляторів напруги (пропорційної дії, AVR) СМ з великими коефіцієнтами підсилення за напругою лише разом з PSS, оскільки використання таких AVR негативно впливає на демпфірування НЧК в ЕС (ЕО) і призводитиме до обмеження (за умовою запобігання коливному порушенню стійкості ЕС (ЕО)) значень потоків активної потужності по МЗ в нормальних та післяаварійних режимах ЕС (ЕО).

3) Встановлено, що застосування PSS з налаштуваннями, які не враховують значення реальних параметрів ЕС (ЕО), може знижувати ефективність демпфірування НЧК. Експериментально доведено, що ефективність демпфірування НЧК з використанням PSS може бути суттєво підвищено завдяки адаптації параметрів їхніх налаштувань з урахуванням фактичних значень параметрів домінантних мод НЧК, розрахованих засобами інтегрованої системи демпфірування НЧК. Встановлено, що ефективність демпфірування НЧК за допомогою PSS з адаптованими налаштуваннями зростає з підвищенням оперативності таких налаштувань.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ В АСПЕКТІ ОЦІНЮВАННЯ ЗАГРОЗИ КОЛИВНОГО ПОРУШЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГООБ'ЄДНАННЯ

3.1 Аналіз можливостей WAMS щодо інформаційного забезпечення ІСД НЧК ЕО

У розділі 2 було показано, що з метою підвищення ефективності PSS як засобу демпфірування НЧК в ЕС (ЕО) доцільно з метою налаштування PSS застосовувати адаптовані параметри, розраховані з урахуванням фактичних значень параметрів складових НЧК. З метою визначення параметрів складових НЧК у дисертаційній роботі було запропоновано здійснювати аналіз вибірок даних сигналів з режимними параметрами ЕС (ЕО). Зазначені сигнали (з урахуванням визначених у розділі 2 вимог до інформаційного “ядра” ІСД НЧК щодо точності та оперативності визначення параметрів складових НЧК) має бути зареєстровано та оперативно передано до ІСД НЧК, що може бути здійснено завдяки застосуванню систем глобального моніторингу (WAMS).

Поряд з виконанням інших функцій WAMS забезпечує реєстрацію значень електричних величин, отриманих від вимірювальних трансформаторів напруги та струму, і видачу цих значень разом із “мітками часу” (які відповідають моменту реєстрації сигналу) до каналів передавання даних. Зазначені функції в структурі WAMS здійснюють пристрої векторних вимірювань (PMU) (зокрема, в ОЕС України – ЕВРП “Регіна-Ч”). Частота реєстрації параметрів PMU може дорівнювати номінальній частоті ЕС (ЕО) або перевищувати її, а частота видачі інформації від PMU до каналів передавання даних може бути нижчою за частоту реєстрації. Стандарт [73] (із Доповненням 1 [74]) визначає для PMU, які працюють в ЕС (ЕО) з номінальною частотою 50 Гц, можливість надсилання 10, 25 або 50 інформаційних посилок на секунду. Засоби векторних вимірювань, які функціонують у структурі WAMS деяких ЕС (ЕО) з номінальною частотою 50 Гц, забезпечують видачу даних до каналів передавання з такою кількістю інформаційних посилок за 1с:

- Таїланд – 25 [113];
- Японія – 10, 25 [80; 108];
- КНР – 50 або 100 [51].

Вітчизняний ЕВРП “Регіна-Ч” виконує функції РМУ та забезпечує можливість передачі до 50 інформаційних посилок за 1с [27], що, як буде показано нижче, є цілком достатнім для забезпечення належної роботи КІВП НЧК ІСД.

Можливості каналів зв’язку, за допомогою яких здійснюється передача результатів синхронізованого вимірювання РМУ режимних параметрів до інформаційних серверів WAMS, мають відповідати вимогам стандарту [75]. Проте далеко не всі канали передавання інформації в ОЕС України задовольняють вимогам цього стандарту, що створює передумови для виникнення затримок надходження зазначених результатів вимірювання до інформаційних серверів WAMS та підвищує ймовірність часткової втрати зазначених даних у процесі їх передачі. За таких умов з метою підвищення надійності та належної оперативності передачі даних для ЕВРП “Регіна-Ч” також реалізовано online-протокол ІЕС 60870-5-104 [26]. Зважаючи на це та враховуючи, що КІВП НЧК ІСД потребує для своєї роботи даних лише щодо декількох параметрів контрольованого приєднання (наприклад, щодо потоків активної потужності за фазами) надійне та оперативне забезпечення інформаційного “ядра” ІСД НЧК результатами реєстрації режимних параметрів є цілком можливим.

Окремо слід зазначити, що РМУ (зокрема, і ЕВРП “Регіна-Ч”) забезпечують реєстрацію режимних параметрів із прив’язкою до часу здійснення вимірювання. Ця обставина дає змогу здійснювати контроль повноти та оперативності надходження зазначених режимних параметрів до КІВП НЧК ІСД.

3.2 Дослідження методів аналізу сигналів в аспекті їх придатності для використання в ІСД НЧК ЕО

3.2.1 Визначення основних вимог до методів аналізу сигналів з метою забезпечення надійної ідентифікації домінантних мод НЧК в режимі реального часу

Результати досліджень, наведені в розділі 2, дали змогу визначити основні функціональні вимоги, виконання яких мають забезпечувати засоби КІВП НЧК як інформаційного “ядра” ІСД НЧК:

- адекватність ідентифікації і точність визначення параметрів домінантних мод НЧК (що обумовлено залежністю ефективної роботи PSS від точності визначення частот домінантних мод НЧК), а також забезпечення високої роздільної здатності за

частотою (що обумовлено можливістю існування в ЕС (ЕО) декількох мод на близьких частотах (наприклад, випадок одночасного існування п'яти мод з частотами 0,32 Гц, 0,52 Гц, 0,62 Гц, 0,77 Гц та 0,92 Гц в ОЕС Мексики [106]));

- надійність виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх доміантних мод (що обумовлено потребою виявлення доміантних мод НЧК навіть з малими амплітудами) та стійкість до шумів (завад), наявних у реальних сигналах, реєструємих РМУ на об'єктах ЕС (ЕО);
- висока швидкодія (що обумовлено потребою унеможливлення коливного порушення стійкості ЕС (ЕО) внаслідок виникнення та швидкого “розвитку” НЧК);

З урахуванням результатів досліджень, проведених у розділі 2, попередня селекція методів аналізу сигналів в аспекті їх придатності для використання в ІСД НЧК ЕО здійснювалася з урахуванням необхідності виконання вимог за:

- швидкодією – час розрахунку з використанням певного методу обмежено 1с за умови використання для проведення розрахунків комп'ютера з процесором Intel Core i3 370М (ця вимога враховує можливість щосекундного визначення параметрів мод НЧК одразу для декількох приєднань ЛЕП у випадку застосування з метою виконання розрахунків задіяних у деяких сучасних WAMS серверів Dell R720 [133]);
- точністю визначення частоти НЧК не нижче 0,05 Гц із забезпеченням роздільної здатності за частотою не нижче 0,10 Гц.

Важливою особливістю реалізації функції визначення параметрів мод НЧК у режимі реального часу є необхідність виконання аналізу вибірок даних сигналів, множина відліків яких періодично оновлюються за принципом “першим прийшов – першим пішов”. Ширина вікна спостереження, яке використовується під час аналізу сигналів із застосуванням певного методу, має бути достатньою для отримання адекватних результатів аналізу і водночас має охоплювати якнайменший часовий інтервал, щоб забезпечувати необхідну оперативність ідентифікації доміантних мод НЧК та оцінювання наявності загрози функціонуванню ЕО. Зважаючи на це, кількість відліків сигналу в певному вікні спостереження і, відповідно, тривалість (довжину) часового відрізка, який охоплює вікно спостереження (далі тривалість цього часового відрізка називатимемо шириною вікна спостереження) може бути неоднаковою як для різних методів аналізу сигналів, так і для різних вибірок даних сигналів, які

відповідають різним режимам роботи ЕО. Необхідність зміни ширини вікна спостереження має визначатися (крім інших факторів) на підставі якісного аналізу результатів роботи відповідних методів. Особливості застосування вікон спостереження для забезпечення роботи методів аналізу сигналів наведено, зокрема, в [6].

Попередню селекцію методів аналізу сигналів було здійснено на основі синтезованого трикомпонентного тестового сигналу (ТСг) з незмінними амплітудами компонентів, який описує співвідношення вигляду $y(t)=100+2\sin(2\pi\cdot 0.1t)+1\sin(2\pi\cdot 0.2t)$. Зазначений сигнал (далі – ТСг-1) містить складові з частотами 0,1 Гц та 0,2 Гц, частоти яких відповідають типовим частотам сигналів реальних ЕС з наявними в них міжсистемними НЧК. З метою попереднього відбору методів аналізу сигналів було застосовано вибірку даних ТСг-1, яка має частоту дискретизації 50 Гц (що відповідає можливостям, зокрема, ЕВРП “Регіна-Ч” та вимогам [75] стосовно каналів передавання даних), з вікном спостереження, яке охоплювало часовий відрізок $[0;10]с$. Фрагмент графіка ТСг-1 наведено на рис. Д.1 додатку Д.

3.2.2 Дискретне перетворення Фур'є

Дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) та його модифікації є одними з найпоширеніших методів, які застосовують з метою визначення параметрів складових НЧК [48, 80, 108, 112, 173].

Відомо, наприклад, з [22], що спектральні коефіцієнти періодичного дискретного сигналу $x(k)$ після розвинення його в ряд Фур'є може бути визначено так:

$$X(n) = \frac{1}{NT} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-j\omega kT}, \quad (3.1)$$

де N – кількість відліків сигналу;

T – період сигналу, с;

k – номер гармоніки;

ω – кутова частота основної гармоніки, рад/с.

Вираз (3.1) називають ДПФ. Зазвичай з метою зменшення часу розрахунку ДПФ застосовують його модифікацію – ШПФ [48, 80, 108, 112, 173]. Особливістю

ШПФ є кратна степені 2 кількість відліків, які містить досліджуваний сигнал. У випадку недостатньої для виконання цієї умови кількості відліків вибірки даних сигналу доповнюють необхідною кількістю нулів. Недоліком такої модифікації є ймовірність виникнення побічних складових у результатах аналізу.

З аналізу (3.1) випливає, що роздільна здатність ДПФ за частотою має стійку залежність від тривалості досліджуваної вибірки даних сигналу у часі. Гранична роздільна здатність за частотою ДПФ та не перевищує значення T_c^{-1} (де T_c – тривалість спостереження сигналу, c), що унеможливує виявлення в сигналі складових, значення частоти яких є чисельно меншими за це відношення. Аналогічно, неможливим у разі застосування ДПФ є розділення складових сигналу, різниця частот між якими є меншою за значення T_c^{-1} . Зазначений висновок підтверджено результатами розрахунку амплітудного спектра ТСг-1, наведеними на рис. 3.1, де застосування ДПФ та ШПФ не дало змоги виокремити компоненти з частотами 0,1 Гц та 0,2 Гц. Очевидно, що обумовлене необхідністю підвищення актуальності результатів аналізу параметрів складових НЧК у режимі реального часу зменшення тривалості спостереження сигналу призведе до погіршення якості результатів аналізу параметрів складових НЧК.

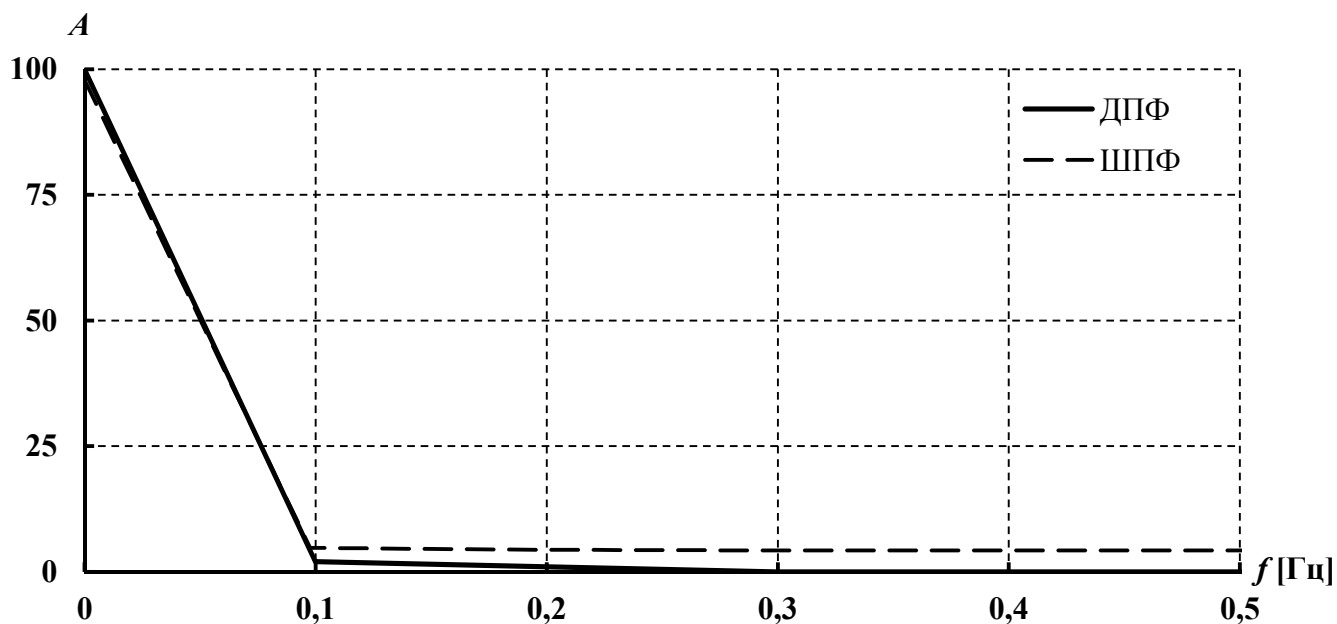


Рисунок 3.1 – Графіки амплітудного спектра ТСг-1, отримані за допомогою ДПФ та ШПФ (розвинення за 501 та 512 точками відповідно)

Слід зазначити, що результати, отримані із застосуванням ШПФ, показали наявність у вибірці даних ТСг-1 складових з частотами, вищими за 0,2 Гц, що не відповідає дійсності та підтверджує погіршення якості результатів аналізу у випадку доповнення вибірки даних сигналу нулями з метою реалізації алгоритму ШПФ. Час виконання розрахунків параметрів складових НЧК вибірки даних ТСг-1 за допомогою ДПФ та ШПФ за умови застосування комп'ютера з процесором Intel Core i3 370М не перевищував 0,01с.

З метою підвищення роздільної здатності ДПФ за частотою необхідним є збільшення тривалості спостереження сигналу T_s , що негативним чином впливає на можливість оперативного визначення параметрів складових НЧК із застосуванням цього методу аналізу. Іншим шляхом підвищення роздільної здатності ДПФ за частотою є застосування апроксимуючих поліномів, проте такий підхід призводить до виникнення побічних складових у результатах аналізу [11].

Важливою особливістю в аспекті забезпечення точності визначення параметрів складових НЧК є наявність у ДПФ спектрального витоку, який проявляє себе за умови наявності у вибірці даних сигналу, яка підлягає аналізу, відліків, які відповідають нецілим періодам. З урахуванням стабільної частоти дискретизації сигналів під час їх реєстрації РМУ, ця проблема стає актуальною, насамперед, для аварійних режимів, які характеризуються відхиленням частоти струму від номінального значення. З метою зменшення спектрального витоку може бути застосовано вагові функції (вікна) різної форми.

Особливістю ДПФ та його модифікацій є можливість безпосереднього визначення лише частоти та амплітуди НЧК, а показник демпфірування тут може бути визначено лише непрямыми методами. Одним із таких методів якісного визначення показника демпфірування є порівняння амплітуд складових НЧК з певною частотою, визначених шляхом аналізу параметрів сигналу, розрахованих для двох послідовних вікон спостереження.

Слід зазначити наявність суттєвих методологічних обмежень застосування ДПФ (ШПФ) з метою забезпечення роботи КІВП НЧК ІСД. Ці обмеження пов'язано з тим, що базис ДПФ (ШПФ) призначений для визначення параметрів лінійних та стаціонарних процесів, у той час як процеси, які ініціюють виникнення в ЕС (ЕО) НЧК, мають нелінійний та нестаціонарний характер [2, 18, 22]. Крім того, наведені в [2, 4, 5, 25] результати досліджень показують наявність суттєвих обмежень щодо

можливості застосування ШПФ (ДПФ) з метою забезпечення роботи КІВП НЧК ІСД у режимі реального часу. Втім, зважаючи на широке застосування модифікацій ДПФ (зокрема, ШПФ) у створених на основі WAMS системах виявлення НЧК, є доцільним застосування ДПФ як порівняльного (референсного) методу аналізу.

3.2.3 Непараметричні методи

Непараметричні методи аналізу сигналів не застосовують з метою розрахунку спектра жодних припущень щодо моделі аналізованого сигналу, тому визначення його параметрів здійснюється виключно на основі інформації, яку містять відліки сигналу. До непараметричних методів аналізу належать періодограма, спектрограма, методи Велча (Welch) та Томсона (Thomson) [22].

Періодограмою є оцінка спектральної густини потужності (СГП), отримана за N відліками однієї реалізації випадкового процесу шляхом усереднення кінцевої кількості доданків. Періодограму розраховують таким чином [18]:

$$W(\omega) = \frac{1}{Nf_d} \left| \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-j\omega kT} \right|^2, \quad (3.2)$$

де f_d – частота дискретизації сигналу.

Порівняння виразів (3.2) та (3.1) показує їх схожість, але, завдяки зведенню до квадрату коефіцієнтів розвинення, домінуючі частоти у випадку побудови періодограми буде виділено більш явно, ніж у випадку застосування ДПФ.

З метою розрахунку СГП за допомогою модифікованої періодограми застосовують вагові функції (вікна) з коефіцієнтами $w(k)$, а (3.2) в цьому випадку набуде вигляду

$$W_M(\omega) = \frac{1}{f_d} \frac{\left| \sum_{k=0}^{N-1} x(k) w(k) e^{-j\omega kT} \right|^2}{\sum_{k=0}^{N-1} |w(k)|^2}.$$

Застосування вагових функцій дає змогу, наприклад, “придушити” високочастотні компоненти спектра, причиною появи яких може бути наявний у сигналі шум (завади).

Важливою особливістю (з огляду на можливість застосування в КІВП НЧК ІСД) є неможливість отримання за допомогою періодограми адекватної оцінки СГП сигналу, оскільки дисперсія такої оцінки може бути близькою до квадрату її математичного очікування незалежно від кількості відліків N у досліджуваній вибірці даних сигналу [22]. Зазначена особливість періодограми суттєво знижує доцільність її застосування в КІВП НЧК ІСД. Застосування періодограми з метою визначення параметрів складових НЧК в ЕС (ЕО) було розглянуто, зокрема, в [2, 58, 95], але питань можливості застосування цього методу аналізу сигналів для виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх складових з метою оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕС (ЕО), а також відповідності зазначеного методу всім наведеним у пункті 3.2.1 вимогам наразі досліджено не було.

Спектрограма являє собою миттєвий спектр сигналу, що залежить від часу. З метою обчислення спектрограми сигнал розбивають на сегменти (як правило, на 8 сегментів з перекриттям їх на 50% [22]), для кожного з яких обчислюють ШПФ. Для відображення зміни амплітуди спектра сигналу з плином часу зазвичай будують графічне зображення спектрограми в координатах “час – частота”, але також може бути отримано графіки амплітудного спектра в координатах “частота – амплітуда”. Спектрограму S певного сигналу розраховують так:

$$S(t, \omega) = |\text{ВПФ}(t, \omega)|^2,$$

де ВПФ – віконне перетворення Фур’є [93].

Застосування віконного перетворення Фур’є під час розрахунку спектрограми дає можливість покращити якість розрахунку частотного спектра на розриві границь вікна спостереження, що може виявитися доцільним для підвищення якості роботи КІВП НЧК ІСД.

Застосування спектрограми з метою визначення параметрів складових НЧК в ЕС (ЕО) було розглянуто, зокрема, в [2, 58, 146], але питань можливості застосування цього методу аналізу сигналів для виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх складових з метою оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕС (ЕО), а також відповідності зазначеного методу всім наведеним у пункті 3.2.1 вимогам наразі досліджено не було.

Метод Велча є модифікацією періодограми. Його відмінностями від періодограми є розбиття вектору відліків сигналу на сегменти з їх перекриттям (як правило, на практиці застосовують перекриття сегментів на 50%), множення кожного сегменту на певну вагову функцію з подальшим обчисленням модифікованої (завдяки застосуванню вагової функції) періодограми за кожним сегментом та їх усередненням. Рекомендована для роботи методу Велча кількість сегментів має бути кратною степені 2 [22]. Виходячи з обмежень ШПФ, зазначена кількість не має бути великою, оскільки це суттєво знижує роздільну здатність методу Велча.

Застосування вагових функцій для сегментів сигналу в методі Велча дає можливість покращити (порівняно з методом періодограми) якість розрахунку частотного спектра завдяки зменшенню розтікання спектра, а застосування перекриття сегментів сигналу – зменшити дисперсію оцінки. Зазначені удосконалення можуть виявитися доцільними для підвищення якості роботи КІВП НЧК ІСД. Застосування методу Велча з метою визначення параметрів складових НЧК в ЕС (ЕО) було розглянуто, зокрема, в [2, 158, 159], але питань можливості застосування цього методу аналізу сигналів для виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх складових з метою оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕС (ЕО), а також відповідності зазначеного методу всім наведеним у пункті 3.2.1 вимогам наразі досліджено не було.

Метод Томсона (в англійській літературі згадується як Multitaper method) застосовує з метою розрахунку спектра сигналу l модифікованих (за допомогою вагових функцій) періодограм $g_{l,n}$, кожна з яких отримана із використанням різних Слєпіанових (Slepian) послідовностей:

$$S_k(f) = \Delta t \left| \sum_{n=0}^{N-1} g_{l,n} x_n e^{-j\omega k \Delta t} \right|^2,$$

де Δt – інтервал між відліками у вибірці даних сигналу, c [154].

Метод Томсона позбавлений деяких недоліків ДПФ (зокрема, забезпечує більш точне визначення відносних фаз для кожного частотного компонента), що може виявитися

доцільним для підвищення якості роботи КІВП НЧК ІСД. Застосування методу Томсона з метою визначення параметрів складових НЧК в ЕС (ЕО) було розглянуто, зокрема, в [2, 159, 160], але питань можливості застосування цього методу аналізу сигналів для виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх складових з метою оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕС (ЕО), а також відповідності зазначеного методу всім наведеним у пункті 3.2.1 вимогам наразі досліджено не було.

Графіки СГП вибірки даних ТСг-1, отримані із застосуванням періодограми, спектрограми, методів Велча та Томсона, наведено на рис. 3.2.

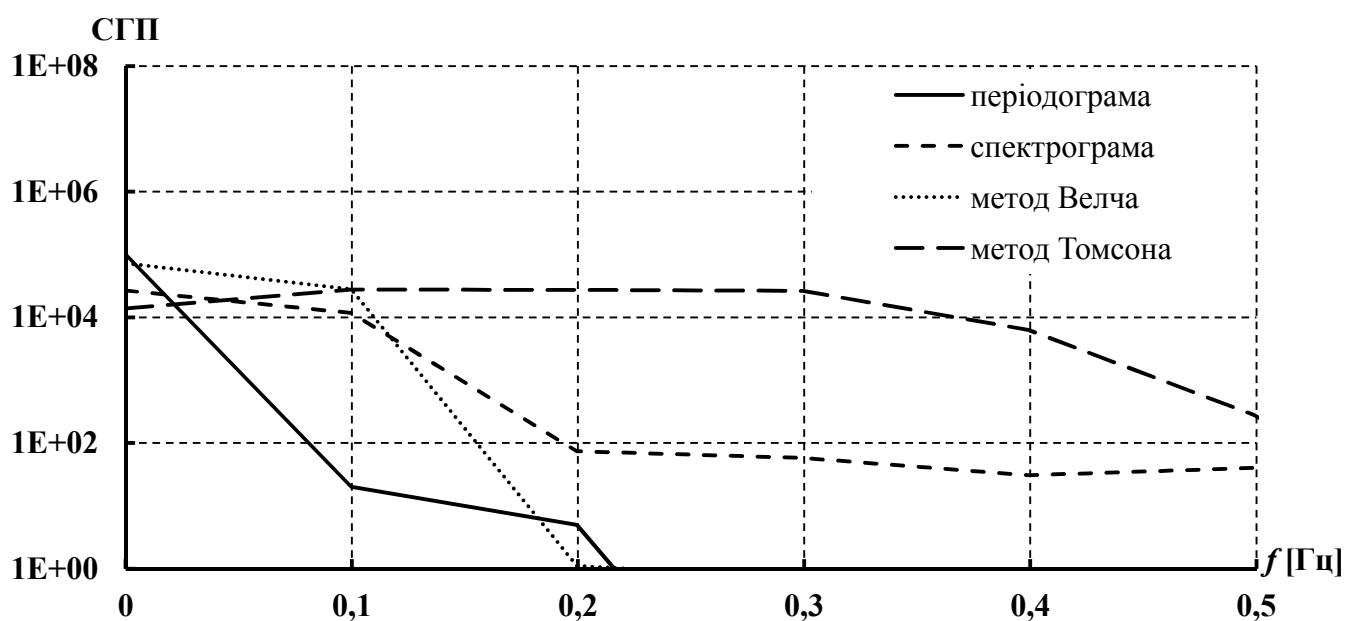


Рисунок 3.2 – Графіки СГП вибірки даних ТСг-1, отримані із застосуванням періодограми, спектрограми, методів Велча та Томсона

Для виконання розрахунків вагові функції (вікна) не застосовувалися, що зменшило кількість факторів, які могли вплинути на результати аналізу. З метою розрахунку СГП вибірки даних ТСг-1 із застосуванням спектрограми та методу Велча було здійснено розбиття вибірки даних ТСг-1 на 8 сегментів (відповідно до наведених у [22] рекомендацій) із максимально можливим їх перекриттям з метою забезпечення найвищої роздільної здатності методів. Час виконання розрахунків параметрів складових НЧК для вибірки даних ТСг-1 за допомогою періодограми, спектрограми, методів Велча та Томсона за умови застосування комп'ютера з процесором Intel Core i3 370M не перевищував 0,01с.

Аналіз графіків на рис. 3.2 показав неспроможність розглянутих непараметричних методів аналізу сигналів виокремити у вибірці даних ТСГ-1 компоненти з частотами 0,1 Гц та 0,2 Гц, що обумовлено наведеним вище обмеженням за граничною роздільною здатністю за частотою ДПФ (ШПФ), на яке “спираються” розглянуті методи. Крім того, графіки СГП, отримані із застосуванням розглянутих непараметричних методів аналізу сигналів, не відповідають реальному графіку СГП ТС-1, оскільки у вибірці даних ТСГ-1 складові з частотою вище 0,2 Гц відсутні. Отже, враховуючи раніше прийняті критерії відбору методів аналізу та беручи до уваги результати проведених досліджень, застосування періодограми, спектрограми, методів Велча та Томсона в КІВП НЧК ІСД є недоцільним.

3.2.4 Параметричні методи

3.2.4.1 Проблема визначення порядку параметричної моделі

Методи аналізу сигналів, в основі яких лежать параметричні моделі, набули розповсюдження завдяки відповідності моделі багатьом реальним задачам. Зокрема, в галузі електроенергетики найбільш часто застосовують методи, які ґрунтуються на авторегресійній та експоненціальній моделях [5, 96, 97, 127, 137, 140, 146, 158, 165].

Із застосуванням авторегресійної моделі сигнал $x(k)$ формують шляхом пропускання дискретного білого шуму $n(k)$ через “чисто рекурсивний” фільтр порядку p . Спектральна густина потужності такого сигналу пропорційна квадрату модуля коефіцієнта функції передачі фільтра [22]:

$$W(\omega) = \frac{\sigma_n^2}{f_d} \cdot \frac{1}{\left| 1 - a_1 e^{-j\omega T} - a_2 e^{-j2\omega T} - \dots - a_N e^{-jN\omega T} \right|^2}, \quad (3.3)$$

де σ_n^2 – потужність білого шуму;

a_i – коефіцієнти авторегресійної моделі із заданим порядком.

На основі експоненціальної моделі будь-який сигнал $x(k)$ у загальному вигляді може бути подано так:

$$x(k) = \sum_{i=1}^p R_i z_i^k = \sum_{i=1}^p R_i e^{k\lambda_i \Delta t}, \quad (3.4)$$

де λ_i – власні числа;

R_i – значення комплексних амплітуд, які визначають на підставі лівого та правого власних векторів системи.

Застосування (3.3) та (3.4) з метою відтворення реального сигналу потребує визначення порядку моделі p з метою найбільш точного відтворення сигналу. Необґрунтований вибір порядку моделі сигналу призводить або до неможливості виявлення всіх компонентів сигналу (у разі заниження порядку моделі), або до появи в результатах аналізу хибних компонентів та суттєвого збільшення часу розрахунку параметрів складових сигналу (у разі завищення порядку моделі). Визначення порядку моделі сигналу може бути здійснено із застосуванням різних підходів: критерію Шварца (Schwarz), узагальненого тесту відношення правдоподібностей (англ. – Generalized Likelihood Ratio Test), “ядро” якого застосовано, зокрема, в алгоритмах інформаційного критерію Акаїкі (англ. – Akaike’s Information Criterion, AIC), принципу мінімальної довжини повідомлення (англ. – Minimum Message Length) та створеного на його основі принципу мінімальної довжини опису (англ. – Minimum Description Length, MDL), методу експоненціально вбудованого сімейства (англ. – Exponentially Embedded Family, EEF), критерія визначення структури моделі (англ. – Model Structure Determination, MSD) та інших [49, 83, 84, 163, 164].

Порядок моделі сигналу із застосуванням найбільш ефективних (з огляду на точність визначення порядку) підходів визначають шляхом максимізації функцій густини ймовірності відповідності (збіжності) розрахованого та реального порядків, загальний вигляд яких наведено в (3.5) (у виразах (3.5) x являє собою значення відліків сигналу, σ^2 є дисперсією, а ξ – параметром, який визначає межі варіювання величин, точне значення яких є невідомим [49, 83].

$$\begin{aligned}
 \text{AIC}(p) &= -\frac{\sum_{n=0}^{p-1} x^2[n]}{\sigma^2} + 2p; \\
 \text{MDL}(p) &= -\frac{\sum_{n=0}^{p-1} x^2[n]}{\sigma^2} + p \ln N; \\
 \text{EEF}(p) &= \left(\frac{\sum_{n=0}^{p-1} x^2[n]}{\sigma^2} - p \left(\ln \frac{\sum_{n=0}^{p-1} x^2[n]}{p\sigma^2} + 1 \right) \right); \\
 \text{MSD}(p) &= \frac{1}{2\sigma^2} \frac{\xi^2}{\xi^2 + 1} \sum_{n=0}^{p-1} x^2[n] - \frac{p}{2} \ln(\xi^2 + 1).
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Порівняння зазначених підходів до визначення порядку моделі сигналу, здійснене, наприклад, у [49, 83, 84, 129], показало, що оцінка порядку моделі, отримана із застосуванням АІС, за точністю оцінювання суттєво поступається оцінкам, отриманим із застосуванням принципу MDL, методу EEF та критерію MSD. При цьому метод EEF та критерій MSD хоча і забезпечують дещо точніший за отриманий із застосуванням принципу MDL результат оцінювання, проте є складнішими, що може обмежувати можливість застосування зазначених методу та критерію в режимі реального часу (особливо в разі аналізу даних вікна спостереження, яке охоплює значний часовий відрізок). Принцип MDL дає дещо завищену оцінку порядку моделі сигналу в порівнянні з його реальним порядком, але в разі наявності в сигналі шумів (завад) таке завищення дає змогу підвищити надійність ідентифікації в його складі домінуючих мод [18, 87]. З урахуванням зазначених чинників у дисертаційній роботі з метою визначення порядку моделі вибірки даних сигналу, яка підлягає аналізу, запропоновано застосовувати принцип MDL. Детально адекватність результатів визначення порядку моделі вибірки даних сигналу за принципом MDL, реалізованим згідно з (3.5), буде досліджено в підпункті 3.2.4.3.

3.2.4.2 Методи авторегресійної моделі

З метою визначення коефіцієнтів a_i авторегресійної моделі (3.3) виконують мінімізацію помилки лінійного передбачення сигналу. Сутність цього методу полягає в тому, що сигнал $x(k)$ пропускають через нерекурсивний фільтр. Зважена сума попередніх відліків вхідного сигналу є лінійним передбаченням наступного вхідного відліку, а вихідний сигнал розглянутого фільтра (тобто різниця між дійсним і передбаченим значеннями відліку) – помилкою передбачення [22].

Найпоширенішими методами авторегресійної моделі є метод Юла–Волкера (Yule–Walker), Берга (Burg), коваріаційний та модифікований коваріаційний методи. Ці методи, на відміну від непараметричних, потребують вибору порядку авторегресійної моделі.

Метод Юла–Волкера (метод визначення кореляційної функції) полягає в розв’язанні однойменних рівнянь, куди замість значень невідомої автокореляційної функції підставляють її оцінки [18]:

$$\gamma_m = \sum_{i=1}^p \phi_i \gamma_{m-1} + \sigma_\varepsilon^2 \delta_m,$$

де γ_m – автокореляційна функція авторегресійної моделі;

σ_ε – стандартне відхилення вхідного шуму;

δ_m – дельта-функція Кронекера (Kronecker);

p – порядок авторегресійної моделі; $m = 0 \dots p$.

Перевагою методу (з огляду на можливість його застосування в КІВП НЧК ІСД) є стабільність формуючого фільтра, недоліками – отримання неточних результатів розрахунку за умови аналізу даних вікон спостереження, які охоплюють короткі часові відрізки (що є важливим для розрахунку параметрів складових НЧК у режимі реального часу), та наявність зміщених спектральних піків у результатах розрахунку у випадку, коли сигнал, вибірка даних якого підлягає аналізу, є сумою синусоїд з шумом (що є характерним для процесів виникнення НЧК в ЕС (ЕО)) [22]. Застосування методу Юла–Волкера з метою визначення параметрів складових НЧК в ЕС (ЕО) розглядалося, зокрема, в [158, 159, 160], але питань можливості застосування цього методу аналізу сигналів для виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх складових з метою оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕС (ЕО), а також відповідності зазначеного методу всім наведеним у пункті 3.2.1 вимогам наразі досліджено не було.

Гармонічний алгоритм Берга потребує рекурсивного розв'язання рівнянь (3.3) методом Левінсона, що пов'язує авторегресійні параметри порядку p з параметрами порядку $p-1$ згідно виразу

$$a_p[n] = a_{p-1}[n] + k_p a_{p-1}[p-n],$$

де k_p – коефіцієнт відбиття, який визначають за відомим значенням автокореляційної функції;

n – ціле число в діапазоні $1 \dots p-1$ [18].

Оцінювання коефіцієнта відбиття виконують з використанням методу найменших квадратів. Для кожного значення порядку p з його застосуванням мінімізують арифметичне середнє потужності помилок лінійного передбачення. Для методу Берга оцінювання коефіцієнта відбиття здійснюють так:

$$\hat{k}_p = a_p = \frac{-2 \sum_{n=p+1}^N e_{p-1}^f[n] e_{p-1}^{b*}[n-1]}{\sum_{n=p+1}^N |e_{p-1}^f[n]|^2 + \sum_{n=p+1}^N |e_{p-1}^b[n-1]|^2},$$

де $e_p^f[n]$ та $e_p^b[n]$ – помилки лінійного передбачення “вперед” (верхній індекс f) і “назад” (верхній індекс b).

Перевагами методу Берга (з огляду на можливість його застосування в КІВП НЧК ІСД) є стабільність формуючого фільтра та висока роздільна здатність у випадку аналізу даних вікон спостереження, які охоплюють короткі часові відрізки (що є важливим для розрахунку параметрів складових НЧК у режимі реального часу), недоліками – залежність положення спектральних піків від початкових фаз синусоїд та наявність зміщених спектральних піків у результатах розрахунку в разі, якщо сигнал, вибірка даних якого підлягає аналізу, є сумою синусоїд з шумом [22]. Застосування методу Берга з метою визначення параметрів мод НЧК в ЕС (ЕО) та в медицині розглядалося, зокрема, в [88, 140], але питань можливості застосування цього методу аналізу сигналів для виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх складових з метою оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕС (ЕО), а також відповідності зазначеного методу всім наведеним у пункті 3.2.1 вимогам наразі досліджено не було.

Коваріаційний алгоритм являє собою алгоритм спектрального оцінювання за методом найменших квадратів, де зазначеним методом виконують оптимізацію коефіцієнта відбиття [18]. У реалізації цього методу застосовують окремі лінійні передбачення “вперед” (для поточного відліку даних результат передбачення є зваженою сумою з p попередніх відліків) та “назад” (для поточного відліку даних результат передбачення є зваженою сумою з p наступних відліків).

Оцінки лінійного передбачення “вперед” та “назад” для вибірки даних сигналу $x[n]$ мають вигляд

$$\hat{x}^f[n] = -\sum_{k=1}^p a_p^f[k] x[n-k];$$

$$\hat{x}^b[n] = -\sum_{k=1}^p a_p^b[k] x[k+p],$$

де $a_p^f[k]$ та $a_p^b[k]$ – відповідно, коефіцієнти лінійного передбачення “вперед” та “назад” порядку p [18].

Помилки лінійного передбачення “вперед” та “назад” визначають так:

$$e_p^f[n] = x[n] - \hat{x}^f[n] = x[n] + \sum_{k=1}^p a_p^f[k] x[n-k];$$

$$e_p^b[n] = x[n-p] - \hat{x}^b[n][n-p] = x[n-p] + \sum_{k=1}^p a_p^b[k] x[n-p-k].$$

На основі розрахованих за допомогою коваріаційного методу параметрів авторегресії визначають СГП сигналу, який підлягає аналізу.

Перевагами коваріаційного алгоритму (з огляду на можливість його застосування в КІВП НЧК ІСД) є забезпечення доволі високої роздільної здатності за частотою у випадку аналізу даних вікон спостереження, які охоплюють короткі часові відрізки, недоліками – наявність зміщених спектральних піків у результатах розрахунку в разі, якщо аналізований сигнал є сумою синусоїд з шумом, та можлива нестабільність розрахованого формуючого фільтра [22]. Застосування коваріаційного методу з метою визначення параметрів складових НЧК в ЕС (ЕО) розглядалося, зокрема, в [127, 146], але питань можливості застосування цього методу аналізу сигналів для виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх складових з метою оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕС (ЕО), а також відповідності зазначеного методу всім наведеним у пункті 3.2.1 вимогам наразі досліджено не було.

Модифікований коваріаційний метод відрізняється від коваріаційного способом розрахунку помилки лінійного передбачення “назад”, яку визначають так [18]:

$$e_p^b[n] = x[n-p] + \sum_{k=1}^p a_p^{f*}[k] x[n-p+k].$$

Перевагами модифікованого коваріаційного методу (з огляду на можливість його застосування в КІВП НЧК ІСД) є забезпечення доволі високої роздільної здатності за частотою у випадку аналізу даних вікон спостереження, які охоплюють короткі часові відрізки процесу, та відсутність розщеплення спектральних піків, недоліками – залежність

положення спектральних піків від початкових фаз синусоїд, наявність зміщених спектральних піків у результатах розрахунку в разі, якщо сигнал, вибірка даних якого підлягає аналізу, є сумою синусоїд з шумом, та можлива нестабільність розрахованого формуючого фільтра [22].

Застосування модифікованого коваріаційного методу з метою визначення параметрів складових НЧК в ЕС (ЕО) і в медицині розглядалося, зокрема, в [62, 146, 162], але питань можливості застосування цього методу аналізу сигналів для виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх складових з метою оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕС (ЕО), а також відповідності зазначеного методу всім наведеним у пункті 3.2.1 вимогам наразі досліджено не було.

Графіки СГП вибірки даних ТСг-1, отримані із застосуванням методів Берга, Юла-Волкера, коваріаційного та модифікованого коваріаційного методів, наведено на рис. 3.3.

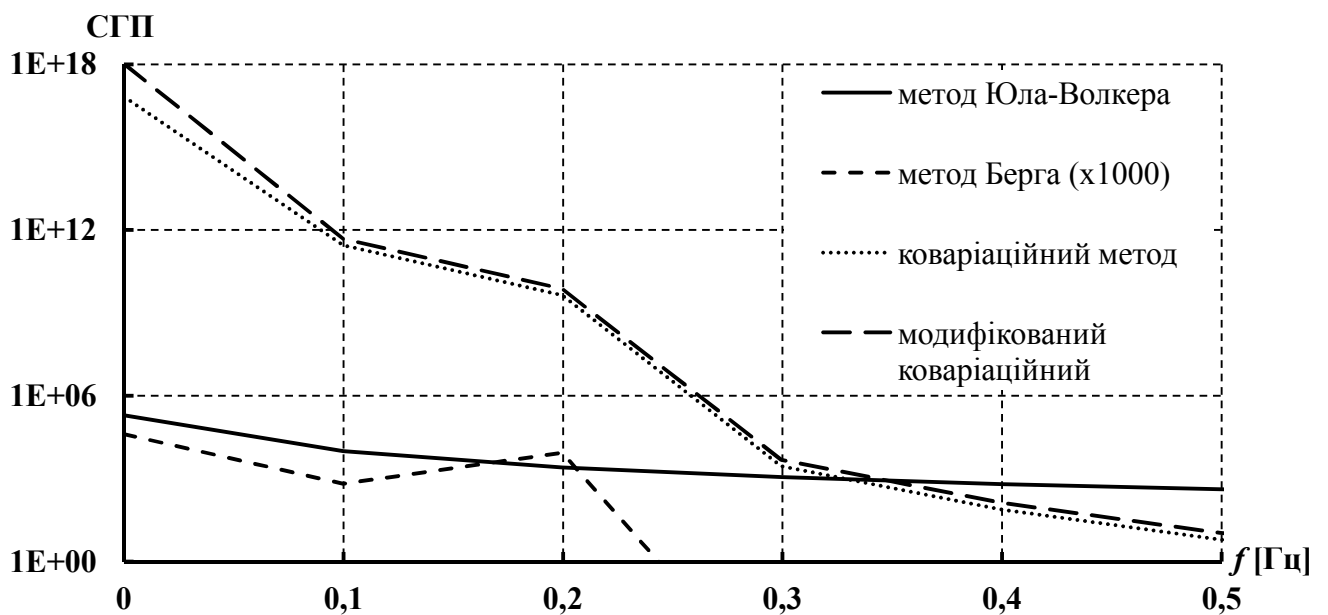


Рисунок 3.3 – Графіки СГП вибірки даних ТСг-1, отримані із застосуванням методів Юла-Волкера, Берга, коваріаційного та модифікованого коваріаційного методів

Час виконання розрахунків параметрів складових НЧК для вибірки даних ТСг-1 за допомогою розглянутих методів аналізу сигналів авторегресійної моделі за умови застосування комп'ютера з процесором Intel Core i3 370М не перевищував 0,01с. Порядок моделі для кожного методу аналізу сигналів тут було визначено не на основі принципу MDL (з метою виключення можливості впливу на результати аналізу завищення

або зниження порядку моделі сигналу), а шляхом підбирання, що забезпечило для кожного з методів найкращі результати аналізу. Втім, навіть за такої умови досліджені методи авторегресійної моделі показали неспроможність виокремити у вибірці даних ТСГ-1 компоненти з частотами 0,1 Гц та 0,2 Гц (рис. 3.3). Крім того, графіки СГП, отримані із застосуванням цих методів, не відповідають реальному графіку СГП ТС-1, оскільки у вибірці даних ТСГ-1 складові з частотою вище 0,2 Гц відсутні. Отже, враховуючи раніше визначені вимоги до методів аналізу сигналів, застосування методів Юла-Волкера, Берга, коваріаційного та модифікованого коваріаційного методів у КІВП НЧК ІСД є недоцільним.

3.2.4.3 Методи експоненціальної моделі

Методи експоненціальної моделі набули широкого розповсюдження в задачах визначення параметрів складових НЧК в ЕС (ЕО) [5, 96, 97, 137, 165]. Експоненціальна модель подання сигналу є основою методів багатократної класифікації сигналів (англ. – Multiple Signal Classification, MUSIC), власних векторів (англ. – Eigen- Vector, EV), загальних найменших квадратів Ганкеля (англ. – Hankel Total Least Squares, HTLS), МР, Проні.

Метод MUSIC застосовують для спектрального аналізу сигналів, які можна подати як суму декількох синусоїд (у загальному випадку – декількох комплексних експонент) з білим шумом. Спектр комплексної експоненти, розрахований аналітично, являє собою дельта-функцію, розвинену на відповідній частоті. З метою отримання нескінчених викидів на частотах ω , псевдоспектр (залежність рівня сигналу від частоти) для цього методу розраховують так:

$$W(\omega) = \frac{1}{\sum_{k=M+1}^p \left| \sum_{n=0}^{p-1} v_k(n) e^{-j\omega n T} \right|^2},$$

де M – кількість комплексних експонент у сигналі;

T – період дискретизації;

$v_k(n)$ – n -й елемент k -го власного вектору кореляційної матриці [22].

Можливість застосування методу MUSIC з метою визначення параметрів складових НЧК в ЕС (ЕО) розглядалося, зокрема, в [165, 169], але питань можливості застосування цього методу аналізу сигналів для виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх складових з метою оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення

стійкості ЕС (ЕО), а також відповідності зазначеного методу всім наведеним у пункті 3.2.1 вимогам наразі досліджено не було.

Відмінність методу EV від методу MUSIC полягає в тому, що з метою розрахунку псевдоспектра за методом EV застосовують вагові коефіцієнти, обернено пропорційні до відповідних власних чисел λ_k :

$$W(\omega) = \frac{1}{\sum_{k=M+1}^N \frac{1}{\lambda_k} \left| \sum_{n=0}^{N-1} v_k(n) e^{-j\omega n T} \right|^2}.$$

Результати аналізу власних векторів дають змогу доповнити результати аналізу, отримані шляхом розрахунку власних чисел, інформацією щодо оглядовості НЧК, керованості режиму ЕС (ЕО), визначення місць розташування PSS, які мають найбільший вплив на демпфірування НЧК [137]. Можливість застосування методу EV з метою визначення параметрів складових НЧК в ЕС (ЕО) розглядалося, зокрема, в [36, 137, 143], але питань можливості застосування цього методу аналізу сигналів для виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх складових з метою оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕС (ЕО), а також відповідності зазначеного методу всім наведеним у пункті 3.2.1 вимогам наразі досліджено не було.

Метод HTLS є відносно новим методом, що базується на експоненціальній моделі сигналу. Основу методу HTLS складають задача розвинення за власними числами матриці Ганкеля та проблема загальних найменших квадратів. Матрицю Ганкеля формують на основі сигналу $x(k)$ з кількістю відліків N таким чином:

$$[H] = \begin{bmatrix} x(0) & x(1) & \dots & x(M-1) \\ x(1) & x(2) & \dots & x(M) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x(L-1) & x(L) & \dots & x(N) \end{bmatrix},$$

де L – параметр, значення якого обирають більшим за порядок експоненціальної моделі p ;

M – параметр, значення якого становить $N+1-L$.

Згідно з (3.4), матрицю $[H]$ можна записати як

$$[H] = [S][R][T]^T, \quad (3.6)$$

де $[R]$ – діагональна матриця розмірністю $p \times p$;

$[S]$, $[T]^T$ – матриці Вандермонда, які мають такий вигляд:

$$[S] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1^1 & z_2^1 & \dots & z_p^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_1^L & z_2^L & \dots & z_p^L \end{bmatrix}_{(L+1) \times p}; \quad [T]^T = \begin{bmatrix} 1 & z_1^1 & \dots & z_1^{M-1} \\ 1 & z_2^1 & \dots & z_2^{M-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & z_p^1 & \dots & z_p^{M-1} \end{bmatrix}_{p \times M}$$

Матриця $[S]$ є інваріантною відносно зсуву, що визначають як

$$[S]_{\downarrow}[Z] = [S]_{\uparrow},$$

де матриця $[Z]$ є діагональною з розмірністю $p \times p$, а символ “ \uparrow ” (“ \downarrow ”) означає видалення в матриці верхнього (нижнього) рядка.

Матрицю Ганкеля може бути перетворено шляхом її сингулярного розвинення:

$$[H] = [U][\Sigma][V]^* = \begin{bmatrix} \hat{U} & U_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\Sigma} & \\ & \Sigma_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V} \\ V_0 \end{bmatrix}^*, \quad (3.7)$$

де $*$ – символ комплексного спряження і транспонування;

$[\Sigma]$ – діагональна матриця з сингулярними значеннями, розташованими в порядку зменшення;

$[U]$, $[V]$ – матриці, добутки вигляду $[U][U]^*$ та $[V][V]^*$ яких дають одиничну матрицю.

Підматриця $[\hat{\Sigma}]$ в (3.7) містить перші p сингулярних значень. Підматриця $[\Sigma_0]$ є нульовою в разі відсутності шуму (завад) у вихідному сигналі, а за його наявності містить малі сингулярні значення на діагоналі. Тоді для першого випадку можна записати

$$[H] = [\hat{U}] [\hat{\Sigma}] [\hat{V}]^*$$

звідки, з урахуванням (3.6), одержимо

$$[\hat{U}] = [S] [Q],$$

де $[Q]$ – невироджена матриця розмірністю $p \times p$.

Враховуючи властивості матриць $[S]$ та $[\hat{U}]$ та введені раніше позначення, можна записати

$$\begin{aligned} [\hat{U}]_{\downarrow} &= [S]_{\downarrow} [Q]; \\ [\hat{U}]_{\uparrow} &= [S]_{\uparrow} [Q], \end{aligned}$$

звідки випливає співвідношення

$$[\hat{U}]_{\uparrow} = [S]_{\downarrow} [Z] [Q] = [\hat{U}]_{\downarrow} [Q]^{-1} [Z] [Q] = [\hat{U}]_{\downarrow} [\tilde{Z}],$$

де матриця $[\tilde{Z}]$ має ті ж самі власні значення, що і матриця $[Z]$ [97].

Застосування методу HTLS з метою визначення параметрів мод НЧК в ЕС (ЕО) розглядалося, зокрема, в [97, 151, 161]. У [97] було показано достатню (виходячи з поставлених у пункті 3.2.1 вимог) роздільну здатність методу HTLS за частотою та можливість його застосування в режимі реального часу для аналізу параметрів сигналів у разі застосування вікна спостереження шириною $10c$, але питання можливості застосування цього методу аналізу сигналів для виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх складових з метою оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕС (ЕО) наразі досліджено не було.

Метод МР ґрунтується на визначенні пучка, який для функцій $g(t)$ та $h(t)$, що не є лінійною комбінацією одна одної, записують як

$$f(t, \lambda') = g(t) + \lambda' \cdot h(t), \quad (3.8)$$

де λ' – певний скалярний параметр.

Пучок функцій $f(t, \lambda')$ дає можливість визначити для дискретного сигналу $x(k)$ значення z_i на основі відповідним чином підібраних $g(t)$, $h(t)$ та λ' . На основі N відліків дискретного сигналу x та значення параметра пучка L можна сформувати дві матриці пучка такого вигляду:

$$[Y_1] = \begin{bmatrix} x(0) & x(1) & \dots & x(L-1) \\ x(1) & x(2) & \dots & x(L) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x(N-L-1) & x(N-L) & \dots & x(N-2) \end{bmatrix}_{(N-L) \times L};$$

$$[Y_2] = \begin{bmatrix} x(1) & x(2) & \dots & x(L) \\ x(2) & x(3) & \dots & x(L+1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x(N-L) & x(N-L+1) & \dots & x(N-1) \end{bmatrix}_{(N-L) \times L}.$$

Відповідно до виразу (3.4), матриці $[Y_1]$ та $[Y_2]$ можна записати як

$$[Y_1] = [Z_1][R][Z_2];$$

$$[Y_2] = [Z_1][R][Z_0][Z_2],$$

де $[Z_0]$, $[R]$ – діагональні матриці розмірністю $p \times p$;

$[Z_1]$, $[Z_2]$ – матриці, які мають такий вигляд:

$$[Z_1] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_p \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_1^{N-L-1} & z_2^{N-L-1} & \dots & z_p^{N-L-1} \end{bmatrix}_{(N-L) \times p}; \quad [Z_2] = \begin{bmatrix} 1 & z_1 & \dots & z_1^{L-1} \\ 1 & z_2 & \dots & z_2^{L-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & z_p & \dots & z_p^{L-1} \end{bmatrix}_{p \times L}.$$

З урахуванням (3.8) та введених позначень пучок матриць можна записати

$$[Y_2] - \lambda[Y_1] = [Z_1][R]([Z_0] - \lambda[I])[Z_2],$$

де I – одинична матриця розмірністю $p \times p$.

Якщо $p \leq L \leq N-p$ та $\lambda \neq z_i$ ранг різницевої матриці $([Y_2] - \lambda[Y_1])$ дорівнює p , а за умови $\lambda = z_i$ ранг буде меншим на 1. Таким чином, параметри z_i є узагальненими власними значеннями пари матриць $[Y_2]$ та $[Y_1]$, для знаходження яких необхідно розрахувати власні числа результуючої матриці

$$[Y_1]^+ [Y_2] - \lambda[I],$$

де $[Y_1]^+ = ([Y_1] [Y_1])^{-1}[Y_1]$ – псевдообернена до $[Y_1]$ матриця Мура-Пенроуза (Moore-Penrose).

Застосування методу МР з метою визначення параметрів складових НЧК в ЕС (ЕО) розглядалося, зокрема, в [96, 128, 170]. У [97] було показано достатню (виходячи з поставлених у пункті 3.2.1 вимог) роздільну здатність методу МР за частотою та можливість його застосування в режимі реального часу для аналізу параметрів сигналів у разі застосування вікна спостереження шириною $10c$, але питання можливості застосування цього методу аналізу сигналів для виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх складових з метою оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕС (ЕО) наразі досліджено не було.

Основу методу Проні складає задача відтворення вихідного сигналу за допомогою суми експоненціальних складових. За методом Проні вираз (3.4) подають у вигляді

$$\begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \dots \\ x(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_p \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_p^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \dots \\ R_p \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Корені поліному p -го порядку задовольняють умові

$$z^p - (a_1 z^{p-1} + a_2 z^{p-2} + \dots + a_p z^0) = 0, \quad (3.10)$$

де коефіцієнти a_i є невідомими.

Помножуючи p разів (3.9) зліва з обох боків на вектор коефіцієнтів a_i отримуємо

$$\begin{bmatrix} x(p) \\ x(p+1) \\ \dots \\ x(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(p-1) & x(p-2) & \dots & x(0) \\ x(p) & x(p-1) & \dots & x(1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x(N-2) & x(N-3) & \dots & x(N-p-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_p \end{bmatrix}, \quad (3.11)$$

де матриця в правій частині являє собою сигнальну матрицю.

З урахуванням (3.11) алгоритм методу Проні можна подати так:

- 1) розв'язання рівняння (3.11) з метою визначення коефіцієнтів a_i ;
- 2) розрахунок коренів рівняння (3.10) з метою визначення z_i ;
- 3) розв'язання рівняння (3.9) з метою визначення комплексних залишків R_i .

Важливою особливістю методу Проні є можливість проведення одночасного аналізу декількох (наприклад, m) сигналів $x(t)$. У цьому випадку вираз (3.9) набуде вигляду

$$\begin{bmatrix} x_1(0) & x_2(0) & \dots & x_m(0) \\ x_1(1) & x_2(1) & \dots & x_m(1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1(N-1) & x_2(N-1) & \dots & x_m(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_p \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_p^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1^1 & R_1^2 & \dots & R_1^m \\ R_2^1 & R_2^2 & \dots & R_2^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_p^1 & R_p^2 & \dots & R_p^m \end{bmatrix}$$

і з метою визначення на його основі залишків R_i попередньо за принципом найменших квадратів з системи з $(N-p)$ m рівнянь необхідно визначити p невідомих коефіцієнтів a_i [97].

Недоліком “класичного” методу Проні (з огляду на можливість його застосування в КІВП НЧК ІСД) є обмежена можливість одержання з його використанням невикривлених

результатів аналізу сигналів, які містять шуми (завади) [18, 79]. Зокрема, в [63] було зазначено, що метод Проні забезпечує надійність результатів аналізу у разі відношень сигнал/шум (англ. – Signal-to-Noise Ratio, SNR) 80 дБ та вище. У той же час у [54, 99, 104] було показано, що для WAMS із цифровими каналами зв'язку SNR зазвичай є не нижчим від 78 дБ, а після збурення вже за 15с SNR може перевищувати 120 дБ [63, 139]. Можливість отримання адекватних результатів аналізу сигналів з SNR, нижчим від 20 дБ, для “класичного” методу Проні було показано, зокрема, в [92, 97], проте в [153] було зазначено, що сигнали, отримані від PMU в перші моменти після виникнення інтенсивних збурень в ЕС (ЕО), характеризуються доволі низьким SNR (2...10 дБ), що може унеможливити застосування “класичного” методу Проні для визначення параметрів складових таких сигналів.

З метою зменшення впливу наявних у сигналі шумів (завад) на результати визначення параметрів його складових у різний час було запропоновано низку модифікацій методу Проні, наприклад:

- з проведенням аналізу нулів характеристичних поліномів, сформованих із комплексно-спряжених коефіцієнтів лінійного передбачення “вперед” та “назад”, та застосуванням розвинення за сингулярними числами [18];
- із застосуванням оцінки максимальної вірогідності для Гаусового шуму в сигналі [115], в якій оцінюють функцію, яка задовольняє однорідному лінійному диференціальному рівнянню;
 - для аналізу сигналів, які містять дійсні синусоїди [79];
 - для аналізу сигналів, які містять експоненціальні складові та уявні експоненти в комплексному шумі [90].

У дисертаційній роботі з метою зменшення впливу шуму (завад) на результати аналізу за методом Проні запропоновано застосування модифікації цього методу, відповідно до якої під час розв'язання системи рівнянь (3.11) застосовують спосіб розвинення за сингулярними числами, що ґрунтується на методі найменших квадратів [63]. Тут власні вектори, яким відповідають власні числа, що є меншими за задане граничне значення, вважають векторами шуму (завад). Розвинення сигнальної матриці з (3.11) у такому разі набуває вигляду

$$S = \sum_{i=1}^L \lambda_i u_i \overline{v_i}, \quad (3.12)$$

де u_i, v_i – лівий та правий сингулярні вектори матриці S ;

L – кількість складових сигналу, власні числа яких є більшими за задане граничне значення;

λ_i – власні значення, для яких має місце таке співвідношення: $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_L \geq \lambda_{\text{гр}}$.

З урахуванням (3.12) вектор коефіцієнтів a_i з (3.11) визначають так:

$$A = \sum_{i=1}^L \frac{1}{\lambda_i} v_i u_i \overline{X},$$

де X – вектор ліворуч від знаку рівності в (3.11), розмірність якого зменшено з урахуванням кількості виявлених компонентів шуму (завад).

Порівняння ефективності (з огляду на можливість визначення параметрів мод НЧК у режимі реального часу) “класичного” та модифікованого методу Проні в дисертаційній роботі було виконано шляхом співставлення результатів розрахунку параметрів мод НЧК, спричинених різким зменшенням (на 216 МВт) потоку активної потужності по МЗ у ТС з [89], яке відбулося на 18с розглядуваного процесу (рис. 3.4).

Результати розрахунку амплітуди домінантної моди вибірки даних сигналу з [63] з частотою близько 0,69 Гц “класичним” та модифікованим методами Проні наведено на рис. 3.5 (тут запуск “класичного” методу Проні було здійснено починаючи з моменту збільшення SNR сигналу, вибірка даних якого підлягає аналізу, до 80 дБ з метою забезпечення надійності результатів аналізу відповідно до [63]). Аналіз графіків на рис. 3.5 показав, що “класичний” метод Проні забезпечив визначення амплітуди НЧК лише через 28с після виникнення збурення, а модифікований метод Проні – вже через 1с. Слід зазначити, що значення частоти НЧК, визначені за допомогою обох методів, виявилися однаковими.

Застосування методу Проні з метою визначення параметрів складових НЧК в ЕС (ЕО) розглядалося, зокрема, в [5, 10, 30, 92, 126, 161]. У [97, 119] було показано достатню (виходячи з поставлених у пункті 3.2.1 вимог) роздільну здатність методу Проні

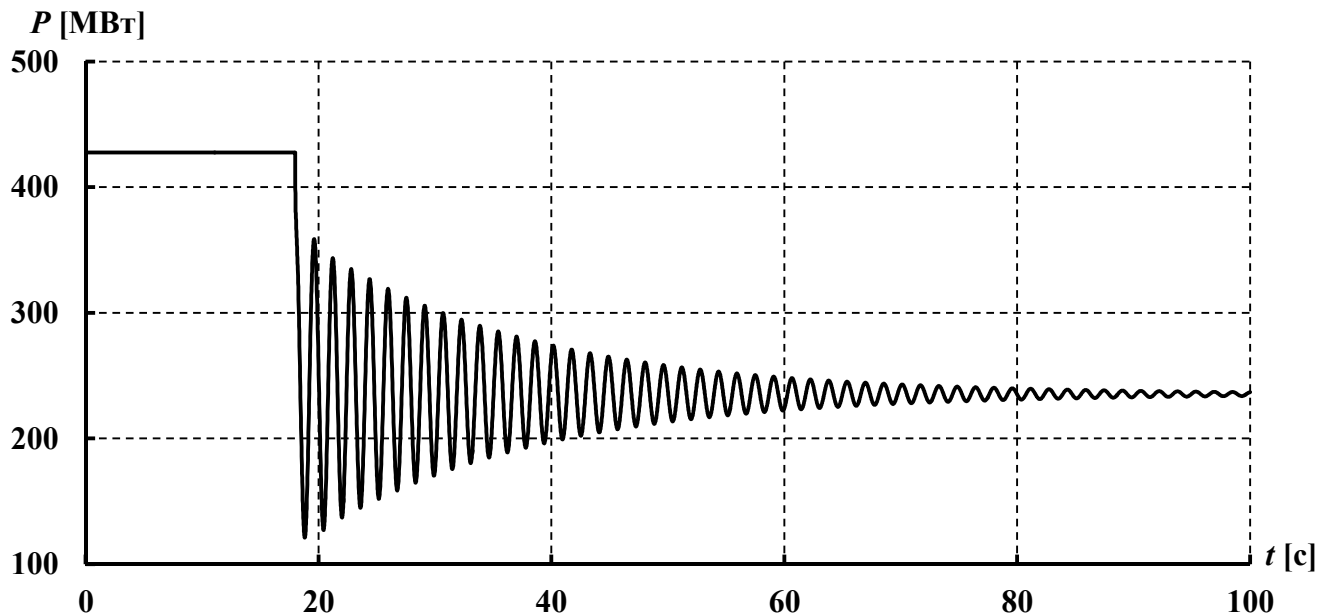


Рисунок 3.4 – Графік НЧК потоку активної потужності по МЗ, спричинених різким зменшенням споживання в дефіцитній ЕС ТС з [89]

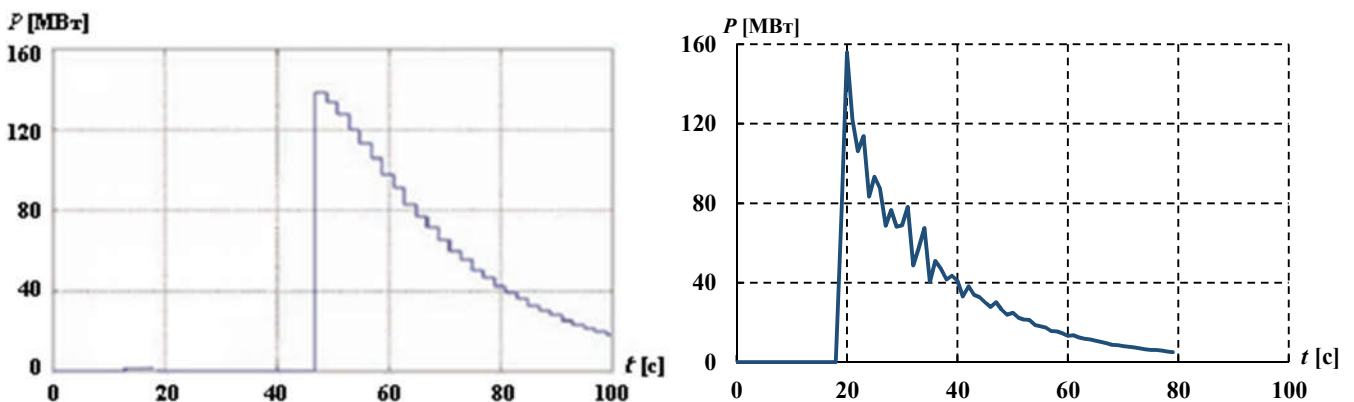


Рисунок 3.5 – Графіки зміни амплітуди НЧК потоку активної потужності, отримані для умов застосування “класичного” (ліворуч) та модифікованого (праворуч) методів Проні

за частотою та можливість його застосування в режимі реального часу для аналізу параметрів сигналів у разі застосування вікна спостереження шириною 10с, але питання можливості застосування цього методу аналізу сигналів для виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх складових з метою оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕС (ЕО) наразі досліджено не було.

Результати аналізу вибірки даних ТСГ-1 із застосуванням методів MUSIC, EV, HTLS, MP та Проні наведено в табл. 3.1. Слід зазначити, що тут і далі в таблицях результатів не наведено значення параметрів, які відповідають складовій сигналу з частотою 0 Гц, оскільки зазначена частота перебуває поза “проблемним” діапазоном частот НЧК.

Таблиця 3.1 – Результати аналізу вибірки даних ТСГ-1 із застосуванням методів MUSIC, EV, HTLS, MP та Проні

№ з/п	Метод	Визначені параметри складових НЧК			Час розрахунку, с
		частота, f , Гц	амплітуда, A	показник демпфірування, ξ	
1	MUSIC	0,12	2,3	–	0,022
		0,21	1,2	–	
2	EV	0,13	2,6	–	0,022
		0,22	1,1	–	
3	HTLS	0,10	2,0	0,000	0,058
		0,20	1,0	0,000	
4	MP	0,10	2,0	0,000	0,056
		0,20	1,0	0,000	
5	Проні (“класичний”)	0,10	2,0	0,000	0,065
		0,20	1,0	0,000	
	Проні (модифікований)	0,10	2,0	0,000	0,297
		0,20	1,0	0,000	

Наведений у табл. 3.1 час розрахунку було отримано за умови застосування комп’ютера з процесором Intel Core i3 370M. Варто підкреслити значне (практично на порядок), зростання часу, необхідного для виконання розрахунку параметрів ТСГ-1 модифікованим методом Проні в порівнянні з “класичним” методом, що, втім, не призводить до порушення вимоги щодо необхідної швидкодії методів аналізу, наведеної в пункті 3.2.1.

Аналіз даних табл. 3.1 показав, що методи HTLS, MP та Проні забезпечили високу точність визначення усіх параметрів складових НЧК вибірки даних ТСГ-1.

Порядок експоненціальної моделі вибірки даних ТСГ-1 під час застосування методів аналізу, наведених у табл. 3.1, було визначено на основі принципу MDL (реалізованому відповідно до (3.5)), згідно з яким вибірку даних ТСГ-1 було описано моделлю 10-го порядку. Очевидно, що така оцінка порядку моделі сигналу є завищеною, оскільки реальний порядок моделі ТСГ-1 становить 5 або 6 (залежно від відсутності чи наявності умови щодо парної кількості компонентів сигналу в алгоритмах методів аналізу). Втім, результати

аналізу вибірки даних ТСг-1 із застосуванням методів експоненціальної моделі та моделей різного порядку, наведені в табл. Е.1 додатку Е, приводять до висновку щодо доцільності завищення (порівняно з реальним) порядку моделі сигналу під час аналізу його параметрів, що підтверджує висновки, зроблені в [18, 87]. Так, для методів MUSIC та EV адекватне визначення параметрів складових НЧК стало можливим тільки за умови застосування моделей сигналу 8-го та 10-го порядку відповідно, а для методу MP застосування моделі сигналу 8-го порядку дало точніші результати за частотами та амплітудами складових НЧК, ніж у випадку застосування реального порядку моделі сигналу.

Застосування під час аналізу параметрів мод НЧК моделі сигналу з заниженим порядком призводить до неможливості виділення всіх компонентів сигналу та визначення їх параметрів. Так, у разі застосування моделі 4-го порядку для вибірки даних ТСг-1 лише модифікований метод Проні виявився здатним розділити компоненти з частотами 0,1 Гц та 0,2 Гц, що, втім, пов'язано виключно з наслідками “фільтрації” в алгоритмі цього методу компонента з частотою 0 Гц (який відповідає основній гармоніці промислового струму за умови застосування з метою проведення аналізу вибірок даних сигналів з діючими значеннями режимних параметрів), і, таким чином, зі зменшенням фактичного порядку моделі сигналу до 4-го.

Застосування під час аналізу параметрів мод НЧК моделі сигналу з надмірно завищеним порядком також є недоцільним, оскільки це призводить до:

- появи “фантомних” компонентів у результатах аналізу, які в подальшому мають бути певним чином відфільтровані (наприклад, у табл. Е.1 додатку Е було відфільтровано усі компоненти, амплітуда яких була меншою від 0,1);
- певного погіршення адекватності результатів аналізу для деяких методів (зокрема, для методів MUSIC та EV застосування моделей сигналу 16-го та 20-го порядків призвело до виникнення суттєвих відхилень між значеннями розрахованих та реальних амплітуд низькочастотних складових ТСг-1, хоча і покращило точність результатів за частотою);
- збільшення тривалості розрахунків, що засвідчують дані табл. 3.2.

У табл. 3.2 наведено відносне збільшення часу розрахунку параметрів ТСг-1 у разі застосування моделі певного порядку в порівнянні з часом розрахунку за умови застосування моделі, порядок якої визначено за принципом MDL, реалізованим за (3.5).

Таблиця 3.2 – Вплив порядку експоненціальної моделі сигналу на тривалість розрахунків

№ з/п	Метод	Відносний час розрахунку параметрів ТСг-1 залежно від порядку експоненціальної моделі				
		10 (MDL)	20	30	40	50
1	MUSIC	1,0	1,7	2,5	4,0	6,0
2	EV	1,0	1,7	2,9	5,7	8,1
3	HTLS	1,0	1,2	1,3	1,5	1,7
4	MP	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
5	Проні (“класичний”)	1,0	1,2	1,3	1,6	1,9
	Проні (модифікований)	1,0	1,1	1,1	1,2	1,4

Аналіз даних табл. 3.2 показує, що збільшення витрат часу на виконання розрахунків, спричинене застосуванням експоненціальної моделі сигналу із завищеним порядком, є нелінійним і суттєво залежить від методу аналізу.

Отже, за результатами проведених досліджень щодо придатності методів експоненціальної моделі для роботи в КІВП НЧК ІСД було зроблено такі висновки:

- для подальших досліджень було відібрано методи HTLS, MP та Проні (“класичного” та модифікованого), які забезпечують високу точність визначення параметрів складових НЧК і можливість застосування в режимі реального часу, а також характеризуються помірним збільшенням часу розрахунку у випадку збільшення кількості компонентів в сигналах. Подальші дослідження методів EV та MUSIC є недоцільними, оскільки зазначені методи поступаються відібраним за адекватністю результатів визначення параметрів складових НЧК. Крім того, застосування в КІВП НЧК ІСД занадто великої кількості методів, які ґрунтуються на однаковій моделі сигналу, може негативно позначитися на якості узагальнених (отриманих шляхом врахування результатів роботи усіх задіяних методів) результатів аналізу (наприклад у випадку, коли застосована в рамках дослідженої групи методів модель сигналу описує певну вибірку даних сигналу недостатньо точно);

- принцип MDL забезпечує адекватну оцінку порядку експоненціальної моделі, що дає змогу вірно визначати параметри усіх складових сигналу за кожним з відібраних методів і запобігати збільшенню витрат часу на здійснення розрахунків завдяки уникненню необхідності застосування моделей з надмірно завищеними порядками. Реалізацію в середовищі “Matlab” функції, яка визначає порядок моделі сигналу за принципом MDL згідно (3.5), наведено в лістингу Ж.1 додатку Ж.

3.2.5 Вейвлет-перетворення

Вейвлет-перетворення є потужним інструментом, за допомогою якого визначають параметри сигналів у частотно-часовому просторі. Принципово розрізняють неперервне та дискретне ВП, на яких ґрунтується ціла низка способів виконання ВП [13].

Для дійсного сигналу $x(t)$ вейвлет-спектр W_C неперервного ВП матиме вигляд

$$W_C(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (3.13)$$

де $\psi(t)$ – дійсна вейвлетотвірна функція (ВТФ);

a – коефіцієнт масштабування, пов'язаний з періодом сигналу T як $a = T/k$;

k – відповідний певній ВТФ $\psi(t)$ коефіцієнт пропорційності (ціле число);

b – коефіцієнт зсуву.

З метою розрахунку дискретного ВП W_C застосовують дискретне розбиття ВТФ:

$$W_D(n, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^n}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi(a_0^{-n}t - k) dt,$$

де $a_0 = \sqrt[n]{a^{-2}} > 1$ – дискретне масштабне перетворення;

n – ціле число.

Вейвлет-перетворення має усі переваги перетворення Фур'є та дає змогу проведення досліджень окремих локалізованих процесів у частотній та часовій області. Ця риса ВП, зокрема, забезпечує можливість ідентифікації мод лише в характерній для НЧК в ЕС (ЕО) частотному діапазоні, що має суттєво зменшити загальний час аналізу із застосуванням цього методу. Крім того, застосування ВП дає змогу визначати параметри сигналів за наявності в них високоамплітудних шумів (завад), які є характерними для початкових моментів часу після виникнення в ЕС (ЕО) збурення [12, 13, 20, 153].

Недоліком ВП є відносна складність його виконання, яку, крім інших факторів, обумовлює необхідність підбору оптимальної ВТФ для досліджуваного сигналу. До того ж, ВП забезпечує можливість безпосереднього визначення лише частоти та амплітуди НЧК, а показник демпфірування може бути визначено тільки непрямими методами.

Застосування ВП з метою визначення параметрів складових НЧК у ЕС (ЕО) розглядалося, зокрема, в [1, 40, 85], але питань можливості застосування цього методу аналізу сигналів для виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх складових з метою оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕС (ЕО), а також відповідності зазначеного методу всім наведеним у пункті 3.2.1 вимогам наразі досліджено не було.

Амплітудні спектри ТСГ-1, отримані із застосуванням ВП, здійсненого із застосуванням найпоширеніших ВТФ (Хаара, “мексиканського капелюха” (“сомбреро”) та Морле) наведено на рис. 3.6.

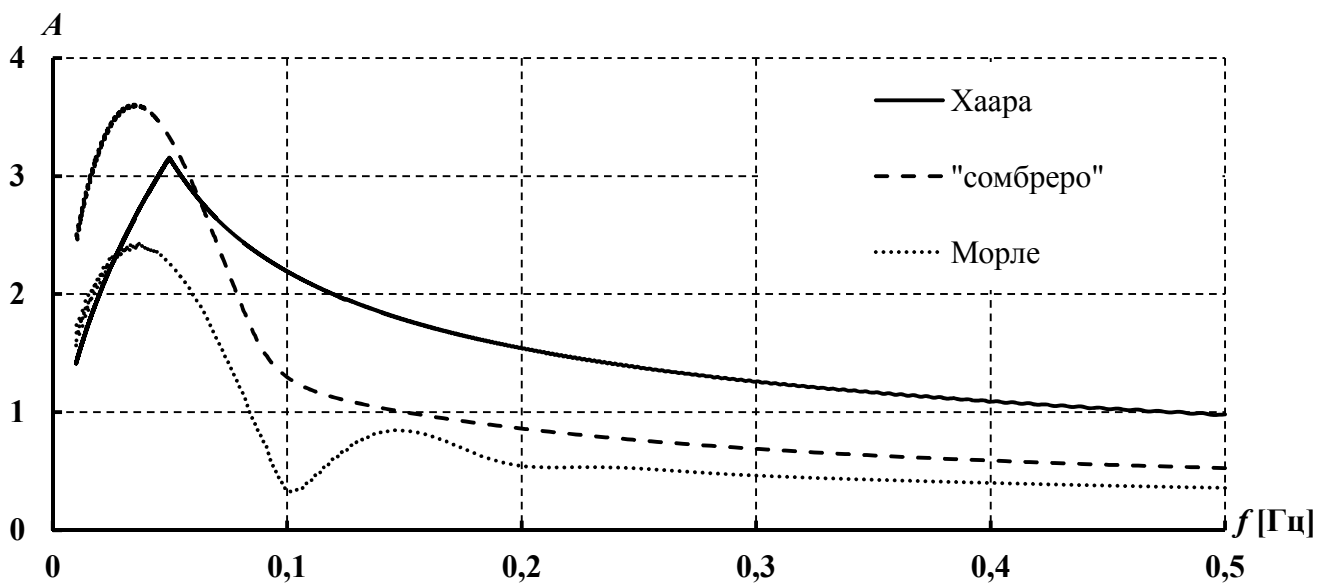


Рисунок 3.6 – Амплітудні спектри ТСГ-1, отримані із застосуванням деяких ВТФ

В дослідженні під час виконання розрахунків було застосовано неперервне ВП, що дало змогу запобігти необхідності визначення оптимального (з огляду на забезпечення максимально точного розрахунку параметрів складових НЧК) інтервалу дискретизації ВТФ, необхідного для виконання дискретного ВП. Можливості методу ВП забезпечили проведення розрахунків параметрів складових НЧК вибірки даних ТСГ-1 в обраному діапазоні частот від 0,01 Гц до 0,50 Гц.

Аналіз графіків, наведених на рис. 3.6, показав певну невідповідність отриманих за допомогою ВП значень частот та амплітуд складових НЧК вибірки даних ТСГ-1 їх реальним значенням (зокрема, на графіках показано наявність складових з частотою

вище 0,2 Гц, що не відповідає дійсності). Крім того, у випадку застосування ВТФ Хаара та “сомбреро” метод ВП не забезпечив “відокремлення” складових з частотами 0,1 Гц та 0,2 Гц. Час виконання розрахунків параметрів складових НЧК для вибірки даних ТСг-1 за допомогою ВП за умови застосування комп’ютера з процесором Intel Core i3 370М залежав від типу ВТФ і становив від 0,167с до 0,383с.

Отже, з урахуванням зазначених вище переваг ВП та результатів проведених досліджень метод ВП на базі ВТФ Морле, яка забезпечила прийнятні результати визначення частот та амплітуд складових НЧК, було відібрано для подальших досліджень.

3.2.6 Перетворення Стоквелла та його модифікації

Перетворення Стоквелла є відносно новим способом аналізу параметрів сигналів, який являє собою “фазову корекцію” неперервного ВП, виконану із застосуванням віконного перетворення Фур’є [148]. З урахуванням (3.13) СТ сигналу $x(t)$ може бути подано як неперервне ВП, виконане на базі окремої ВТФ, помножене на показник фази:

$$S(a,b,f) = e^{j2\pi fb} W_C(a,b) = e^{j\omega b} W_C(a,b). \quad (3.14)$$

Окрема ВТФ, застосована в (3.14) з метою виконання неперервного ВП, є залежною від часу t та частоти f і має вигляд

$$\psi(t,f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2 f^2}{2a}} e^{-j2\pi ft}.$$

Оскільки наведена окрема ВТФ не задовольняє умовам неперервного ВП щодо нульового середнього значення для застосованих ВТФ, то вираз (3.14) насправді не відповідає неперервному ВП. З урахуванням цього вираз (3.14) має бути записано так

$$S(a,b,f) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-b)^2 f^2}{2a}} e^{-j2\pi ft} dt. \quad (3.15)$$

Аналіз (3.15) показує, що ST являє собою певне узагальнення віконного перетворення Фур'є, яке дає змогу подолати деякі недоліки неперервного ВП, зокрема, зменшуючи розсіювання спектра (зазначене розсіювання спектра унеможливило застосування з метою визначення параметрів складових НЧК, наприклад, ВТФ функції Хаара та “сомбреро”, розрахунки із застосуванням яких здійснюються швидше за розрахунок із застосуванням відібраної для подальших досліджень ВТФ Морле). Крім того, ST є стійким до наявності у вибірці даних сигналу шумів (завад) [148].

До недоліків ST відносять складність виконання розрахунків (що потребує певних витрат часу на їх виконання) та неможливість безпосереднього визначення показника демпфірування виявлених компонентів. З метою подолання недоліків ST застосовують його модифікації, серед яких виділяють:

- запропоноване для оброблення біомедичних сигналів швидке ST [41], яке дає змогу зменшити (у деяких випадках – на декілька порядків) витрати часу на виконання розрахунків у порівнянні з “класичним” ST, проте має дещо гіршу роздільну здатність за частотою;
- модифікований алгоритм [35], який дає змогу покращити роздільну здатність за частотою в порівнянні з “класичним” ST. Згідно з цим алгоритмом вираз (3.15) набуває вигляду

$$S(a, b, f, m, k) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{|f|}{(mf + k)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-b)^2 f^2}{2a(mf+k)^2}} e^{-j2\pi ft} dt,$$

де m, k – коефіцієнти рівняння прямої $\gamma(f) = mf + k$, яка відображає зміну частоти.

Застосування ST з метою визначення параметрів складових НЧК в ЕС розглядалося, зокрема, в [124, 168], але питань можливості застосування цього методу аналізу сигналів для виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх складових з метою оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕС (ЕО), а також відповідності зазначеного методу всім наведеним у пункті 3.2.1 вимогам наразі досліджено не було.

Амплітудні спектри ТСг-1, отримані із застосуванням “класичного” та модифікованого (згідно [35]) ST, наведено на рис. 3.7. Слід зазначити, що розглянуті методи показали дуже близькі результати, внаслідок чого на рис. 3.7 відбулося накладання двох графіків.

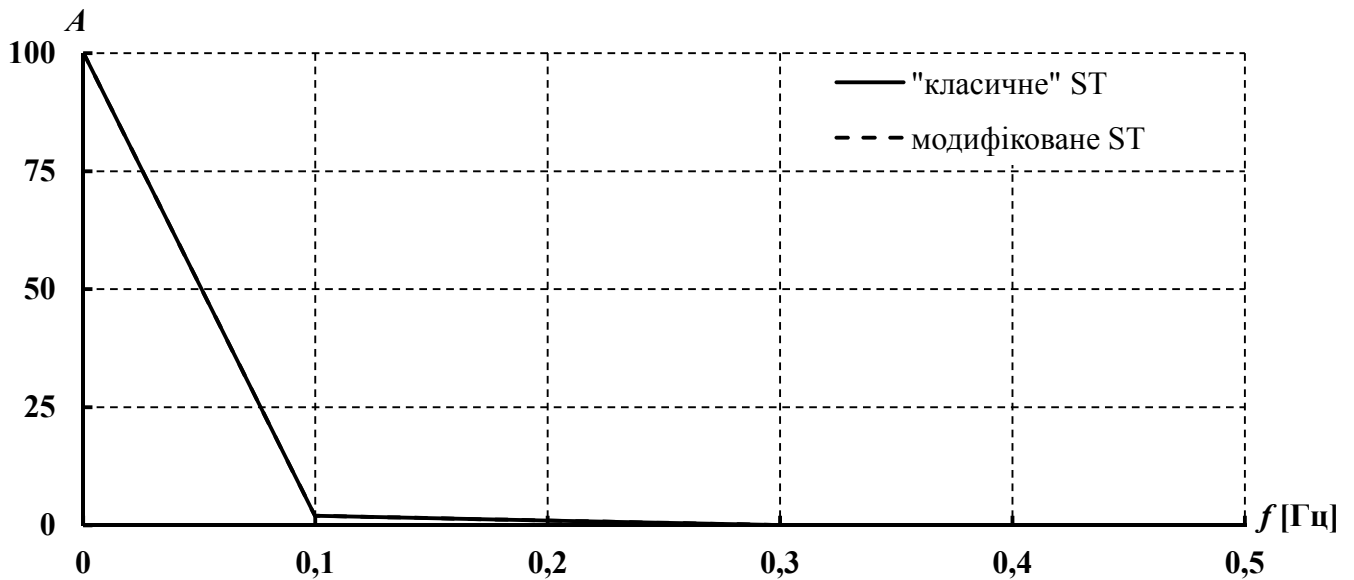


Рисунок 3.7 – Амплітудні спектри ТСг-1, отримані із застосуванням “класичного” та модифікованого перетворення Стоквелла

Час виконання розрахунків амплітудного спектра ТСг-1 за умови застосування комп’ютера з процесором Intel Core i3 370М не перевищував 0,02с для “класичного” ST і 0,03с для модифікованого ST.

Аналіз графіків на рис. 3.7 показав неспроможність розглянутих методів аналізу сигналів розділити у вибірці даних ТСг-1 компоненти з частотами 0,1 Гц та 0,2 Гц, причиною чому є наведені вище обмеження за граничною роздільною здатністю за частотою ДПФ (ШПФ), застосованого в алгоритмах методів. З метою підвищення роздільної здатності ST за частотою необхідним є збільшення тривалості спостереження сигналу, що негативним чином впливає на можливість оперативного визначення параметрів складових НЧК із застосуванням цих методів аналізу сигналів.

Аналогічно, неможливим у разі застосування ДПФ є розділення складових сигналу, різниця частот між якими є меншою за значення T_c^{-1} . Зазначений висновок підтверджено результатами розрахунку амплітудного спектра ТСг-1, наведеними на рис. 3.1, де застосування ДПФ та ШПФ не дало змоги виокремити в сигналі компоненти з частотами 0,1 Гц та 0,2 Гц. Очевидно, що зменшення тривалості спостереження сигналу, обумовлене необхідністю підвищення актуальності результатів аналізу параметрів складових НЧК у режимі реального часу, призведе до погіршення якості результатів

аналізу параметрів мод НЧК. Отже, враховуючи раніше прийняті критерії відбору методів аналізу та беручи до уваги результати проведених досліджень, застосування “класичного” та модифікованого ST у КІВП НЧК ІСД є недоцільним.

3.2.7 Перетворення Гільберта-Хуанга та його модифікації

Перетворення Гільберта-Хуанга є відносно новим методом аналізу, який ґрунтується на емпіричній базі та забезпечує можливість визначення миттєвих частот для нелінійних та нестационарних часових рядів [71]. Зазначені особливості ННТ є дуже важливими з огляду на той факт, що процеси, які мають місце в більшості реальних систем (в т. ч. – в ЕС (ЕО)), з високим ступенем ймовірності є нелінійними та нестационарними [70].

Принципово алгоритм ННТ складається з двох частин – емпіричного розвинення за модами (англ. – Empirical Mode Decomposition, EMD) та спектрального аналізу Гільберта.

Придатність методу ННТ для роботи з нелінійними та нестационарними сигналами обумовлено адаптивністю EMD, базис якого не є заздалегідь визначеним, а формується безпосередньо на основі даних, які підлягають аналізу. В основі EMD лежить гіпотеза щодо можливості подання будь-яких даних у вигляді суми функцій власних мод (англ. – Intrinsic Mode Function, IMF), кожна з яких описує простий коливний процес і може мати змінну з плином часу амплітуду та частоту. Обчислювальний процес EMD ґрунтується на “симетрії” IMF відносно локального середнього значення, наслідком чого є знакозмінність та наявність екстремумів для кожної IMF. Послідовне обчислення IMF $c_i(t)$ та залишків $r_i(t)$ дає можливість подати вихідний сигнал $x(t)$ у вигляді

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t),$$

де $r_n(t) = r_{n-1}(t) - c_n(t)$;

$$r_0(t) = x(t);$$

n – кількість емпіричних мод.

Алгоритм EMD можна подати так [71]:

1) визначення всіх екстремумів залишку $r_i(t)$ (на першій ітерації розрахунку – вихідного сигналу $x(t)$);

2) побудова верхньої та нижньої обвідних сигналу ($e_i^{\max}(t)$ та $e_i^{\min}(t)$) із застосуванням кубічних сплайнів;

3) обчислення середнього значення обвідних: $m_i(t) = 0,5(e_i^{\max}(t) + e_i^{\min}(t))$;

4) ітераційне визначення IMF шляхом проведення відсіювання та розрахунок моди $c_i(t) = h_{i(k)}(t) = h_{i(k-1)}(t) - m_{i(k)}(t)$;

5) видалення розрахованої моди: $r_i(t) = r_{i-1}(t) - c_i(t)$.

З визначеними за допомогою EMD модами в подальшому виконують перетворення Гільберта, яке можна подати так:

$$c_i^{\text{HT}}(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau,$$

де P – головне значення Коші (Cauchy).

Виходячи з позначень, $c_i(t)$ та $c_i^{\text{HT}}(t)$ утворюють комплексну пару

$$Z(t) = c_i(t) + jc_i^{\text{HT}}(t) = \sqrt{(c_i(t))^2 + (c_i^{\text{HT}}(t))^2} \cdot \exp\left(j \arctg\left(\frac{c_i^{\text{HT}}(t)}{c_i(t)}\right)\right) = a(t)e^{j\theta(t)},$$

де $a(t)$, $\theta(t)$ – відповідно, миттєва амплітуда та миттєва фаза аналітичного сигналу $Z(t)$.

Миттєву частоту аналітичного сигналу $Z(t)$ визначають як

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}.$$

Перевагами застосування ННТ, як вже було зазначено раніше, є можливість роботи із нелінійними та нестационарними сигналами. Недоліком ННТ та його модифікацій є неможливість безпосереднього визначення показників демпфірування складових НЧК (ці параметри може бути визначено лише непрямыми методами). Крім того, ННТ має також низку недоліків, які сформульовано як проблеми наявності кінцевих ефектів EMD, змішування мод, вибору оптимального виду сплайна, найкращого вибору IMF, недоведеності єдиності ННТ [69]. Спроби усунення зазначених недоліків призвели до виникнення численних удосконалень та модифікацій, спрямованих як

на поліпшення ефективності алгоритму EMD, так і на адаптацію ННТ до застосування в різних галузях науки, наприклад:

- для аналізу вузькосмугових сигналів, яка ґрунтується на проведенні аналогії між теорією ННТ та теорією явища прибою [45];
- для виявлення дефектів у підшипниках, яка ґрунтується на новому методі визначення IMF, що дає змогу зменшити обсяг необхідних з метою їх визначення розрахунків [50];
- із застосуванням удосконаленої EMD – техніки розвинення із широкою роздільною здатністю (англ. – Multiresolution Decomposition Technique) [44];
- для дослідження серцевих ритмів, яка застосовує окремий критерій завершення ітераційного уточнення IMF та спосіб запобігання виникненню кінцевих ефектів EMD [98];
- для визначення параметрів якості електричної енергії в електричних мережах кораблів, яка ґрунтується на застосуванні ШПФ, що дає змогу запобігти прояву проблеми змішування мод [149];
- для ідентифікації мікро-Допплер (Doppler) ознак, яка ґрунтується на застосуванні в алгоритмі ННТ ВП із застосуванням ВТФ Меєра (Meyer) [118];
- для запобігання виникненню кінцевих ефектів EMD [172];
- для виявлення слабких сигналів в умовах низького SNR, яка застосовує критерій завершення ітераційного уточнення IMF, що ґрунтується на кореляційному аналізі [171].

Застосування ННТ та його модифікацій з метою визначення параметрів складових НЧК в ЕС (ЕО) розглядалося, зокрема, в [3, 67, 94, 106, 141] але питань можливості застосування цього методу аналізу сигналів для виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх складових з метою оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕС (ЕО), а також відповідності зазначеного методу всім наведеним у пункті 3.2.1 вимогам наразі досліджено не було.

У ході проведених у рамках дисертаційної роботи досліджень було виділено дві найкращі (з огляду на відповідність наведеним у пункті 3.2.1 вимогам) модифікації ННТ, які ґрунтуються на модифікованих алгоритмах EMD:

- запропонованому в [132] та в подальшому допрацьованому алгоритмі, де з метою зменшення кінцевих ефектів EMD застосовано віддзеркалення екстремумів поблизу границь аналізованої вибірки даних сигналу (цю модифікацію ННТ позначено далі як МННТ-1);

– запропонованому в [132] та в подальшому допрацьованому в [38] алгоритмі, де з метою зменшення обсягу обчислень під час розрахунку середнього значення обвідної застосовано лише одну інтерполяцію на кожне відсіювання в процесі ітераційного визначення IMF (цю модифікацію ННТ позначено далі як МННТ-2).

Суттєвий вплив на точність результатів розрахунку параметрів складових НЧК (зокрема, частотою), отриманих за допомогою МННТ-1, має кінцевий ефект EMD. З метою підвищення точності результатів за частотою, отриманих із застосуванням цієї модифікації ННТ, у дисертаційній роботі було запропоновано під час визначення амплітуд та частот мод не враховувати певну кількість значень на початку та в кінці векторів IMF. Недоліком такого “обрізання” векторів IMF є певне погіршення точності результатів визначення амплітуд складових НЧК, що потребує зваженого вибору кількості значень IMF, які не буде враховано під час визначення параметрів складових НЧК. Наприклад, для вибірки даних ТСг-1 експериментально було встановлено, що найбільш оптимальні (з огляду на можливість одночасного отримання адекватних значень як частот складових НЧК, так і їх амплітуд) результати МННТ-1 показує у випадку “обрізання” на початку та в кінці близько 5% від загальної кількості значень IMF, а застосування “обрізання” у випадку застосування МННТ-2 є недоцільним.

Результати аналізу вибірки даних ТСг-1 із застосуванням запропонованого підходу для вищезазначених модифікацій ННТ також наведено в табл. 3.3. Наведені в табл. 3.3 значення часу розрахунку було отримано за умови застосування комп’ютера з процесором Intel Core i3 370M.

Таблиця 3.3 – Результати аналізу вибірки даних ТСг-1 із застосуванням методу ННТ

№ з/п	Метод	Визначені параметри складових НЧК			Час розрахунку, с
		частота, f , Гц	амплітуда, A	показник демпфірування, ξ	
1	“Класичний” ННТ	0,04	106,9	–	0,008
		0,31	2,5	–	
2	МННТ-1	0,29	0,8	–	0,028
	МННТ-1 з “обрізанням” векторів IMF на %5 з обох боків	0,23	0,8	–	0,027
3	МННТ-2	0,10	2,1	–	0,010
	МННТ-2 з “обрізанням” векторів IMF на %1 з обох боків	0,10	2,1	–	0,009

Аналіз наведених у табл. 3.3 даних показав, що модифікації ННТ мають перевагу за точністю визначення параметрів сигналу над “класичним” алгоритмом. Важливою особливістю розглянутих модифікацій ННТ є виявлення ними різних низькочастотних складових у вибірці даних ТСг-1: МННТ-1 забезпечив можливість ідентифікації складової з частотою 0,2 Гц, а МННТ-2 – складової з частотою 0,1 Гц. Також необхідно зазначити, що МННТ-2 забезпечив точніше за МННТ-1 визначення амплітуди виявленого компонента.

З урахуванням зазначених вище результатів аналізу параметрів складових НЧК для ТСг-1 для подальших досліджень було відібрано МННТ-1 та МННТ-2.

Отже, за результатами попередньої відбору методів аналізу сигналів для КВП НЧК ІСД до подальших досліджень було обрано методи ДПФ, НТЛС, МР, Проні (“класичний” та модифікований), ВП (на базі ВТФ Морле) та модифікації ННТ (МННТ-1 і МННТ-2).

3.3 Порівняльні дослідження та селекція методів аналізу сигналів для оцінювання загрози коливного порушення стійкості ЕО в режимі реального часу

Детальний аналіз можливостей методів попередньо відібраних методів аналізу сигналів, призначених для визначення за їх допомогою параметрів складових НЧК у режимі реального часу, було проведено із застосуванням низки тестових сигналів.

Дослідження впливу на результати аналізу довжини часового відрізка, який охоплює вибірка даних певного сигналу, було проведено із застосуванням вибірки даних ТСг-1 для часових відрізків різної довжини (опис ТСг-1 наведено в пункті 3.2.1, фрагмент графіка – на рис. Д.1 додатку Д). Результати дослідження вибірки даних ТСг-1 наведено в табл. Е.2 додатку Е. За результатами аналізу даних цієї таблиці було зроблено такі висновки щодо особливостей ідентифікації параметрів сигналів із незмінними параметрами за допомогою досліджених методів аналізу:

- найбільш адекватні результати розрахунку параметрів складових НЧК забезпечують методи НТЛС, МР, “класичний” та модифікований методи Проні;
- різні методи аналізу потребують різної мінімальної ширини вікна спостереження з метою забезпечення надійного виявлення усіх мод сигналу та адекватного визначення їх параметрів;
- точність визначення параметрів складових НЧК для переважної більшості методів аналізу сигналів зростає зі збільшенням ширини вікна спостереження (зокрема, на часовому відрізку $[0; 1]с$ виявлення усіх низькочастотних складових у вибірці даних

ТСг-1 забезпечили лише “класичний” метод Проні та HTLS, а на відрізку $[0; 10]c$ – майже усі досліджені методи аналізу сигналів);

– модифікований метод Проні поступається “класичному” за можливостями ідентифікації низькочастотних компонентів за однакової ширини вікна спостереження.

Аналогічне попередньому дослідження сигналу із змінними з часом амплітудами низькочастотних складових було проведено із застосуванням синтезованого п’яти-компонентного сигналу, який містить складові, подібні до складових, наявних у сигналах реальних ЕО за умови присутності НЧК в цих ЕО (наприклад, див. [106]). Зазначений тестовий сигнал може бути описано за допомогою такого виразу: $y(t)=100+(1+t) \sin(2\pi 0,1t)+(1+1,1t) \sin(2\pi 0,15t)+(1+1,3t) \sin(2\pi 1,5t)+(1+1,1t) \sin(2\pi 1,9t)$. Фрагмент графіка цього тестового сигналу (далі – ТСг-2) наведено на рис. Д.2 додатку Д, а відповідні фрагменти графіків зміни з часом амплітуд його компонентів – на рис. Д.3 цього ж додатку. Особливістю ТСг-2 є наявність у його структурі складових з близькими частотами і з кратними частотами (що ускладнює їх ідентифікацію), амплітуда яких лінійно зростає з плином часу.

З метою проведення аналізу було застосовано вибірку даних ТСг-2, яка охоплює часовий відрізок $[0; 10]c$ та має частоту дискретизації 50 Гц (що відповідає можливостям, зокрема, ЕВРП “Регіна-Ч” та вимогам [75] стосовно каналів передавання даних). Результати розрахунку параметрів ТСг-2 за допомогою попередньо відібраних методів наведено в табл. Е.3 додатку Е. Аналіз даних цієї таблиці показав, що:

– можливості досліджених методів аналізу сигналів щодо виявлення та визначення параметрів складових НЧК залежать від ширини вікна спостереження. Так, у випадку застосування вікна спостереження шириною $1c$ більшість методів аналізу виявилися нездатними ідентифікувати у вибірці даних ТСг-2 компоненти з частотами 0,10 Гц та 0,15 Гц. У той же час застосування вікон спостереження шириною $2c$ надало можливість виявити ці компоненти як один “загальний” (далі – компонент “0,10 Гц + 0,15 Гц”). Графіки, які відображають результати аналізу частот та амплітуд складових вибірки даних ТСг-2, побудовані на основі розрахункових даних, отриманих за умови застосування вікон спостереження шириною $2c$ для методів аналізу сигналів, які забезпечили найбільш адекватні результати розрахунку параметрів компонентів ТСг-2, наведено на рис. 3.8–3.13 (результати зведено до середини часових відрізків, які охоплюють відповідні вікна спостереження сигналу);

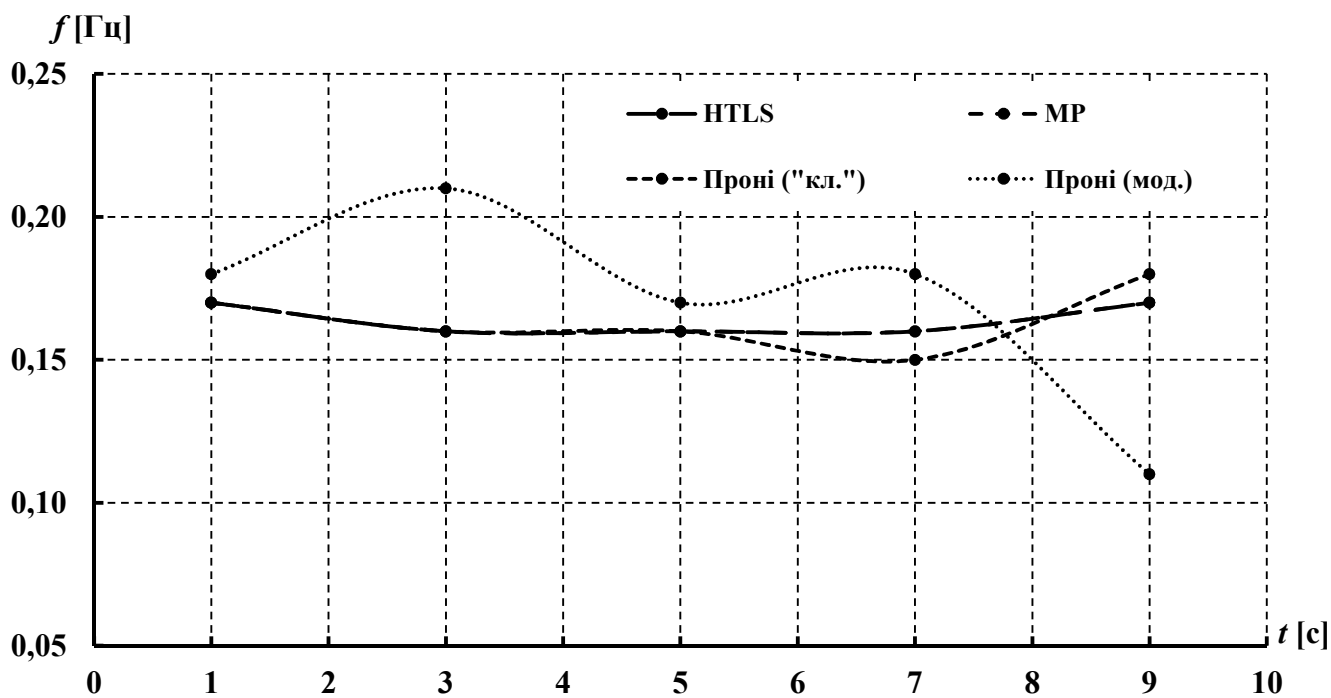


Рисунок 3.8 – Графіки визначеної частоти компонента “0,10 Гц + 0,15 Гц” вибірки даних ТСГ-2

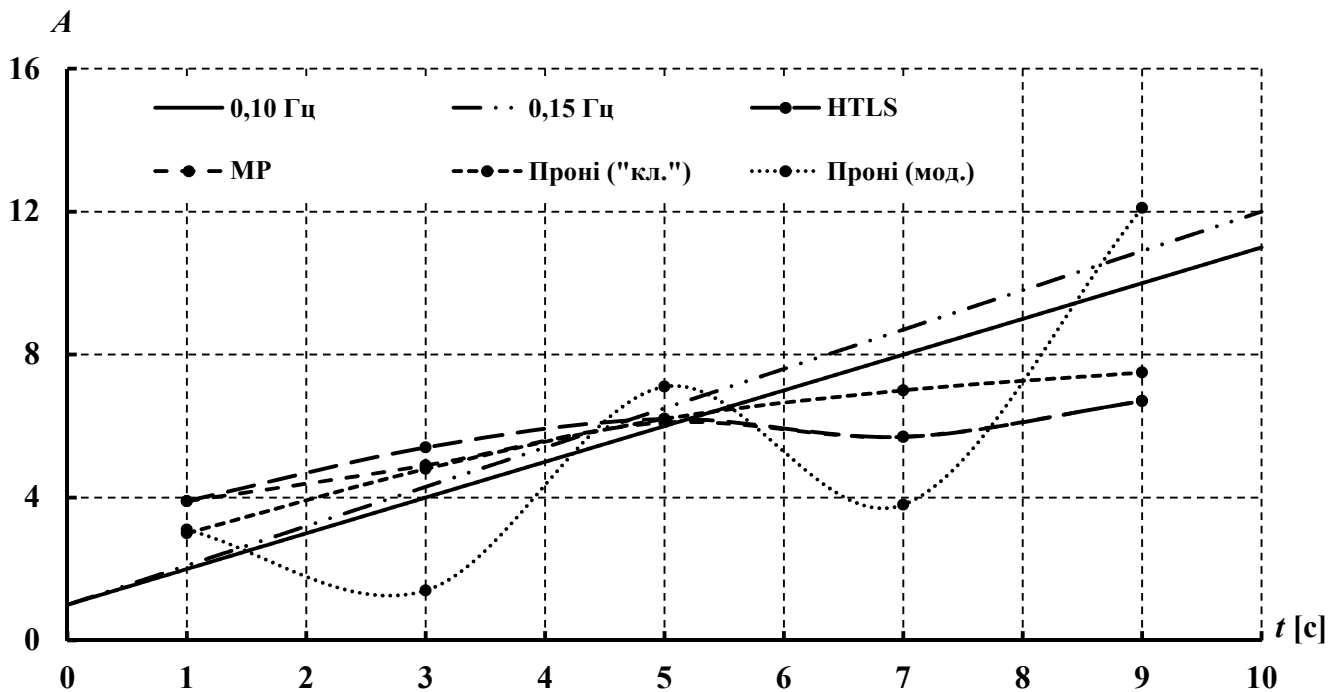


Рисунок 3.9 – Графіки визначеної амплітуди компонента “0,10 Гц + 0,15 Гц” вибірки даних ТСГ-2

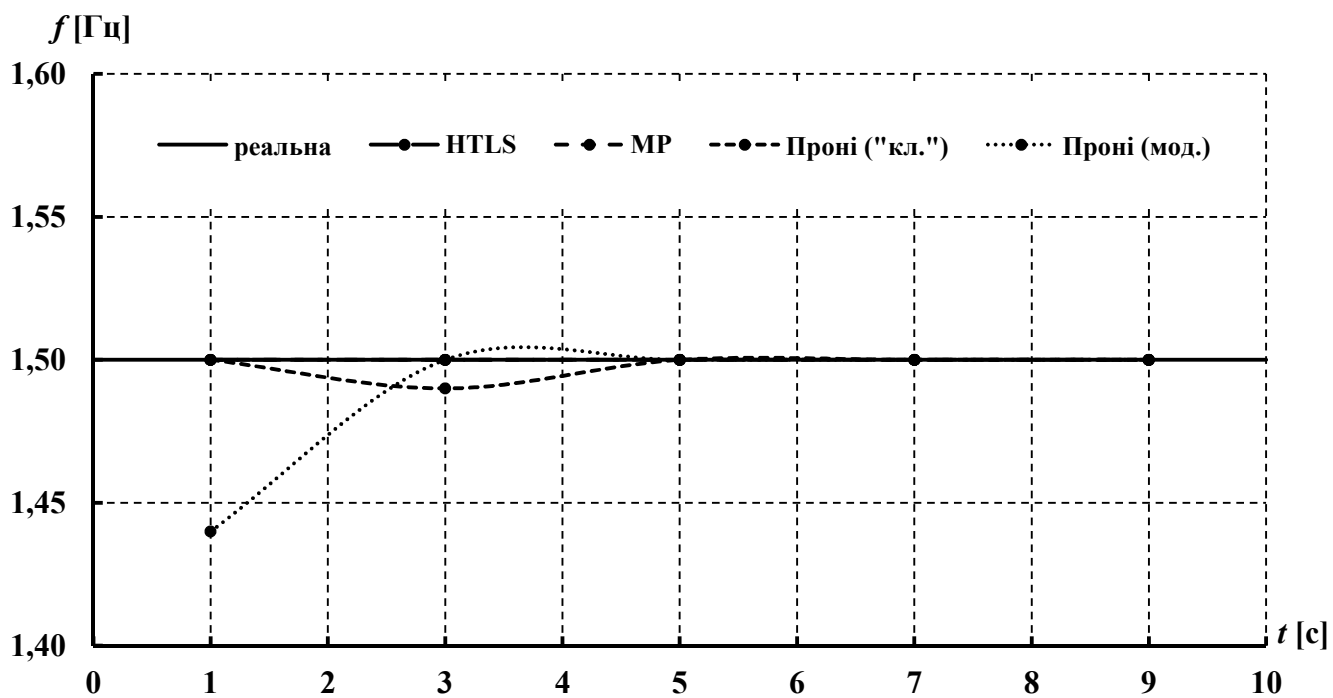


Рисунок 3.10 – Графіки визначеної частоти компонента 1,50 Гц вибірки даних ТСГ-2

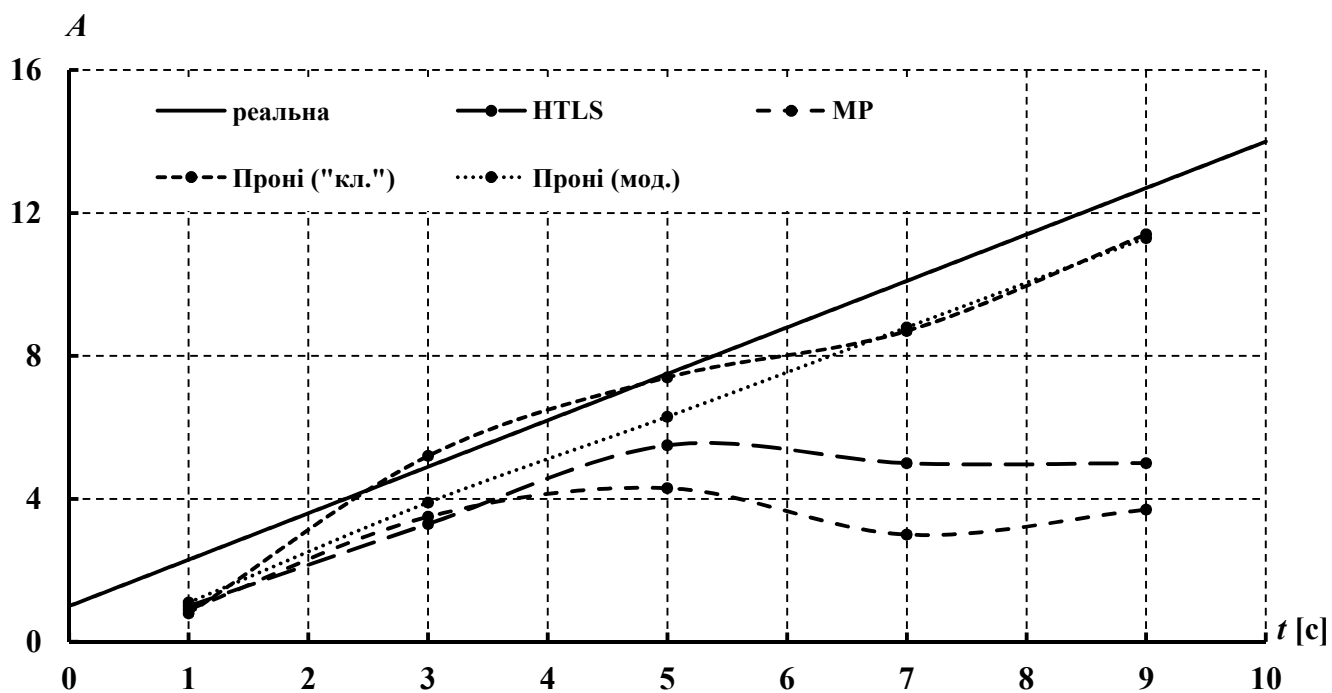


Рисунок 3.11 – Графіки визначеної амплітуди компонента 1,50 Гц вибірки даних ТСГ-2

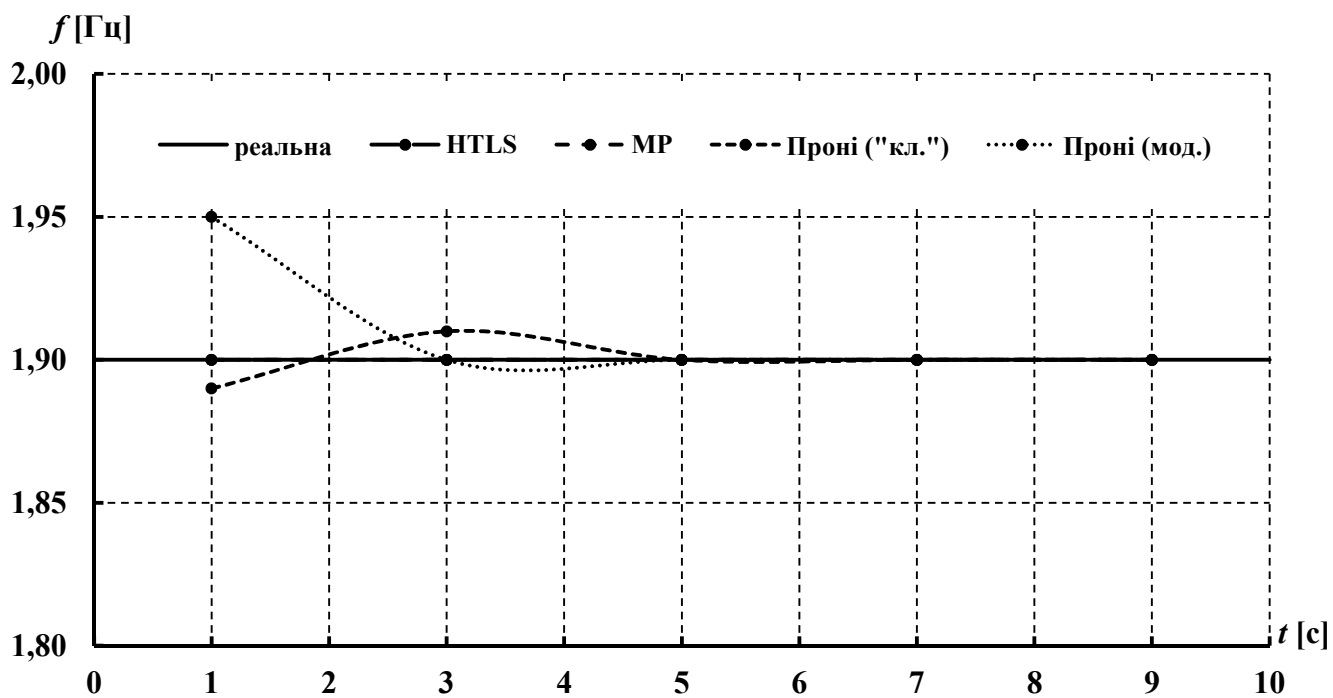


Рисунок 3.12 – Графіки визначеної частоти компонента 1,90 Гц вибірки даних ТСГ-2

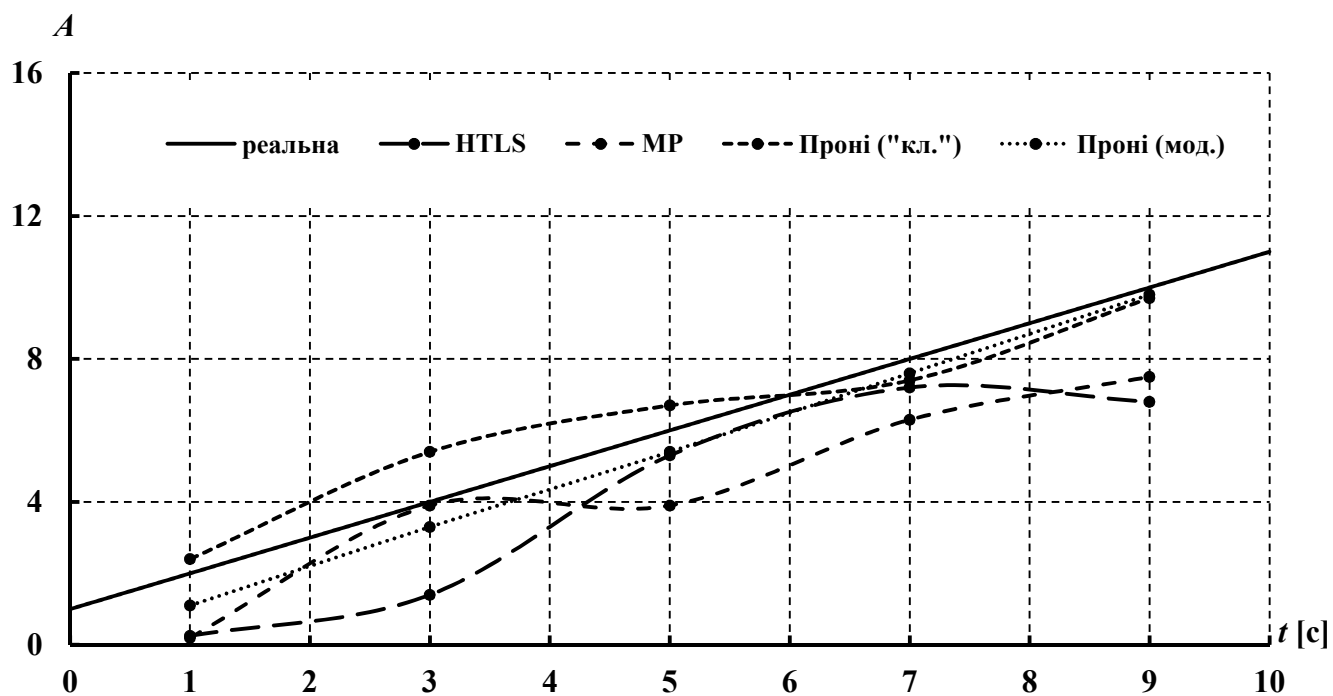


Рисунок 3.13 – Графіки визначеної амплітуди компонента 1,90 Гц вибірки даних ТСГ-2

- методи HTLS, МР, “класичний” та модифікований методи Проні здатні забезпечити “відслідковування” динаміки зміни амплітуд низькочастотних складових;
- результати аналізу параметрів ТСГ-2 за умови ширини вікна спостереження в $2c$ є якісно кращими за результати, отримані за умови ширини вікна спостереження в $1c$ – більш точно визначено частоти складових НЧК, суттєво зменшено кількість “фантомних” (не наявних у вибірці даних сигналу) компонентів та “спарених” (із частотами, близькими до реальної частоти наявної у вибірці даних сигналу низькочастотної складової) компонентів;
- значення показників демпфірування низькочастотних складових, розраховані для даних вікон спостереження за допомогою досліджених методів аналізу сигналів, не завжди відповідають реальному характеру демпфірування цих складових. Отже, з метою підвищення надійності виявлення мод НЧК, амплітуда яких зростає з плином часу, необхідним є також відслідковування динаміки зміни амплітуд мод НЧК;
- з метою “відокремлення” компонентів із близькими частотами (для ТСГ-1 – 0,10 Гц та 0,15 Гц) необхідним є застосування вікон спостереження шириною від $3c$ і більше. Втім, застосування таких вікон спостереження може призводити до появи в результатах аналізу близьких за частотою компонентів (наприклад, компоненти 1,49 Гц і 1,51 Гц на часовому відрізку $[0; 3]c$ для “класичного” методу Проні, компоненти 0,15 Гц та 0,16 Гц на відрізку $[5; 10]c$ для МР та HTLS тощо). Крім того, застосування вікон спостереження шириною $5 \dots 10c$ з метою аналізу сигналів зі змінними амплітудами компонентів може виявитися недоцільним через зниження оперативної актуальності отриманих за таких умов значень параметрів складових НЧК, появу в результатах аналізу “фантомних” (з частотами, близькими до реальних частот наявних у вибірці даних сигналу низькочастотних складових) та неіснуючих у реальному сигналі компонентів;
- жоден із досліджених методів аналізу сигналів не гарантує надійного виявлення НЧК та адекватного (точного) визначення параметрів їхніх складових за умови здійснення аналізу в режимі реального часу (тобто, з вікнами спостереження, які охоплюють часові відрізки шириною до $10c$).

Аналогічне попередньому дослідження сигналу із змінною з часом частотою компонента було здійснено із застосуванням синтезованого трикомпонентного сигналу, який містить складові, подібні до складових, наявних у сигналах реальних ЕО за

умови присутності в цих ЕО НЧК. Зазначений тестовий сигнал має вигляд $y(t)=100+A_1(t) \sin(2\pi t (0,30+0,01t))+A_2(t) \sin(2\pi 0,80t)$, де амплітуди A_1 та A_2 змінюються за експоненціальними залежностями:

$$A_1(t) = \exp(0,25t) - 1, \text{ якщо } t = [0;10]c;$$

$$A_2(t) = \begin{cases} \exp(0,60t) - 1, & \text{якщо } t = [0;5]c; \\ \exp(0,60 \cdot 5) - 1, & \text{якщо } t = (5;6)c; \\ \exp(0,60 \cdot 5) - \exp(0,70t), & \text{якщо } t = [6;10]c. \end{cases}$$

Графік цього тестового сигналу (далі – ТСг-3) наведено на рис. Д.4 додатку Д, графіки зміни з часом амплітуд A_1 та A_2 – на рис. Д.5, а графік зміни з часом частоти компонента з “плаваючою” частотою – на рис. Д.6 цього ж додатку. Особливістю ТСг-3 є наявність у його структурі складової, частота якої за 10с лінійно змінюється з 0,3 Гц до 0,5 Гц (така поведінка низькочастотної складової може спостерігатися в разі плавної зміни співвідношення між поточним завантаженням МЗ активною потужністю та його пропускною здатністю [89]). Необхідно зазначити, що експоненціальний характер зміни амплітуди компонентів ТСг-3 більше відповідає фізичній сутності процесів, які відбуваються в ЕС (ЕО) під час виникнення та “розвитку” в них НЧК, ніж лінійний характер зміни цих компонентів ТСг-2.

З метою проведення аналізу було застосовано вибірку даних ТСг-3, яка охоплює часовий відрізок $[0;10]c$ та має частоту дискретизації 50 Гц (що відповідає можливостям, зокрема, ЕВРП “Регіна-Ч” та вимогам [75] стосовно каналів передавання даних). Результати розрахунку параметрів ТСг-3 за допомогою попередньо відібраних методів наведено в табл. Е.4 додатку Е. Аналіз результатів дослідження вибірки даних ТСг-3 показав, що для цієї вибірки даних (як і для вибірки даних ТСг-2) виконання аналізу параметрів із застосуванням вікон спостереження шириною 1с в низці випадків не забезпечило виявлення всіх складових НЧК та визначення частот і амплітуд компонентів з належною точністю. Тут (як і у випадку аналізу параметрів ТСг-2) з метою отримання адекватних результатів визначення параметрів складових сигналу доцільно застосовувати вікна спостереження шириною не менше 2с. Графіки, які відображають результати аналізу

частот та амплітуд складових вибірки даних ТСГ-3, побудовані на основі розрахункових даних, отриманих за умови застосування вікон спостереження шириною $2c$ для методів аналізу сигналів, які забезпечили найбільш адекватні результати розрахунку параметрів компонентів ТСГ-3, наведено на рис. 3.14 – 3.17 (результати зведено до середини часових відрізків, які охоплюють відповідні вікна спостереження сигналу).

Аналіз цих графіків показав, що досліджені методи аналізу сигналів забезпечують адекватне визначення амплітуд та частот складових НЧК за умови експоненціального характеру зміни амплітуди компонентів сигналу. Спільний аналіз даних табл. Е.4 та графіків на рис. 3.14–3.17 показав, що:

- відносні похибки досліджених методів аналізу сигналів щодо визначення частот складових сигналу є суттєво нижчими за відносні похибки визначення їх амплітуд;
- з метою надійного та адекватного відслідковування динаміки поведінки складової НЧК зі змінною з плином часу частотою необхідно застосовувати вікна спостереження шириною від $2c$.

Необхідно зазначити, що висновки стосовно можливостей досліджених методів аналізу сигналів щодо визначення параметрів їхніх складових, зроблені за результатами аналізу вибірок даних синтезованих сигналів ТСГ-1 – ТСГ-3, було підтверджено результатами подібних досліджень, проведених під час виконання дисертаційної роботи із застосуванням тестових сигналів зі схожим складом [1, 2, 3, 5, 30, 92].

Раніше було зазначено, що однією із вимог до КІВП НЧК ІСД є оперативність виявлення та визначення параметрів складових НЧК, які виникли в ЕС (ЕО) внаслідок певного збурення. З метою перевірки відповідності можливостей досліджуваних методів аналізу сигналів цій вимозі було проведено їх дослідження із застосуванням вибірок даних ТСГ-4 та ТСГ-5.

Низькочастотні складові коливань, наявні в ТСГ-4, було ініційовано збільшенням потоку активної потужності по МЗ 7–9 ТС-I, усі СМ якої обладнано САКЗ з AVR типу DC1A з налаштуваннями згідно [72] за відсутності PSS, з 390 МВт до 490 МВт за потужністю кінця (раніше було показано, що значення потоку активної потужності в кінці МЗ 7–9 ТС-I, яке відповідає межі збіжності ітераційного процесу розрахунку потякорозподілу схеми в середовищі “Matlab” за обмеження розрахунку 50 ітераціями

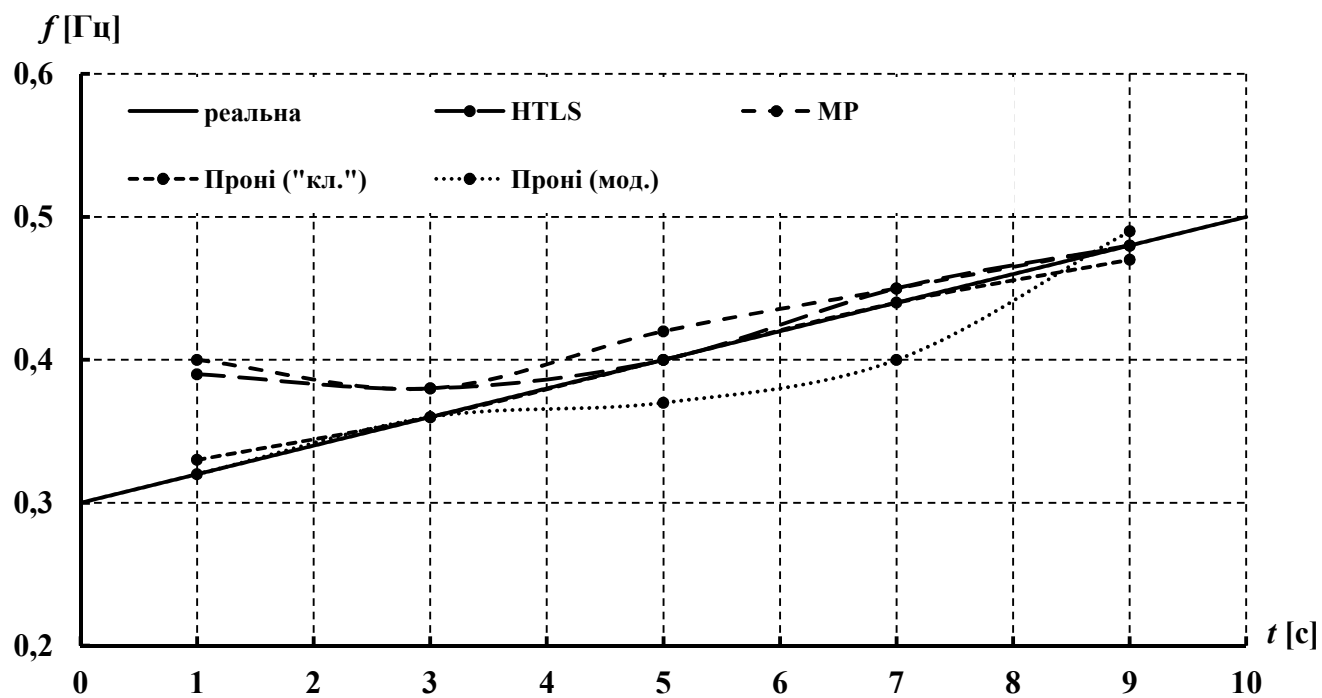
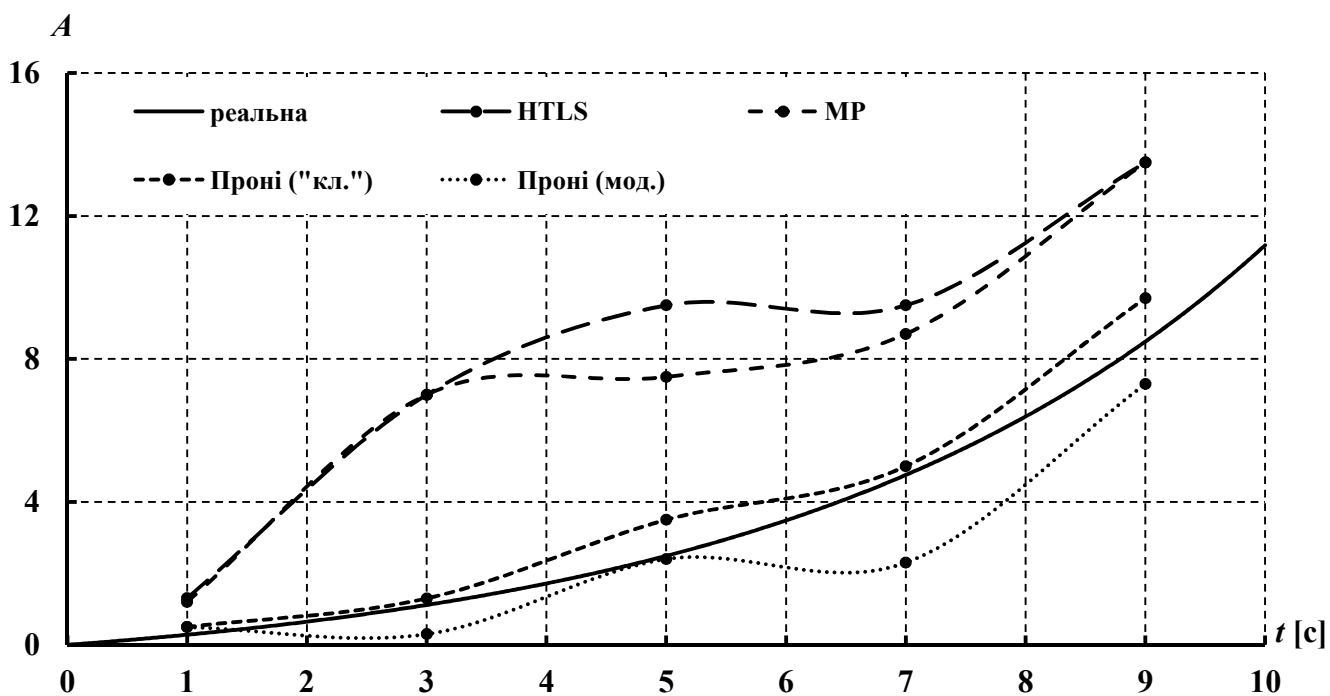


Рисунок 3.14 – Графіки визначеної частоти компонента з “плаваючою” частотою ТСГ-3

Рисунок 3.15 – Графіки визначеної амплітуди компонента з “плаваючою” частотою
вибірки даних ТСГ-3

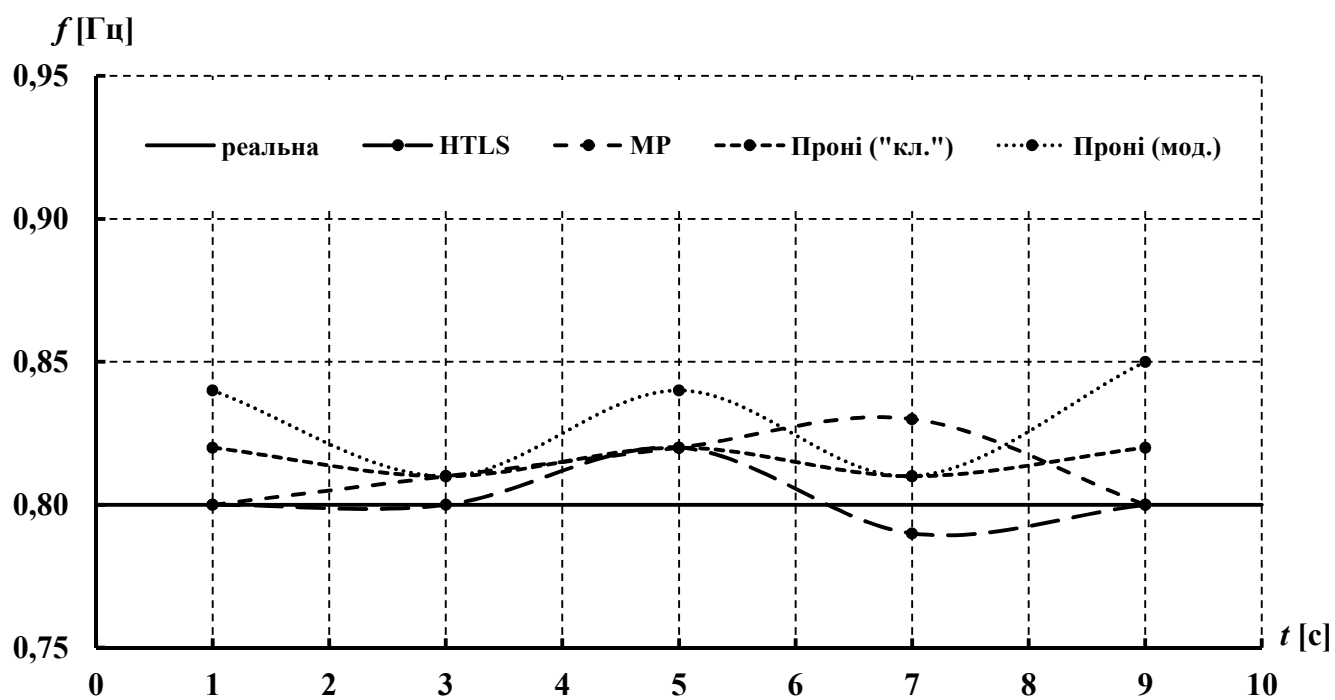


Рисунок 3.16 – Графіки визначеної частоти компонента 0,80 Гц вибірки даних ТСГ-3

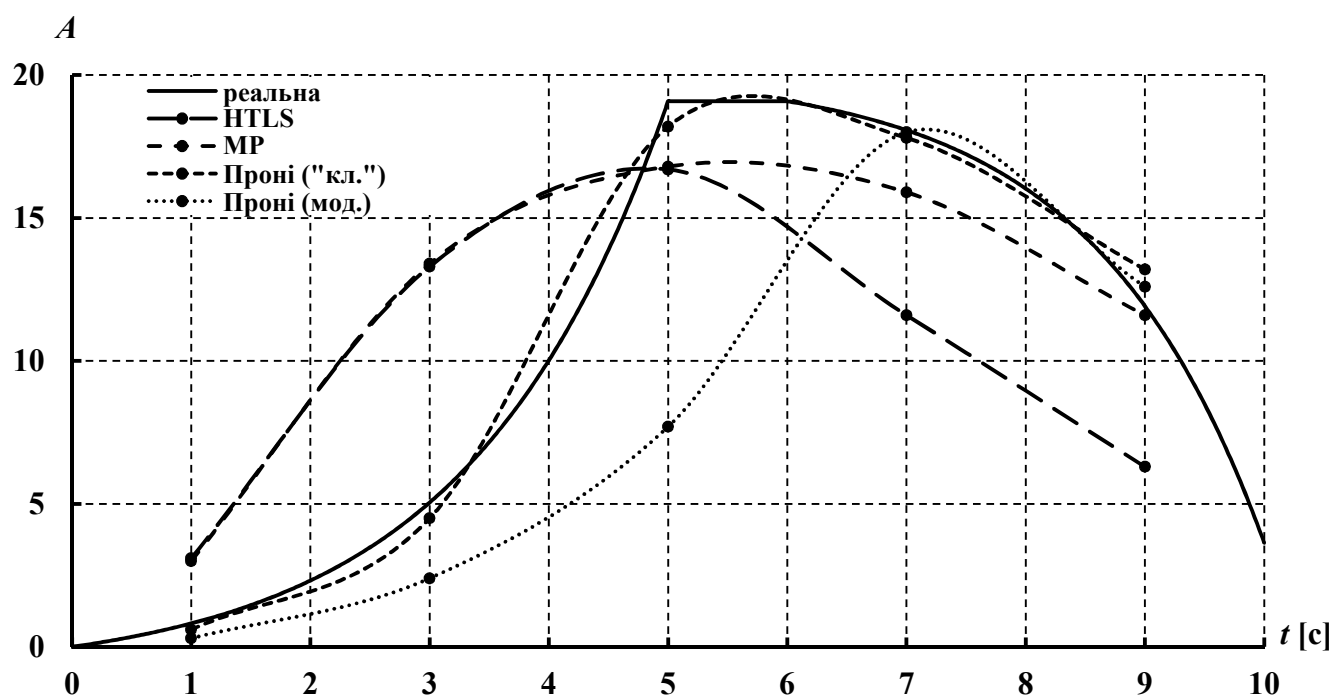


Рисунок 3.17 – Графіки визначеної амплітуди компонента 0,80 Гц вибірки даних ТСГ-3

та точності розрахунку за небалансом активних та реактивних потужностей у вузлах схеми 0,01 МВт та 0,01 МВ Ар відповідно становить 626 МВт). Графік ТСГ-4 наведено на рис. Д.7 додатку Д. Збільшення навантаження, яке ініціювало виникнення НЧК у ТС-І, тут відбулося в момент часу $t = 0,10c$. Особливістю ТСГ-4 є дуже повільне зростання амплітуди НЧК (близько 1% за $30c$), що ускладнює ідентифікацію НЧК як незгасаючих з амплітудою, яка зростає з плином часу. Аналіз вибірки даних ТС-І із зазначеними вище параметрами, проведений offline за допомогою апарату модального аналізу для моменту часу $t = 5c$, показав наявність у ТС-І слабкодемпфованих мод з частотами 0,55 Гц (показник демпфірування $\xi = -0,001$), 1,06 Гц ($\xi = 0,081$) та 1,10 Гц ($\xi = 0,070$). Очевидно, що найбільшу загрозу з огляду на стійкість ЕС тут має мода з частотою 0,55 Гц, амплітуда коливань якої збільшується з плином часу.

З метою проведення аналізу було використано вибірку даних ТСГ-4, яка охоплює часовий відрізок $[0;10]c$ та має частоту дискретизації 60 Гц. Результати розрахунку параметрів ТСГ-4 за допомогою попередньо відібраних методів наведено в табл. Е.5 додатку Е. Аналіз результатів дослідження вибірки даних ТСГ-4 показав, що виконання розрахунку параметрів її складових із застосуванням вікон спостереження шириною до $10c$ включно не забезпечило “відокремлення” мод НЧК з частотами 1,06 Гц та 1,10 Гц. У той же час ідентифікацію мод з частотами близько 0,50 Гц та 1,00 Гц більшістю методів було забезпечено за умови застосування вікна спостереження шириною $2c$. Графіки, які відображають результати аналізу частот та амплітуд домінантних мод вибірки даних ТСГ-4, побудовані на основі розрахункових даних, отриманих за умови застосування вікон спостереження шириною $2c$ для методів аналізу сигналів, які забезпечили найбільш адекватні результати розрахунку параметрів мод ТСГ-4, наведено на рис. 3.18 – 3.21 (результати зведено до середини часових відрізків, які охоплюють відповідні вікна спостереження сигналу). Необхідно зазначити, що оскільки методи аналізу сигналів за розглянутої ширини вікна спостереження не забезпечили “відокремлення” мод з частотами 1,06 Гц та 1,10 Гц, то на графіках рис. 3.20 – 3.21 наведено результати для виявленої “спільної” моди (далі – мода “1,06 Гц + 1,10 Гц”).

Аналіз результатів табл. Е. 5 та рис. 3.19–3.21 показав, що для вибірки даних ТСГ-4:

– методи HTLS, МР, “класичний” та модифікований методи Проні забезпечили в режимі реального часу виявлення НЧК та визначення з належною точністю параметрів

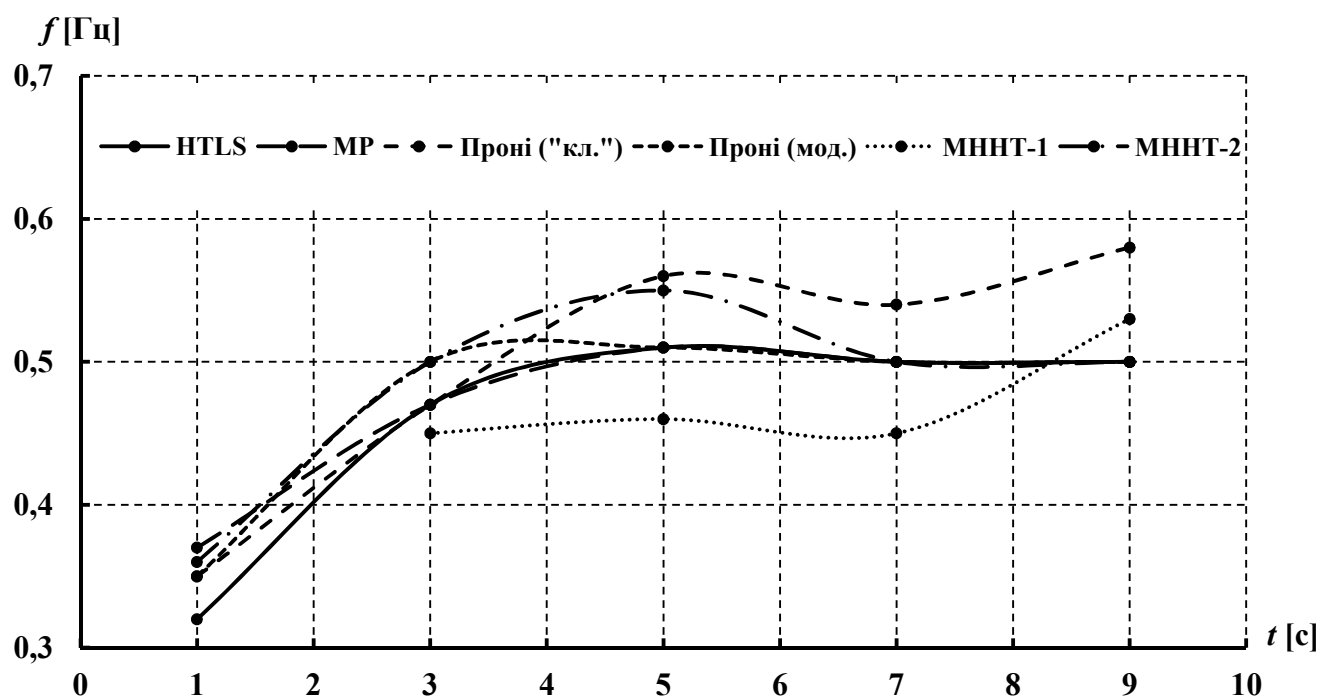


Рисунок 3.18 – Графіки визначеної частоти першої доміантної моди вибірки даних ТСГ-4

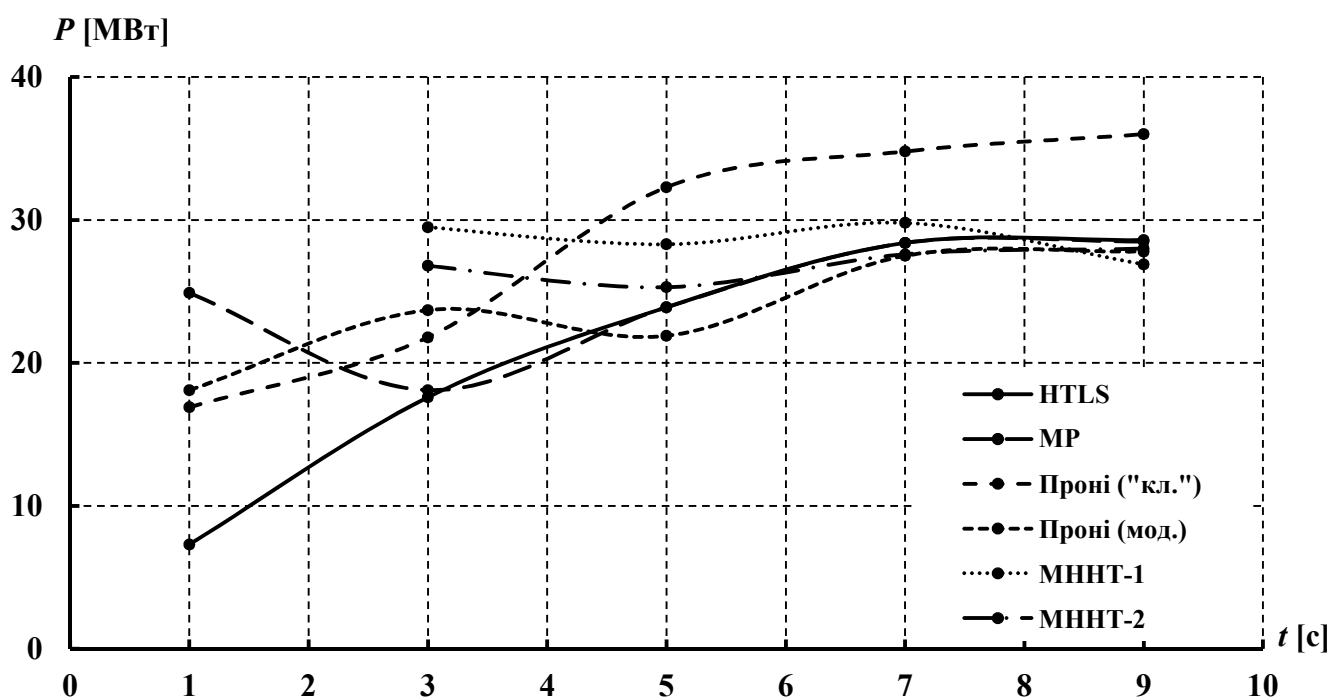


Рисунок 3.19 – Графіки визначеної амплітуди першої доміантної моди вибірки даних ТСГ-4

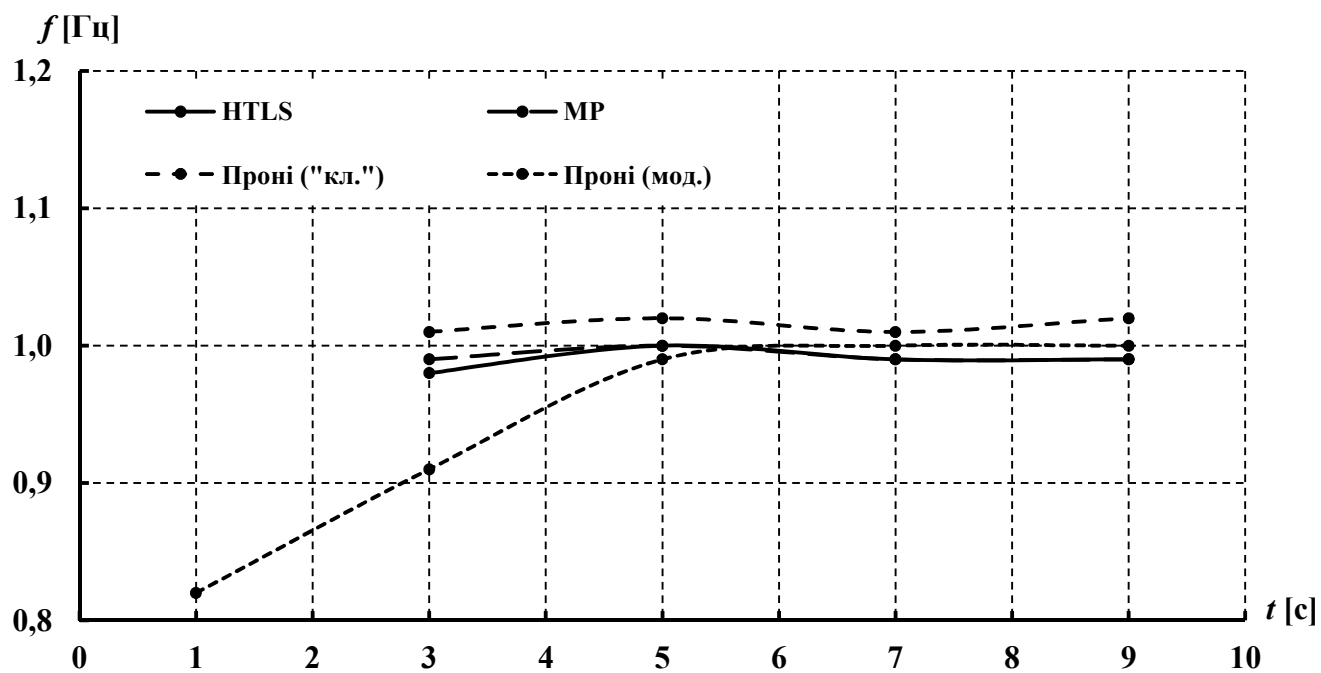


Рисунок 3.20 – Графіки визначеної частоти моди “1,06 Гц + 1,10 Гц” вибірки даних ТСГ-4

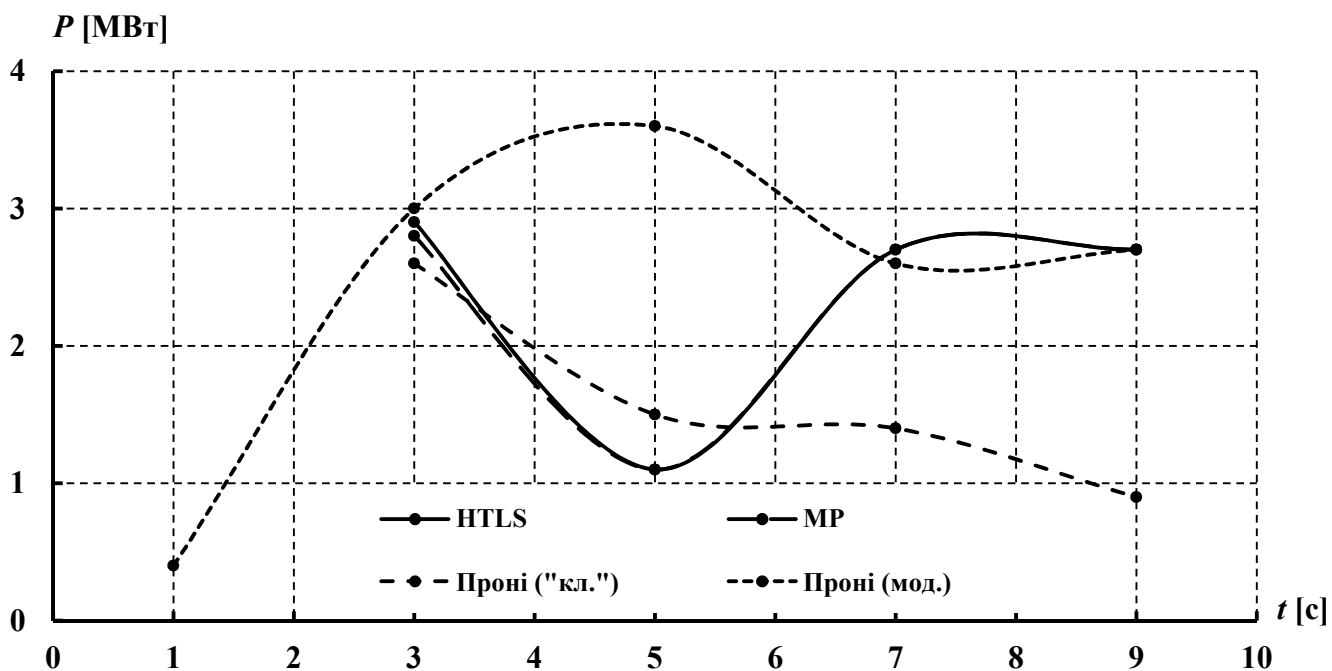


Рисунок 3.21 – Графіки визначеної амплітуди моди “1,06 Гц + 1,10 Гц” вибірки даних ТСГ-4

складових НЧК, ініційованих збуренням в ЕС (слід зауважити, що розраховані значення частот мод є дещо нижчими за значення, отримані за допомогою виконання модального аналізу схеми ЕС). В цьому випадку лише отримані за допомогою “класичного” методу Проні результати визначення параметрів мод НЧК адекватно відобразили реальну динаміку зміни з часом амплітуд домінантних мод вибірки ТСг-4. Зазначена обставина (разом із показаною раніше ненадійністю оцінювання рівня загрози мод НЧК у контексті стійкості ЕС (ЕО) на основі лише показника демпфірування) суттєво знижує надійність виявлення процесів повільного “розвитку” НЧК в ЕС (ЕО), які можуть призвести до коливного порушення стійкості ЕС (ЕО). З метою підвищення надійності виявлення небезпечних у контексті стійкості ЕС (ЕО) НЧК у дисертаційній роботі було запропоновано підхід, згідно з яким рівень загрози мод НЧК у зазначеному контексті має визначатися не лише за їхніми показниками демпфірування та динамікою зміни амплітуд, але і з урахуванням абсолютних значень амплітуд цих мод на основі співвідношення між визначеною для певного вікна спостереження амплітудою моди та прийнятим граничним значенням амплітуди $A_{гр}$ для мод НЧК (у разі перевищення амплітудою певної моди НЧК значення $A_{гр}$ ця мода вважається небезпечною);

– методи МННТ-1 та МННТ-2 підтвердили залежність результатів аналізу параметрів сигналів від ширини вікна спостереження. Так, у випадку застосування МННТ-1 за ширини вікна спостереження $1с$ не було ідентифіковано жодної наявної в ТСг-4 складової. У випадку застосування МННТ-2 за аналогічної ширини вікна спостереження було ідентифіковано компонент з частотою близько $0,92$ Гц, а за умови ширини вікна спостереження $2с$ – компонент з частотою близько $0,50$ Гц;

– не всі методи аналізу сигналів забезпечили виявлення наявних у вибірці даних ТСг-4 домінантних мод на часовому відрізку $[0;2]с$, який охоплює момент виникнення збурення в ЕО.

Аналогічне попередньому дослідження було проведено із застосуванням ТСг-5, який відображав значення потоку активної потужності по лінії 4–100 ТС-ІІ після виникнення на шинах 100 трифазного КЗ тривалістю $0,02с$. Графік ТСг-5 наведено на рис. Д.8 додатку Д. Трифазне КЗ, яке ініціювало НЧК у ТС-ІІ, виникло в момент часу $0,10с$. З [9] відомо, що для ТС-ІІ (за умови використання параметрів та налаштувань елементів ЕС відповідно до [9]) характерні 2 загальносистемні моди:

- з частотою близько 0,79 Гц коливаються M201 та M203 відносно решти CM EC;
- з частотою близько 1,34 Гц коливаються M1 та M3 відносно M101, M201 та M203.

З метою проведення аналізу було застосовано вибірку даних ТСГ-5, яка охоплює часовий відрізок $[0; 10]c$ та має частоту дискретизації 50 Гц (що відповідає можливостям, зокрема, ЕВРП “Регіна-Ч” та вимогам [75] стосовно каналів передавання даних). Результати розрахунку параметрів ТСГ-5 за допомогою попередньо відібраних методів наведено в табл. Е.6 додатку Е. Графіки, які відображають результати аналізу частот домінантних мод вибірки даних ТСГ-5, побудовані на основі розрахункових даних, отриманих за умови застосування вікон спостереження шириною $2c$ для методів аналізу сигналів, які забезпечили найбільш адекватні результати розрахунку параметрів мод ТСГ-5, наведено на рис. 3.22 та рис. 3.23 (результати зведено до середини часових відрізків, які охоплюють відповідні вікна спостереження сигналу).

Аналіз результатів табл. Е. 6 та рис. 3.22–3.23 показав, що:

- “класичний” метод Проні, який за результатами досліджень вибірок даних ТСГ-1–ТСГ-4 показав найбільш адекватні (порівняно з іншими застосованими методами аналізу сигналів) результати розрахунку параметрів складових НЧК, та модифікований метод Проні за результатами аналізу вибірки даних ТСГ-5 змогли забезпечити “відокремлення” домінантних мод НЧК лише за умови застосування вікон спостереження шириною $5c$. За умови застосування ширини вікна спостереження в $2c$ цими методами аналізу сигналів було визначено наявність лише однієї моди НЧК;

- метод ВП, який не надав якісних результатів для вибірок даних ТСГ-2 – ТСГ-4, для вибірки даних ТСГ-5 показав адекватні результати визначення частот домінантних мод НЧК (необхідно зазначити, що розраховані цим методом аналізу сигналів амплітуди домінантних мод не відповідають їх реальним значенням);

- методи МННТ-1 та МННТ-2, які не надали якісних результатів для вибірок даних ТСГ-2 – ТСГ-3 і виявили лише одну домінантну моду для вибірки даних ТСГ-4, для вибірки даних ТСГ-5 показали адекватні результати;

- здатність методу МННТ-1 виявляти НЧК та визначати параметри їхніх мод залежить від сигналу, вибірка даних якого підлягає аналізу. Зокрема, визначення параметрів складових НЧК, наявних у вибірці даних ТСГ-4, за умови застосування МННТ-1 та

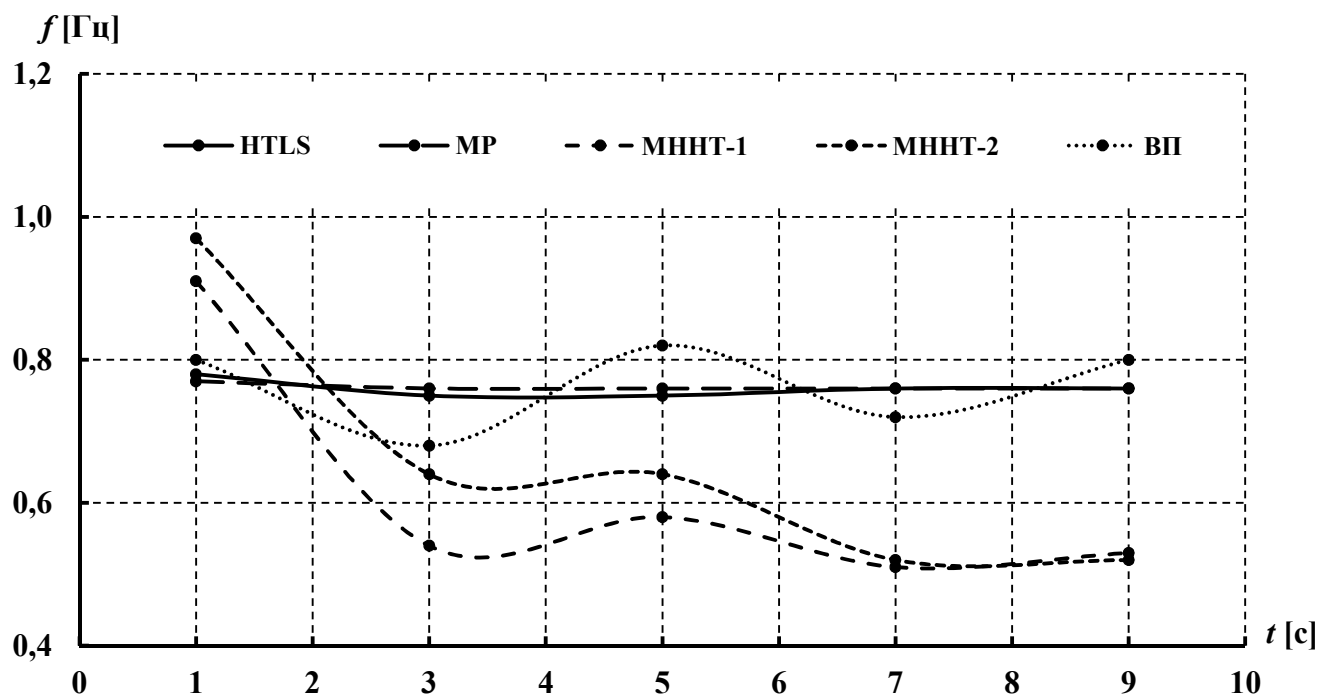


Рисунок 3.22 – Графіки визначеної частоти першої доміантної моди вибірки даних ТСГ-5

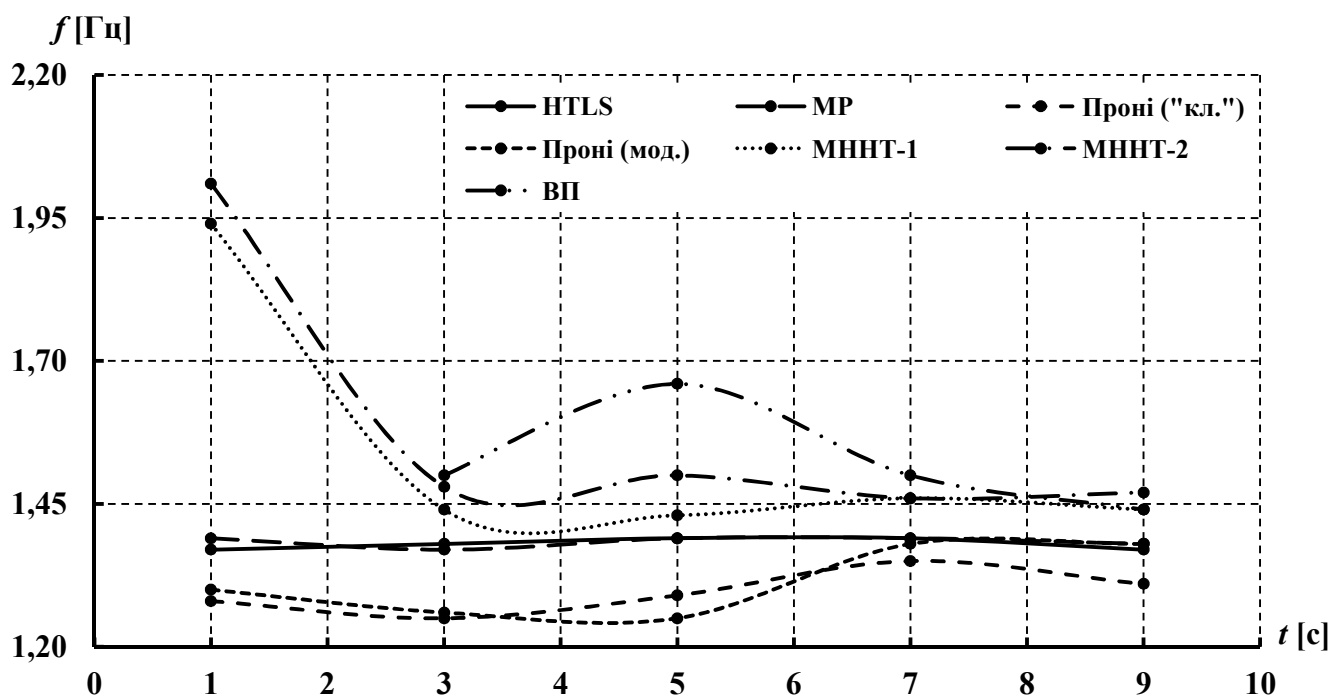


Рисунок 3.23 – Графіки визначеної частоти другої доміантної моди вибірки даних ТСГ-5

вікон спостереження шириною в $1c$ виявилось неможливим, а для вибірки даних ТСг-5 за тих же умов параметри складових НЧК було визначено (хоча і з певними похибками) майже на всіх часових відрізках;

- за допомогою методів HTLS та MP у вибірці даних ТСг-5 було визначено наявність складової з частотою $2,0\text{--}2,2$ Гц та амплітудою до 1 МВт, присутність якої не показано, зокрема, в [9]. Епізодичну появу складової з подібною частотою було виявлено також у результатах аналізу вибірки даних ТСг-5 за допомогою інших методів;

- деякі значення параметрів складових НЧК, отримані в результаті аналізу вибірки даних ТСг-5, не відповідали фактичним значенням параметрів. Зокрема, у випадку застосування для аналізу за допомогою модифікованого методу Проні вибірки даних ТСг-5 на часовому відрізку $[8; 10]c$ було отримано домінуючу моду з частотою $0,09$ Гц та амплітудою $288,3$ МВт, у той час як значення потоку активної потужності по лінії $4\text{--}100$ на цьому ж відрізку часу не перевищувало 180 МВт.

За результатами аналізу вибірок даних ТСг-1 – ТСг-5 було зроблено такі висновки:

- серед досліджених методів аналізу сигналів найбільш адекватні результати визначення параметрів складових НЧК забезпечили методи, які ґрунтуються на експоненціальній моделі опису сигналу: HTLS, MP, “класичний” та модифікований методи Проні. З метою визначення порядку експоненціальної моделі для довільного сигналу доцільним є застосування принципу MDL з реалізацією його згідно з (3.5);

- якість визначення параметрів складових НЧК дослідженими методами аналізу сигналів залежить від “ширини” часового відрізка, який охоплює вікно спостереження, що містить дані, які підлягають аналізу. Збільшення цього часового відрізка підвищує точність результатів, але знижує їх оперативну актуальність. З метою забезпечення певного компромісу в КІВП НЧК ІСД доцільно застосовувати вікна спостереження шириною $2\dots 5c$;

- найвища точність результатів аналізу параметрів складових НЧК для різних методів може досягатися за неоднакової ширини вікна спостереження. З цієї причини доцільним є забезпечення можливості роботи різних методів аналізу сигналів у складі КІВП НЧК ІСД з неоднаковими за шириною вікнами спостереження;

- точність (адекватність) визначення параметрів складових НЧК за допомогою кожного з досліджених методів аналізу є неоднаковою для різних сигналів, які

відображають процеси виникнення та “розвитку” НЧК за різних режимних умов та в різних схемах. З цієї причини забезпечення ефективної (для усього діапазону можливих режимів ЕО) роботи ІСД НЧК з використанням в інформаційному “ядрі” лише якогось одного методу аналізу сигналів може призводити до невиявлення загрози коливного порушення стійкості ЕО внаслідок незабезпечення своєчасної ідентифікації небезпечної (з огляду на необхідність забезпечення стійкої роботи ЕО) домінантної моди НЧК. З метою підвищення надійності функціонування КІВП НЧК ІСД слід використовувати ансамбль паралельно задіяних методів аналізу сигналів (відповідних програмних засобів) з подальшим узагальненням результатів їх роботи;

- результати оцінювання характеру демпфірування мод НЧК, отримані на підставі лише значень їх показників демпфірування, є ненадійними. З метою отримання адекватної оцінки характеру демпфірування мод НЧК додатково необхідно контролювати характер зміни з плином часу амплітуди кожної моди;

- для всіх методів аналізу сигналів доцільною є “фільтрація” отриманих результатів розрахунку параметрів складових НЧК від “викидів” – складових НЧК з амплітудами, значення яких для розглянутого в рамках проаналізованого вікна спостереження відрізка процесу перевищують максимальне значення параметра, зміну якого з часом відображає сигнал, вибірка даних якого підлягає аналізу (наприклад, у випадку здійснення аналізу параметрів складових НЧК вибірки даних ТСт-5 на часовому відрізку [8; 10]с за допомогою модифікованого методу Проні було отримано домінантну моду з частотою 0,09 Гц та амплітудою 288,3 МВт, у той час як значення потоку активної потужності по лінії 4–100 на цьому ж відрізку часу не перевищувало 180 МВт, що дає змогу зробити висновок про неадекватне визначення параметрів цієї моди);

- охоплення вікном спостереження сигналу, яке підлягає аналізу, часового відрізка, який містить момент виникнення збурення в ЕО, що спричинило виникнення в ньому НЧК, погіршує ефективність роботи розглянутих методів аналізу сигналів. З метою підвищення оперативності виявлення та адекватності визначення параметрів складових НЧК бажаним є щосекундний розрахунок параметрів складових НЧК сигналів із залученням до цього розрахунку нових відліків даних, отриманих від WAMS.

Слід зазначити, що усі проведені дослідження, результати яких наведено вище, було виконано для тестових сигналів, що не містили шумів (завад). Втім, раніше в цьому розділі було показано, що для WAMS із цифровими каналами зв'язку SNR зазвичай перебуває в діапазоні 80...120 дБ, а в перші моменти після виникнення значних (інтенсивних) збурень в ЕС (ЕО) може становити 2...10 дБ. Тому було проведено дослідження можливостей попередньо відібраних методів аналізу сигналів надійно виявляти НЧК та адекватно визначати параметри їхніх мод за умови наявності у вибірці даних сигналу, яка підлягає аналізу, шуму (завад) з SNR у діапазоні 5...120 дБ. Зазначене дослідження було виконано із застосуванням вибірки даних ТСг-4, до якої у відповідних відношеннях було додано “білий” шум. Оскільки раніше було показано недоцільність проведення аналізу сигналів із застосуванням досліджених методів за умови застосування вікон спостереження, які охоплюють часові відрізки менше $2c$ та більше $5c$, то розрахунок параметрів складових НЧК з шириною вікна спостереження $1c$ та $10c$ для цієї вибірки даних не проводився. Результати розрахунку параметрів ТСг-4 за допомогою попередньо відібраних методів за умови наявності в сигналі шумів (завад) наведено в табл. Е.7 додатку Е (слід зауважити, що в таблиці наведено лише компоненти, амплітуда яких виявилася більшою за 1 МВт). Узагальнені результати дослідження можливостей методів аналізу сигналів з визначення параметрів ТСг-4 за наявності шуму у випадку застосування вікон спостереження шириною $2c$ за двома умовними критеріями якості – здатністю ідентифікації моди з частотою близько 0,55 Гц та “спільної” моди “1,06 Гц + 1,10 Гц”, а також забезпеченням адекватного відслідковування динаміки зміни амплітуд цих мод – наведено в табл. 3.4.

Кінцева границя зазначеного в графі табл. 3.4 діапазону SNR вказує на значення SNR, за якого відповідний умовний критерій якості аналізу виконується (повністю або частково), а початкова границя – на значення SNR, за якого цей критерій вже не виконується. Необхідно зазначити, що за SNR вибірки ТСг-4 100 дБ та вище методи HTLS, MP, “класичний” та модифікований методи Проні практично повністю забезпечили адекватне відслідковування динаміки зміни ідентифікованих мод, оскільки на проаналізованому відрізку вибірки ТСг-4 $[0;10]c$ для “спільної” моди було визначено практично монотонне зростання амплітуди (див. табл. Е.7 додатку Е), а для моди з частотою близько 0,55 Гц –

Таблиця 3.4 – Результати дослідження можливостей методів аналізу сигналів з визначення параметрів ТСГ-4 з шумом за умови застосування вікон спостереження шириною $2c$

№ з/п	Метод аналізу	Умовний критерій якості аналізу	
		Ідентифікація мод 0,55 Гц та “1,06 Гц + 1,10 Гц”	Адекватне відслідковування динаміки зміни амплітуди мод 0,55 Гц та “1,06 Гц + 1,10 Гц”
1	ДПФ	не забезпечує	не забезпечує
2	HTLS	(10...20 дБ) < SNR	забезпечує частково для (60...80 дБ)<SNR
3	MP	(10...20 дБ) < SNR	забезпечує частково для (60...80 дБ)<SNR
4	Проні (“класичний”)	(80...100 дБ) < SNR	забезпечує повністю для (80...100 дБ)<SNR
	Проні (модифікований)	(40...60 дБ) < SNR	забезпечує частково для (40...60 дБ)<SNR
5	ВП (на базі ВТФ Морле)	не забезпечує	не забезпечує
6	МННТ-1	не забезпечує	не забезпечує
	МННТ-2	не забезпечує	не забезпечує

практично монотонне її спадання (що відповідає реальній картині відповідно до розрахованих значень показників демпфірування цих мод). За нижчого SNR вибірки ТСГ-4 за отриманими із застосуванням зазначених методів аналізу сигналів результатами розрахунку параметрів складових НЧК зазначену монотонність зростання та спадання амплітуд ідентифікованих мод на деяких відрізках вибірки було порушено (наприклад, розраховане за допомогою методу MP значення амплітуди “спільної” моди вибірки ТСГ-4 з SNR 80 дБ на відрізку $[4;6]c$ становило 1 МВт, а для відрізків $[2;4]c$ та $[6;8]c$ – 2,6 МВт та 2,7 МВт відповідно).

За результатами розрахунку параметрів ТСГ-4 з шумом було зроблено такі висновки:

– наявний у сигналі шум негативно впливає на адекватність (точність) результатів розрахунку частот та амплітуд низькочастотних мод, отриманих за допомогою досліджених методів аналізу сигналів. Ступінь викривлення результатів визначення параметрів складових НЧК, спричинений наявним у сигналі шумом, залежить не лише від SNR сигналу, але і від застосованого з метою визначення цих параметрів методу аналізу сигналів. Найменш вразливими з огляду на забезпечення адекватності (точності) визначення частот домінуючих мод до наявності шумів у вибірці даних сигналу, яка підлягає аналізу, виявилися методи HTLS та MP, а з огляду на забезпечення адекватності (точності) визначення амплітуд цих мод – модифікований метод Проні. Зазначені результати дають підстави для висновку щодо необхідності застосування ансамблю паралельно функціонуючих засобів, які реалізують відібрані внаслідок проведених досліджень методи аналізу сигналів, з подальшим аналізом-узагальненням одержуваних результатів з метою забезпечення надійності роботи КІВП НЧК ІСД;

– “класичний” метод Проні забезпечив найкращі результати розрахунку параметрів мод вибірки даних ТСг-4 із шумом за умови, що SNR цієї вибірки є меншим від 100 дБ, але більшим від 80 дБ (тут найбільш небезпечну (з огляду на можливість порушення стійкості ЕО внаслідок зростання її амплітуди) моду з частотою близько 0,5 Гц було надійно ідентифіковано навіть у разі, коли SNR становило 40 дБ). З урахуванням того, що для WAMS з цифровими каналами зв’язку SNR у нормальних режимах ЕС (ЕО) зазвичай перебуває в діапазоні 80...120 дБ, з метою підвищення ефективності застосування цього методу для визначення параметрів низькочастотних складових сигналів доцільною є попередня цифрова фільтрація шумів у формуємих вибірках даних, якими подаються сигнали на відповідних часових відрізках їх реєстрації;

– оскільки в перші моменти після виникнення інтенсивних збурень в ЕС (ЕО) SNR для сигналів у цифрових каналах WAMS може становити 2...10 дБ, а досліджені методи аналізу сигналів можуть забезпечити адекватність розрахунку параметрів складових НЧК за умови $SNR > 40$ дБ, то з метою забезпечення отримання актуальної оперативної інформації щодо параметрів складових НЧК доцільним є виконання аналізу даних вікон спостереження після здійснення в них цифрової фільтрації шумів;

– збільшення часового відрізка, який охоплює вікно спостереження сигналу, підвищує точність результатів розрахунку, але знижує їх оперативну актуальність. З метою забезпечення певного компромісу в КІВП НЧК ІСД доцільно застосовувати вікна спостереження шириною від $2c$ з можливістю збільшення їх ширини до $5c$ у перші моменти після виникнення в ЕС (ЕО) інтенсивних збурень;

– для результатів розрахунку параметрів складових НЧК, отриманих для сигналів із шумом, доцільною є “фільтрація” від “викидів”.

Отже, за результатами аналізу вибірок даних тестових сигналів для забезпечення роботи КІВП НЧК ІСД було відібрано 2 групи методів аналізу сигналів:

- основна – НТЛС, МР, “класичний” та модифікований методи Проні;
- референсна (допоміжна) – ДПФ та МННТ-2.

Необхідно зазначити, що методи ДПФ та МННТ-2 було включено до референсної групи незважаючи на їх неповну відповідність (за результатами аналізу вибірок даних ТСг-1 – ТСг-5) деяким вимогам, сформульованим у пункті 3.2.1 для КІВП НЧК ІСД

(так, метод ДПФ не забезпечив виявлення більшості складових цих тестових сигналів, а метод МННТ-2 не забезпечив належної точності визначення частот визначених складових). Метод ДПФ було залучено до референсної групи як досить поширений метод аналізу сигналів, за допомогою якого здійснюють визначення (переважно, offline) параметрів складових НЧК у процесі функціонування діючих у низці країн світу WAMS. Метод МННТ-2 було включено до цієї ж групи як найкращу з досліджених модифікацію методу ННТ, яку без жодних обмежень може бути застосовано з метою аналізу параметрів як лінійних та стаціонарних, так і нелінійних та нестационарних процесів. Важливою особливістю методу МННТ-2 у контексті доцільності його застосування в інформаційному “ядрі” ІСД НЧК є інший, у порівнянні з методами основної групи, підхід до визначення порядку моделі сигналу. Крім того, обидва методи аналізу сигналів референсної групи потребують суттєво меншого часу на розрахунок параметрів складових НЧК у порівнянні із методами основної групи.

Реалізацію в середовищі “Matlab” функцій розрахунку параметрів складових сигналів методами ДПФ, HTLS, МР, МННТ-2, “класичним” та модифікованим методами Проні наведено в лістингах Ж.2–Ж.7 додатку Ж.

Висновки по розділу 3

1) З урахуванням вимог щодо точності та оперативності визначення в режимі реального часу параметрів домінантних мод НЧК внаслідок всебічного дослідження та селекції методів аналізу сигналів було сформовано основну (у складі методу загальних найменших квадратів Ганкеля, методу пучка матриць, “класичного” та модифікованого методів Проні) та референсну (у складі методів, які застосовують дискретне перетворення Фур’є та модифіковане перетворення Гільберта-Хуанга) групи методів.

2) Експериментально доведено, що порядок моделі сигналів, які підлягають аналізу з метою визначення параметрів домінантних мод НЧК, може бути адекватно та оперативно визначено з використанням принципу мінімальної довжини опису (MDL).

3) Експериментально встановлено, що необхідної точності (адекватності) та оперативності визначення параметрів домінантних мод НЧК за допомогою комплексу ідентифікації та визначення параметрів НЧК інтегрованої системи демпфірування НЧК

може бути досягнуто за умови використання вікон спостереження шириною $2 \dots 5c$ з частотою дискретизації значень, не нижчою від частоти основної гармоніки струму.

4) Встановлено, що результати реєстрації режимних параметрів ЕВРП “Регіна-Ч” забезпечують можливість надійного та адекватного визначення параметрів доміантних мод НЧК засобами інтегрованої системи демпфірування НЧК.

5) Встановлено, що точність (адекватність) визначення параметрів складових НЧК за допомогою кожного з відібраних методів аналізу є неоднаковою для різних сигналів, які відображають процеси виникнення та “розвитку” НЧК за різних режимних умов та різних ЕС (ЕО). Експериментально доведено, що забезпечення ефективної роботи інтегрованої системи демпфірування НЧК з використанням в її інформаційному “ядрі” лише якогось одного методу аналізу сигналів може призводити до невиявлення загрози коливного порушення стійкості ЕО. Встановлено і експериментально доведено, що для підвищення надійності визначення параметрів доміантних мод НЧК потрібно використовувати ансамбль методів аналізу сигналів (відповідних програмних засобів) з подальшим узагальненням одержаних результатів.

6) Встановлено, що для адекватного оцінювання характеру демпфірування мод НЧК крім визначення показника демпфірування потрібно додатково відслідковувати динаміку зміни у часі амплітуди кожної моди. Рівень небезпечності мод НЧК слід визначати з урахуванням абсолютних значень амплітуд цих мод на основі співвідношення між визначеною (для певного вікна спостереження) амплітудою моди та прийнятим граничним значенням амплітуди мод НЧК.

7) Для забезпечення адекватності результатів визначення параметрів доміантних мод НЧК будь-яким методом аналізу сигналів слід здійснювати фільтрацію “викидів” в результатах такого визначення.

8) Встановлено, що з метою отримання актуальної оперативної інформації щодо параметрів складових НЧК за наявності шумів в сигналах, які підлягають аналізу, доцільно здійснювати цифрову фільтрацію шумів даних вікон спостереження перед їх обробленням за допомогою комплексу ідентифікації та визначення параметрів НЧК. Визначено необхідність виконання зазначеної фільтрації для даних вікон спостереження, які містять значення режимних параметрів, зареєстровані в перші моменти після виникнення інтенсивних збурень в ЕО.

РОЗДІЛ 4

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ONLINE-ОЦІНЮВАННЯ ЗАГРОЗИ КОЛИВНОГО ПОРУШЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГООБ'ЄДНАННЯ

4.1 Розроблення процедури узагальнення результатів виявлення домінантних мод НЧК та визначення їхніх параметрів

Для забезпечення розв'язання в режимі реального часу засобами ІСД НЧК задач виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх складових було всебічно досліджено та відібрано методи аналізу сигналів для основної та референсної груп (ансамблів). Використання зазначених методів аналізу сигналів може давати дещо різні значення параметрів визначених мод НЧК, тому в дисертаційній роботі було розроблено процедуру узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх домінантних мод з урахуванням таких умов:

а) під час узагальнення результатів, отриманих за допомогою певного методу аналізу сигналів, вважається, що:

1) моди з різницею частот, меншою за Δf_1 , є однією модою. Прийнято, що:

1.1) частота та амплітуда такої узагальненої моди дорівнюють відповідним параметрам моди з більшою амплітудою коливань;

1.2) характер демпфірування узагальненої моди визначається шляхом аналізу зміни у часі її амплітуди A , розрахованої (з урахуванням вимоги до оперативності виявлення мод НЧК з від'ємним демпфіруванням) для трьох послідовних вікон спостереження. Враховано, що:

1.2.1) зважаючи на можливу наявність у вибірці даних аналізованого сигналу моди зі змінною у часі частотою в $(k-2)$ -му та $(k-1)$ -му вікнах спостереження необхідно розглянути амплітуди мод, що мають частоти з відхиленням до $\pm\Delta$ від частоти розглядуваної моди в k -му вікні спостереження;

1.2.2) демпфірування узагальненої моди називатимемо стійко від'ємним у випадку зростання її амплітуди для трьох послідовно досліджених вікон спостереження;

1.2.3) демпфірування узагальненої моди називатимемо вірогідно від'ємним у випадку зростання її амплітуди для першого та другого або для першого та третього вікон спостереження (останній випадок характерний для НЧК, амплітуда яких повільно збільшується з плином часу);

1.2.4) демпфірування узагальненої моди називатимемо стійко додатним у випадку зменшення її амплітуди для трьох послідовно досліджених вікон спостереження;

1.3) амплітуду узагальненої моди, меншу за порогове значення A' , до подальшого оброблення її не залучають (зазначений пункт дає можливість здійснити “фільтрацію” результатів розрахунку від низькоамплітудних складових, джерелом яких є шуми);

1.4) амплітуду узагальненої моди, більшу за A'' , визначено хибно і до подальшого оброблення її не залучають. Значення A'' для k -го вікна спостереження має бути визначено так:

$$A'' = \begin{cases} S_{\max}, & \text{якщо } 0 < S_{\min} < S_{\max}; \\ |S_{\min}|, & \text{якщо } 0 > S_{\max} > S_{\min}; \\ S_{\max} - S_{\min}, & \text{якщо } (S_{\max} > 0) \wedge (S_{\min} < 0), \end{cases}$$

де S_{\max} та S_{\min} – максимальне та мінімальне значення параметра, зміну якого з часом відображає сигнал, який підлягає аналізу, в k -му вікні спостереження;

б) під час узагальнення результатів роботи усіх задіяних методів аналізу сигналів вважається, що:

1) результати, отримані із застосуванням різних методів основної групи, однаковою мірою достовірні;

2) моди з різницею частот, меншою за Δf_2 , є однією модою. Прийнято, що:

2.1) частота та амплітуда результуючої моди визначаються як середнє арифметичне відповідних параметрів, розрахованих із застосуванням методів аналізу сигналів основної групи (дія виконується з урахуванням результатів фільтрації мод за A' та A'' в рамках узагальнення результатів, отриманих за допомогою певного методу аналізу сигналів);

2.2) демпфірування результуючої моди вважається стійко від’ємним, якщо принаймні один з методів аналізу сигналів основної групи вказав на стійко від’ємний характер демпфірування цієї моди;

2.3) демпфірування результуючої моди вважається стійко додатним, якщо всі методи аналізу сигналів основної групи вказують на стійко додатний характер демпфірування цієї моди;

3) результуюча мода є реально існуючою, якщо її було ідентифіковано, принаймні, двома методами аналізу сигналів основної групи або одним методом основної та одним

методом референсної груп. У випадку, коли моду було ідентифіковано лише одним методом основної групи, з метою підтвердження її існування виконується розрахунок параметрів сигналу із застосуванням методів референсної групи з поступовим збільшенням ширини вікна спостереження до граничного значення $T_{гр}$. Розрахунок параметрів складових НЧК методами референсної групи здійснюється або до отримання одним з методів підтвердження існування моди, виявленої методом основної групи, або до досягнення шириною вікна спостереження значення $T_{гр}$, після чого методи референсної групи повертаються до роботи із заданою шириною вікна спостереження $T_{зад}$. Залучення менш точних (у порівнянні з методами основної групи) методів референсної групи з метою підтвердження існування моди пов'язано із їх високою швидкістю, що дає можливість багатократного застосування цих методів у рамках одного циклу визначення параметрів складових НЧК інформаційним “ядром” ІСД НЧК. Крім того, проведені із застосуванням тестових сигналів дослідження показали, що виявлення реально існуючої моди НЧК лише одним методом аналізу сигналів основної групи є доволі мало ймовірним;

4) результуюча мода є небезпечною, якщо її амплітуда перевищує значення $A_{гр}$.

Алгоритм процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх доміантних мод у програмному комплексі online-оцінювання загрози коливного порушення стійкості ЕО наведено на рис. 4.1а та рис. 4.1б.

Перевірку адекватності роботи зазначеної процедури було здійснено із застосуванням чотирьох тестових та зареєстрованих ЕВРП “Регіна-Ч” сигналів. За перший сигнал було взято розглянутий у розділі 3 ТСГ-5 (графік ТСГ-5 наведено на рис. Д.8 додатку Д), частоти загальносистемних мод якого (згідно з [9]) становлять близько 0,79 Гц та 1,34 Гц. Значення параметрів процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх доміантних мод, за яких із застосуванням наведеної в розділі 3 вибірки даних ТСГ-5 було проведено перевірку адекватності роботи цієї процедури, наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Значення параметрів процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх доміантних мод, застосовані для вибірки даних ТСГ-5

Параметр	$T_{зад}, c$	Зсув вікна спостереження, c	$\Delta f_1, Гц$	$\Delta, Гц$	$A', МВт$	$\Delta f_2, Гц$	$T_{гр}, c$	$A_{гр}, МВт$
Значення	2	1	0,02	0,10	1	0,05	5	10

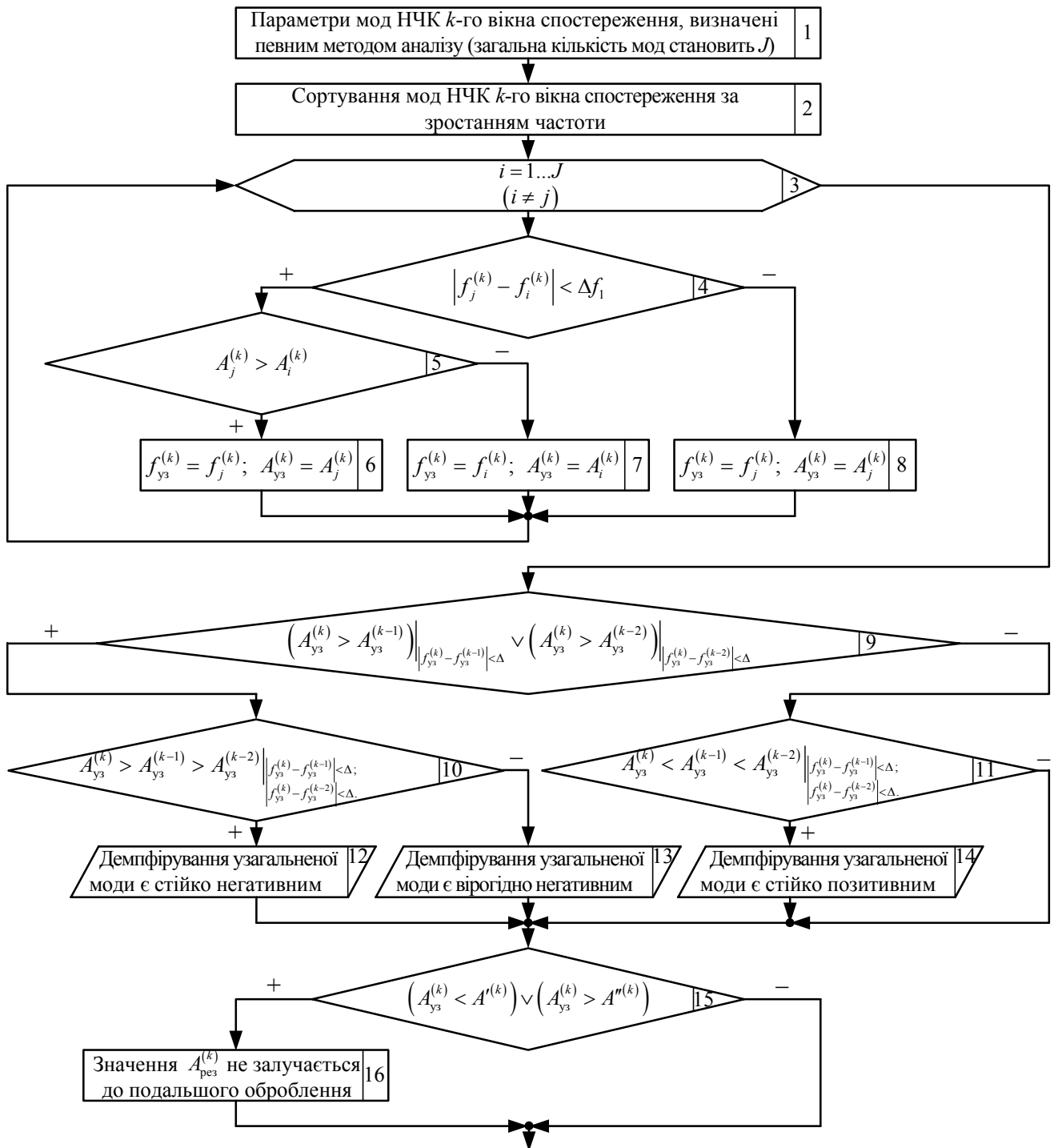


Рисунок 4.1а – Алгоритм процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх доміантних мод (узагальнення в рамках одного методу аналізу сигналів)

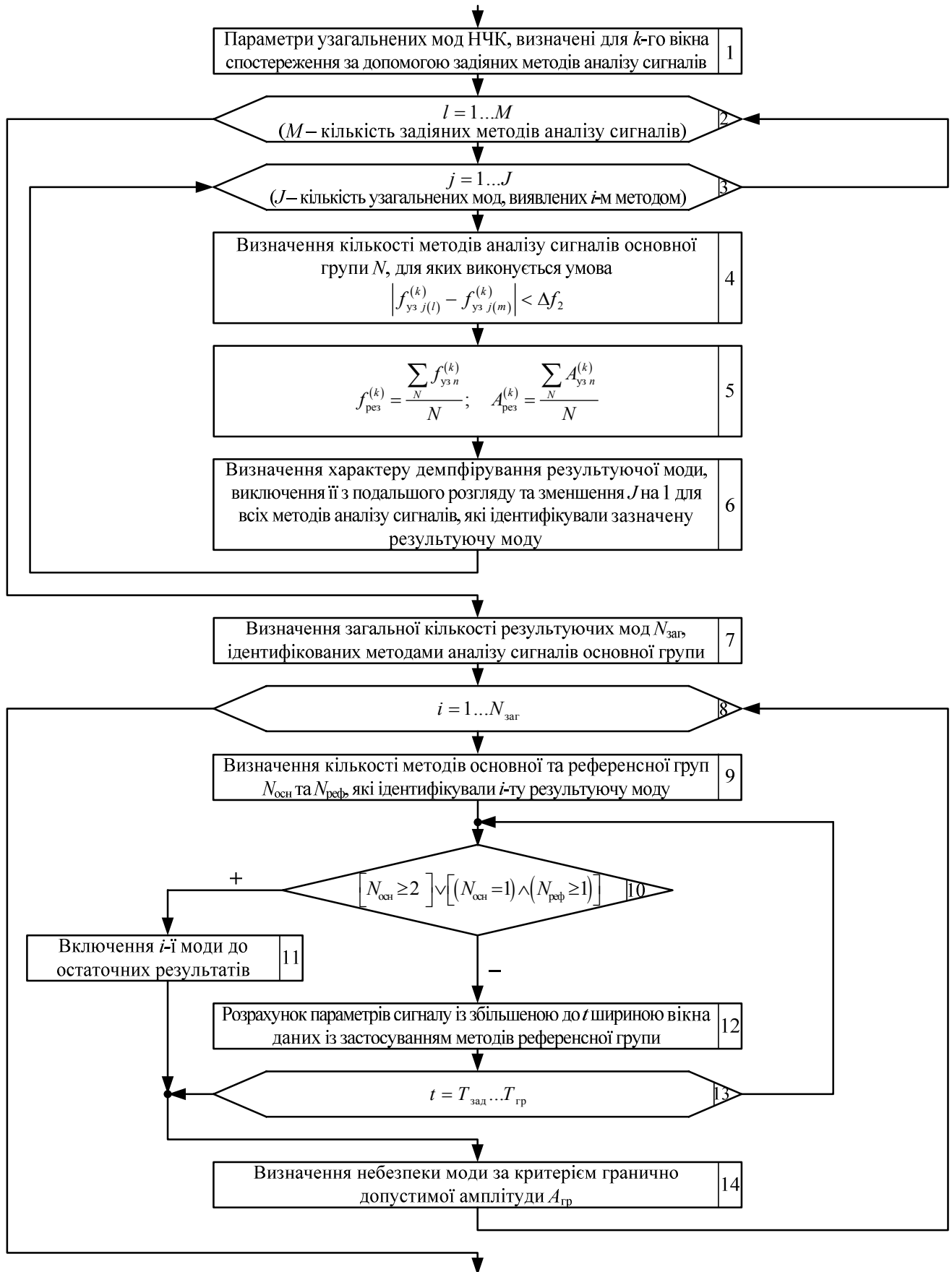


Рисунок 4.16 – Алгоритм процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх доміантних мод (узагальнення в рамках всіх методів аналізу сигналів)

Пояснення застосованих у табл. 4.1 позначень наведено вище. Вибір значення $T_{\text{зад}}=2c$ аргументовано тим, що за такої ширини вікна для застосованих у КІВП НЧК ІСД методів аналізу сигналів було отримано найбільш адекватні (згідно з результатами досліджень, наведеними в розділі 3) значення параметрів доміантних мод. Зсув вікна спостереження в $1c$ було обрано з метою забезпечення можливості максимально чіткого відслідковування динаміки зміни амплітуди низькочастотних мод. Значення Δf_2 обрано виходячи з того факту, що в літературі не наведено випадків існування в реальних ЕС (ЕО) низькочастотних мод з різницею частот, меншою за Δf_2 . Значення Δf_1 обрано з умови ($2\Delta f_1 < \Delta f_2$), яка забезпечує функціональне узгодження цих величин. Вибір значення $T_{\text{гр}}$ було здійснено на підставі вимоги до актуальності результатів розрахунку параметрів низькочастотних мод та результатів досліджень методів референсної групи, наведених у розділі 3. Значення Δ було обрано з урахуванням можливості існування у вибірці даних сигналу моди зі змінною з плином часу частотою та з причини наявності похибок розрахунку значень частот доміантних мод НЧК. Решту параметрів процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх доміантних мод, застосованих для вибірки даних ТСГ-5, було обрано на підставі результатів досліджень, наведених у розділі 3.

Результати дослідження вибірки даних ТСГ-5 із застосуванням процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх доміантних мод наведено в табл. 4.2. Аналіз даних цієї таблиці показав наявність у вибірці даних ТСГ-5 доміантних мод НЧК з частотами близько 0,76 Гц та 1,38 Гц (що відповідає результатам, наведеним у [9]) з небезпечними (відповідно до критерію $A_{\text{гр}}$) амплітудами та змінним у часі характером демпфірування. Наявність для обох мод послідовностей вікон спостереження, в яких було визначено вірогідно від'ємне та стійко від'ємне демпфірування, свідчить про незгасаючий характер НЧК із зазначеними частотами на досліджених часових відрізках процесу.

Ідентифікацію у вибірці даних ТСГ-5 моди з частотою близько 0,76 Гц на всіх досліджених часових відрізках було здійснено усіма методами аналізу сигналів основної групи, моди з частотою 1,38 Гц – методами МР та НТЛС. Виявлення у вибірці даних ТСГ-5 на часових відрізках $[0;2]c$ та $[2;4]c$ моди з частотою близько 1,29 Гц було здійснено “класичним” та модифікованим методами Проні, які (як було показано

Таблиця 4.2 – Результати дослідження ТСг-5 із застосуванням процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх доміантних мод

Часовий відрізок, <i>c</i>	Розрахункові параметри виявлених мод НЧК											
	Мода №1				Мода №2				Мода №3			
	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , кВ	Характер демпфірування	Ознака загрози	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , кВ	Характер демпфірування	Ознака загрози	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , кВ	Характер демпфірування	Ознака загрози
0–2	0,78	33,4	не визначено	небезпечна	1,29	34,9	не визначено	небезпечна	1,38	22,1	не визначено	небезпечна
1–3	0,76	33,6	вірогідно від'ємне	небезпечна	1,37	22,0	вірогідно від'ємне	небезпечна				
2–4	0,76	33,2	вірогідно від'ємне	небезпечна	1,26	26,1	вірогідно від'ємне	небезпечна	1,38	23,9	стійко від'ємне	небезпечна
3–5	0,74	32,6	вірогідно від'ємне	небезпечна	1,37	27,4	стійко від'ємне	небезпечна				
4–6	0,76	31,0	вірогідно від'ємне	небезпечна	1,39	29,1	стійко від'ємне	небезпечна				
5–7	0,76	30,7	стійко додатне	небезпечна	1,40	29,3	стійко від'ємне	небезпечна				
6–8	0,76	30,3	стійко додатне	небезпечна	1,38	31,4	вірогідно від'ємне	небезпечна				
7–9	0,73	32,0	вірогідно від'ємне	небезпечна	1,40	25,8	вірогідно від'ємне	небезпечна	2,18	3,7	вірогідно від'ємне	
8–10	0,76	33,8	стійко від'ємне	небезпечна	1,38	28,0	вірогідно від'ємне	небезпечна	2,02	1,0	вірогідно від'ємне	

в розділі 3) на деяких часових відрізках вибірки даних ТСГ-5 забезпечили визначення частот доміантних мод із певними похибками. Слід зазначити, що збільшення значення параметра Δf_2 до 0,1 Гц забезпечує для досліджених часових відрізків процесу ідентифікацію мод з частотами близько 0,76 Гц та 1,34 Гц. Ідентифікацію у вибірці даних ТСГ-5 на часових відрізках [7;9]с та [8;10]с моди з частотою близько 2,10 Гц обумовлено її виявленням на цих відрізках одразу трьома методами аналізу сигналів основної групи (HTLS, MP та модифікованим методом Проні).

Збіг результатів аналізу вибірки даних ТСГ-5 із застосуванням процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх доміантних мод із результатами, наведеними в [9], підтвердив адекватність зазначеної процедури. Втім, ТСГ-5 є суто “розрахунковим” (сигнал було отримано на основі математичної моделі ТС-II), внаслідок чого цей сигнал відрізняється від сигналів, зареєстрованих РМУ, відсутністю шумів, флуктуацій параметрів, пов’язаних з постійною зміною виробництва та споживання електричної енергії, похибками вимірювальних трансформаторів струму і напруги тощо. З метою перевірки адекватності роботи процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх доміантних мод у разі використання її для аналізу параметрів складових реальних сигналів ЕС (ЕО) було виконано дослідження із застосуванням низки вибірок даних сигналів, зареєстрованих РМУ (ЕВРП “Регіна-Ч”) в ОЕС України.

Перший з зазначених сигналів було зареєстровано під час проведення системних випробувань ОЕС України та ЄЕС Росії 21 вересня 2011 р. Зазначений зареєстрований сигнал (далі – ЗСГ-1) відображає зміну з часом напруги фази А повітряної ЛЕП з номінальною напругою 500 кВ ПС “Перемога” (ОЕС України) – ПС “Шахти” (ЄЕС Росії). Частота дискретизації ЗСГ-1 становить 50 Гц, графік вибірки даних ЗСГ-1 наведено на рис. Д.9 додатку Д. Присутні на графіку стійкі НЧК модуля фазної напруги було спричинено відключенням гідрогенераторів Волзької ГЕС (ЄЕС Росії) загальною потужністю 600 МВт.

Важливою особливістю ЗСГ-1, що суттєво ускладнює визначення параметрів його доміантних мод, є мала амплітуда коливань режимного параметра (зміну якого з часом відображає ЗСГ-1), яка становить до 0,35% від середнього значення цього режимного параметра для відрізка часу, наведеного на графіку рис. Д.9 додатку Д (необхідно зазначити, що стійкі НЧК такої амплітуди безпосередньо не становлять загрози для ЕС (ЕО), але

можуть сигналізувати про існування в ЕС певних несприятливих процесів, розвиток яких з часом здатен призвести до суттєвого збільшення амплітуди НЧК і виникнення загрози коливного порушення стійкості ЕС (ЕО)). За таких умов з метою забезпечення надійної ідентифікації домінантних мод ЗСГ-1 дослідження ЗСГ-1 було проведено з шириною вікна спостереження $T_{\text{зад}}=5\text{с}$. Решту значень параметрів процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх домінантних мод, за яких із застосуванням ЗСГ-1 було проведено перевірку адекватності роботи цієї процедури, наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Значення параметрів процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх домінантних мод, застосовані для вибірки даних ЗСГ-1

Параметр	$T_{\text{зад}},$ с	Зсув вікна спостереження, с	$\Delta f_1,$ Гц	$\Delta,$ Гц	$A',$ кВ	$\Delta f_2,$ Гц	$T_{\text{гр}},$ с	$A_{\text{гр}},$ кВ
Значення	5	1	0,02	0,10	0,1	0,05	5	3

З метою проведення дослідження було застосовано вибірку даних ЗСГ-1, яка охоплює часовий відрізок з 13 год. 01 хв. 50с по 13 год. 02 хв. 03с. Результати дослідження ЗСГ-1 із застосуванням процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх домінантних мод наведено в табл. 4.4. Аналіз даних цієї таблиці показав наявність у вибірці даних ЗСГ-1 домінантної моди НЧК з частотою близько 0,12 Гц та епізодичну появу моди з частотою близько 0,61 Гц. Слід зазначити, що виявлені моди не було ідентифіковано як небезпечні відповідно до критерію за $A_{\text{гр}}$. Наявність для першої виявленої домінантної моди ЗСГ-1 послідовностей вікон спостереження, в яких було визначено вірогідно від'ємне та стійко від'ємне демпфірування, свідчить про її незгасаючий характер на досліджених часових відрізках процесу, що підтверджується графіком ЗСГ-1. Оцінювання характеру демпфірування другої виявленої моди ЗСГ-1 не було проведено з причини відсутності, принаймні, трьох послідовних часових відрізків, для яких було б ідентифіковано цю моду. Ідентифікацію обох мод у вибірці даних ЗСГ-1 на всіх досліджених часових відрізках було здійснено за допомогою модифікованого методу Проні, на деяких часових відрізках – за допомогою “класичного” методу Проні або МННТ-2.

Таблиця 4.4 – Результати дослідження вибірки даних ЗСг-1 із застосуванням процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх домінантних мод

Часовий відрізок, c	Розрахункові параметри виявлених мод НЧК											
	Мода №1				Мода №2				Мода №3			
	f , Гц	A , кВ	Характер демпфірування	Ознака загрози	f , Гц	A , кВ	Характер демпфірування	Ознака загрози	f , Гц	A , кВ	Характер демпфірування	Ознака загрози
0–5	0,13	0,5	не визначено		0,38	0,2	не визначено		0,59	0,3	не визначено	
1–6	0,16	0,5	вірогідно від'ємне									
2–7	0,14	0,3	вірогідно від'ємне									
3–8	0,12	0,2	стійко додатне									
4–9	0,13	0,3	вірогідно від'ємне									
5–10	0,08	0,6	стійко від'ємне									
6–11	0,12	0,5	вірогідно від'ємне									
7–12	0,09	0,3	стійко додатне		0,65	0,5	не визначено		1,17	0,2	не визначено	
8–13	0,08	0,2	стійко додатне		0,58	0,2	вірогідно від'ємне					

Подальшу перевірку адекватності роботи процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх доміантних мод у разі використання її для аналізу параметрів складових реальних сигналів ЕС (ЕО) було здійснено із застосуванням ЗСг-2. Зазначений сигнал, зареєстрований ЕВРП “Регіна-Ч” під час проведення системних випробувань ОЕС України та ЄЕС Росії 21 вересня 2011 р., відображає зміну з часом потоку активної потужності фази А повітряної ЛЕП з номінальною напругою 500 кВ ПС “Донбаська” (ОЕС України) – Нововоронезька АЕС (ЄЕС Росії). Частота дискретизації ЗСг-2 становить 50 Гц, графік вибірки даних ЗСг-2 наведено на рис. Д.10 додатку Д. Присутні на графіку НЧК потоку активної потужності було спричинено виникненням в ЄЕС Росії надлишку активної потужності в 1600 МВт.

З метою проведення дослідження було застосовано вибірку даних ЗСг-2, яка охоплює часовий відрізок з 15 год. 03 хв. 45с по 15 год. 03 хв. 55с. Параметри процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх доміантних мод, за яких із застосуванням вибірки даних ЗСг-2 було проведено перевірку адекватності роботи цієї процедури, є аналогічними до наведених у табл. 4.1. Результати дослідження вибірки даних ЗСг-2 із застосуванням зазначеної процедури наведено в табл. 4.5. Аналіз даних цієї таблиці показав наявність у вибірці даних ЗСг-2 доміантної моди НЧК з частотою близько 0,52 Гц, яку на початкових часових відрізках вибірки даних було ідентифіковано як небезпечну відповідно до критерію за $A_{гр}$. Необхідно зазначити, що за результатами аналізу даних у кінцевих часових відрізках вибірки даних ЗСг-2 було виявлено зниження частоти зазначеної моди до, приблизно, 0,42 Гц. Крім того, у вибірці даних ЗСг-2 було виявлено епізодичну появу моди з частотою близько 0,65 Гц, яку не було ідентифіковано як небезпечну відповідно до критерію за $A_{гр}$. Наявність для першої виявленої доміантної моди послідовностей вікон спостереження, в яких було визначено стійко додатне демпфірування, свідчить про згасаючий характер НЧК із зазначеною частотою, що підтверджується графіком ЗСг-2. Оцінювання характеру демпфірування другої виявленої моди не було проведено з причини відсутності, принаймні, трьох послідовних часових відрізків, для яких було б ідентифіковано зазначену моду.

Таблиця 4.5 – Результати дослідження вибірки даних ЗСг-2 із застосуванням процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх домінуючих мод

Часовий відрізок, c	Розрахункові параметри виявлених мод НЧК							
	Мода №1				Мода №2			
	f , Гц	A , кВ	Характер демпфірування	Ознака загрози	f , Гц	A , кВ	Характер демпфірування	Ознака загрози
0–2	0,49	27,7	не визначено	небезпечна	1,16	12,0	не визначено	небезпечна
1–3	0,51	14,2	вірогідно від'ємне	небезпечна				
2–4	0,52	4,3	стійко додатне		0,62	4,7	не визначено	
3–5	0,53	5,7	вірогідно від'ємне		0,89	1,3	не визначено	
4–6	0,55	5,5	вірогідно від'ємне					
5–7	0,51	2,4	стійко додатне		0,64	6,9	не визначено	
6–8	0,42	2,2	стійко додатне					
7–9	0,42	2,0	стійко додатне					
8–10	0,44	1,8	стійко додатне		0,68	9,7	не визначено	

Ідентифікацію моди з частотою близько 0,52 Гц на часовому відрізку $[0;3]с$ вибірки даних ЗСг-2 було здійснено усіма методами аналізу сигналів основної групи та методом МННТ-2, на решті часових відрізків – модифікованим методом Проні, методами МР та НТЛС або МННТ-2. В цьому випадку зміну частоти зазначеної моди було ідентифіковано одразу трьома методами основної групи аналізу сигналів – МР, НТЛС та модифікованим методом Проні. Епізодичну появу моди з частотою близько 0,65 Гц, а також одиничні випадки появи мод з частотами 1,16 Гц (у перші моменти після виникнення збурення) та 0,89 Гц було ідентифіковано методами МР та НТЛС. Необхідно підкреслити, що на часових відрізках, де цими методами виявлено моду з частотою близько 0,65 Гц, виявлення моди з частотою близько 0,52 Гц (0,42 Гц) не відбувалося.

Результати досліджень вибірок даних ТСг-5 та ЗСг-1–ЗСг-2 підтвердили адекватність запропонованої процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх доміантних мод. Слід зазначити, що частоти виявлених у цих сигналах доміантних мод перебували в діапазоні, характерному для найбільш небезпечних (у контексті стійкості ЕС (ЕО)) НЧК – до 3 Гц. У той же час в ЕС (ЕО) світу було зареєстровано випадки виникнення та “розвитку” крутильних НЧК та НЧК, пов’язаних з особливостями систем керування (ЕС) ЕО), з вищими за 3 Гц частотами [107, 117, 167]. Тому в дисертаційній роботі було перевірено можливість застосування запропонованої процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх доміантних мод з метою виявлення та розрахунку параметрів складових таких НЧК (необхідно підкреслити, що виявлення НЧК зазначених типів та їхнє демпфірування не є завданнями запропонованої в дисертаційній роботі ІСД НЧК).

З метою виконання зазначеної перевірки було проведено дослідження ЗСг-3, зареєстрованого ЕВРП “Регіна-Ч” під час проведення системних випробувань ОЕС України та ЄЕС Росії 21 вересня 2011 р. Зазначений сигнал відображає зміну з часом потоку активної потужності фази А повітряної ЛЕП з номінальною напругою 750 кВ ПС “Західноукраїнська” (ОЕС України) – ПС “Альбертирша” (ЕС Угорщини). Частота дискретизації ЗСг-3 становить 50 Гц, графік вибірки даних ЗСг-3 наведено на рис. Д.11 додатку Д.

З урахуванням необхідності виявлення у вибірці даних ЗСг-3 доміантних мод з частотами, суттєво більшими за прийняте в дисертаційній роботі значення верхньої

границі “проблемного” діапазону частот НЧК (3 Гц), параметри процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх доміантних мод було дещо змінено в порівнянні із наведеними в табл. 4.1 та табл. 4.2. Зокрема, очікувані значення частот мод дали змогу зменшити ширину застосованих під час аналізу вікон спостереження, але зумовили необхідність збільшення значень Δf_1 та Δf_2 (що пов’язано зі зростанням абсолютних похибок визначення частоти НЧК при збільшенні частоти цих НЧК). Значення параметрів процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх доміантних мод, за яких із застосуванням вибірки даних ЗСг-3 було проведено перевірку адекватності роботи цієї процедури, наведено в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Значення параметрів процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх доміантних мод, застосовані для вибірки даних ЗСг-3

Параметр	$T_{\text{зад}}, c$	Зсув вікна спостереження, c	$\Delta f_1, \text{Гц}$	$\Delta, \text{Гц}$	$A', \text{МВт}$	$\Delta f_2, \text{Гц}$	$T_{\text{гр}}, c$	$A_{\text{гр}}, \text{МВт}$
Значення	1	1	0,2	0,5	0,1	0,5	2	10

У дослідженні було застосовано вибірку даних ЗСг-3, яка охоплює часовий відрізок з 13 год. 01 хв. 41с по 13 год. 01 хв. 46с. Результати дослідження цієї вибірки із застосуванням процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх доміантних мод наведено в табл. 4.7. Аналіз даних цієї таблиці показав наявність у вибірці даних ЗСг-3 доміантних мод НЧК з частотами близько 16,6 Гц та 17,6 Гц, які не було ідентифіковано як небезпечні відповідно до критерію за $A_{\text{гр}}$. Необхідно зазначити, що за результатами аналізу даних у кінцевих часових відрізках вибірки даних ЗСг-3 було виявлено зростання частоти другої визначеної моди до, приблизно, 18,6 Гц. Наявність для обох виявлених доміантних мод послідовностей вікон спостереження, в яких було визначено вірогідно від’ємне демпфірування, свідчить про незгасаючий характер НЧК із зазначеними частотами на досліджених часових відрізках процесу, що підтверджується графіком ЗСг-3.

Ідентифікацію обох виявлених доміантних мод на всіх часових відрізках вибірки даних ЗСг-3 було здійснено “класичним” методом Проні, методами МР та НТЛС (крім відрізка $[1;2]c$, де моду з частотою близько 16,6 Гц було виявлено лише “класичним” методом Проні та методом МННТ-2), а також методами ДПФ та МННТ-2

Таблиця 4.7 – Результати дослідження вибірки даних ЗСг-3 із застосуванням процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх домінантних мод

Часовий відрізок, c	Розрахункові параметри виявлених мод НЧК											
	Мода №1				Мода №2				Мода №3			
	f , Гц	A , кВ	Характер демпфірування	Ознака загрози	f , Гц	A , кВ	Характер демпфірування	Ознака загрози	f , Гц	A , кВ	Характер демпфірування	Ознака загрози
0–1	16,31	0,5	не визначено		17,67	0,4	не визначено					
1–2	16,64	3,5	вірогідно від'ємне		17,41	2,5	вірогідно від'ємне					
2–3	16,68	0,8	вірогідно від'ємне		18,16	0,9	вірогідно від'ємне					
3–4	16,66	0,3	стійко додатне		18,59	0,2	вірогідно від'ємне					
4–5	14,87	0,6	не визначено		16,77	0,8	вірогідно від'ємне		18,78	0,7	вірогідно від'ємне	

на деяких часових відрізках (необхідно зазначити, що модифікований метод Проні для вибірки даних ЗСг-3 показав незадовільні результати виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх складових). Зміну частоти другої виявленої моди вибірки даних ЗСг-3 та появу на часовому відрізку $[4;5]с$ моди з частотою близько 14,9 Гц було ідентифіковано зазначеними трьома методами аналізу сигналів основної групи.

Отже, результати досліджень вибірок даних ТСг-5 та ЗСг-1–ЗСг-3 підтвердили адекватність запропонованої процедури узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх доміантних мод. Порівняння результатів оброблення цих сигналах за кожним задіяним у КІВП НЧК ІСД методом аналізу сигналів підтвердило зроблений у розділі 3 висновок щодо неоднакової точності (адекватності) визначення параметрів складових НЧК за допомогою кожного з досліджених методів аналізу для різних сигналів, які відображають процеси виникнення та “розвитку” НЧК за різних режимних умов та в різних схемах ЕС (ЕО). Зазначена обставина підтверджує необхідність застосування з метою підвищення якості роботи КІВП НЧК ІСД ансамблю паралельно задіяних методів аналізу сигналів.

4.2 Способи підвищення достовірності визначення параметрів доміантних мод НЧК засобами програмного комплексу online-оцінювання загрози коливного порушення стійкості ЕО

4.2.1 Дослідження впливу цифрової фільтрації сигналів на результати визначення параметрів доміантних мод НЧК

У розділі 3 було показано, що присутні у вибірці даних зареєстрованого сигналу шуми (завади) негативно впливають на адекватність (точність) результатів визначення частот та амплітуд низькочастотних мод, які одержують з використанням різних методів аналізу сигналів. Крім того, було зазначено, що з огляду на забезпечення адекватності (точності) визначення параметрів доміантних мод серед відібраних для роботи в КІВП НЧК ІСД методів аналізу сигналів найбільш вразливим до наявності шумів у вибірці даних сигналу, яка підлягає аналізу, є “класичний” метод Проні, а за низького SNR для вибірки даних зареєстрованого сигналу суттєве погіршення якості результатів визначення параметрів складових НЧК спостерігається в разі використання

будь-якого із досліджених методів аналізу сигналів. У певних випадках присутній у вибірці даних сигналу шум призводить до викривлення результатів розрахунку параметрів складових НЧК, отриманих із застосуванням певного методу аналізу, що, в свою чергу, призводить до викривлення узагальнених результатів розрахунку параметрів доміантних мод НЧК цього сигналу, отриманих за допомогою запропонованої в дисертаційній роботі процедури узагальнення результатів ідентифікації та визначення параметрів доміантних мод НЧК.

З метою зниження негативного впливу шумів на якість результатів розрахунку параметрів складових НЧК, отримуваних за допомогою відібраних для роботи в КІВП НЧК ІСД методів аналізу сигналів, можливим підходом є застосування цифрової фільтрації до кожного вікна спостереження перед обробленням його даних зазначеними методами. При цьому (з урахуванням вимог до оперативності роботи КІВП НЧК ІСД, адекватності (точності) отримуваних результатів аналізу сигналів, діапазону частот НЧК, найбільш небезпечних у контексті стійкості ЕС (ЕО)) зазначений цифровий фільтр має відповідати ряду вимог:

- смуга пропускання фільтра має становити до 3 Гц (що відповідає окресленому в розділі 1 діапазону частот НЧК, найбільш небезпечних у контексті стійкості ЕС (ЕО)), складові з іншими частотами мають максимально подавлятися;

- у межах смуги пропускання фільтр не має суттєво змінювати амплітудний спектр вихідного сигналу в порівнянні з вхідним з метою забезпечення можливості адекватного (точного) визначення амплітуд НЧК;

- порядок фільтра має бути, з одного боку, невисоким (оскільки застосування фільтра високого порядку збільшує час фільтрації (що негативно впливає на оперативність роботи КІВП НЧК ІСД) та подовжує спричинений фільтром перехідний процес у вихідному сигналі (що негативно впливає на адекватність (точність) розрахованих параметрів складових НЧК)), а з іншого боку – достатнім для забезпечення максимально допустимого згасання в межах смуги пропускання та мінімально допустимого ослаблення в межах смуги затримування (у розділі 3 було показано, що, наприклад, для “класичного” методу Проні цей параметр має бути не нижчим від 80 дБ);

- фільтр має створювати мінімальний фазовий зсув між вхідним та вихідним сигналами з метою мінімізації спотворення вихідного сигналу в порівнянні з вхідним.

Дослідження впливу цифрової фільтрації, застосованої до вибірки даних сигналу, на якість результатів розрахунку параметрів її компонентів було проведено із застосуванням “класичного” методу Проні. Вибір саме цього методу аналізу сигналів було обумовлено результатами досліджень ТСГ-1–ТСГ-5 та ЗСГ-1–ЗСГ-3, згідно з якими за відсутності шумів у сигналах зазначений метод аналізу показав найкращі за адекватністю (точністю) результати розрахунку параметрів складових НЧК, а за наявності шумів – найгірші. З метою проведення досліджень було застосовано вибірки даних таких сигналів:

- ТСГ-1 (графік сигналу наведено на рис. Д.1 додатку Д), до якого було додано “білий” шум з метою досягнення SNR у 80дБ (у розділі 3 було зазначено, що для сигналів, зареєстрованих РМУ в нормальних режимах ЕС (ЕО), характерною є наявність шумів, які зумовлюють значення SNR цих сигналів у діапазоні 80...120 дБ);
- ЗСГ-2 (графік сигналу наведено на рис. Д.10 додатку Д), зареєстрованого ЕВРП “Регіна-Ч” під час проведення системних випробувань ОЕС України та ЄЕС Росії 21 вересня 2011 р.

Ширина вікна спостереження вибірок становить $2c$, частота дискретизації (f_d) – 50 Гц. До кожного вікна спостереження вибірок ТСГ-1 та ЗСГ-2 перед виконанням аналізу їх параметрів за допомогою “класичного” методу Проні було застосовано фільтр Чебишева другого роду з такими значеннями параметрів (передавальну функцію фільтра та сутність його параметрів детально описано в [22]):

- верхня межа смуги пропускання ($f_{c.п}^B$): 3 Гц;
- нижня межа смуги затримування ($f_{c.з}^H$): 5 Гц;
- нерівномірність у смузі пропускання (A_p): 1 дБ;
- ослаблення в смузі затримування (A_s): 80 дБ;
- частота дискретизації фільтра ($f_{д.ф}$): 100 Гц.

Вибір значення $f_{c.п}^B$ обумовлено верхньою границею (з істотним “запасом”) діапазону частот електромеханічних коливань, який підлягає аналізу. Значення A_s було обрано, виходячи з потреби забезпечення SNR вибірки даних сигналу, яка підлягає аналізу, на рівні, не нижчому від 80 дБ, з метою отримання адекватних результатів розрахунку його параметрів у разі застосування “класичного” методу Проні. Частоту дискретизації фільтра було взято мінімально допустимою (згідно теореми Котельникова $f_{д.ф} \geq 2f_d$). Значення

решти параметрів фільтра було обрано, виходячи з потреби мінімізації порядку фільтра i , водночас, забезпечення наведених вище вимог. Оскільки визначення оптимальних типу i значень параметрів цифрового фільтра, призначеного для фільтрації результатів вимірювання ЕВРП “Регіна-Ч” режимних параметрів, є предметом окремої задачі, то тут сам факт використання навіть “неоптимального” фільтра повинен був підтвердити ефективність такої фільтрації в аспекті визначення адекватних параметрів доміантних мод.

З [21] відомо, що мінімальний порядок фільтра Чебишева другого роду, який відповідає заданим параметрам, може бути визначено так:

$$N_{\min}^{\text{ЧII}} = \frac{\operatorname{arch} \left(\frac{\sqrt{10^{0,1A_s} - 1}}{\sqrt{10^{0,1A_p} - 1}} \right)}{\operatorname{arch} \left(\frac{f_{\text{с.з}}^{\text{H}}}{f_{\text{с.п}}^{\text{B}}} \right)}, \quad (4.1)$$

де arch – функція гіперболічного арєакосинусу.

Відповідно до (4.1), мінімальний порядок фільтра Чебишева другого роду, який відповідає наведеним вище значенням параметрів, дорівнює 10. Синтез такого фільтра було виконано за допомогою інструменту “Filter Design & Analysis Tool” середовища “Matlab”. Коефіцієнти чисельника та знаменника передавальної функції $H(s)$ секцій цього фільтра було розраховано на підставі виразу для його передавальної функції:

$$H(s) = \frac{\prod_{k=1}^{\frac{N-r}{2}} \left(s^2 + \frac{1}{\cos^2 \left(\frac{2k-1}{2N} \pi \right)} \right)}{\left(s + \frac{1}{\operatorname{sh} \left(\frac{1}{N} \operatorname{arsh} \left(\sqrt{10^{0,1A_s} - 1} \right)} \right)} \right)^r \prod_{k=1}^{\frac{N-r}{2}} \left(s^2 - 2\sigma_k s + \sigma_k^2 + \omega_k^2 \right)},$$

де arsh – функція гіперболічного арєасинусу;

r – коефіцієнт, який може набувати значень 0 або 1;

σ_k, ω_k – відповідно, дійсна та уявна складові полюса фільтра Чебишева другого роду, які розраховують за виразами:

$$\sigma_k = \frac{-\sin\left(\frac{2k-1}{2N}\pi\right) \operatorname{sh}\left(\frac{1}{N} \operatorname{arsh}\left(\sqrt{10^{0,1A_s}} - 1\right)\right)}{\cos^2\left(\frac{2k-1}{2N}\pi\right) \operatorname{ch}^2\left(\frac{1}{N} \operatorname{arsh}\left(\sqrt{10^{0,1A_s}} - 1\right)\right) + \sin^2\left(\frac{2k-1}{2N}\pi\right) \operatorname{sh}^2\left(\frac{1}{N} \operatorname{arsh}\left(\sqrt{10^{0,1A_s}} - 1\right)\right)};$$

$$\omega_k = \frac{\cos\left(\frac{2k-1}{2N}\pi\right) \operatorname{ch}\left(\frac{1}{N} \operatorname{arsh}\left(\sqrt{10^{0,1A_s}} - 1\right)\right)}{\cos^2\left(\frac{2k-1}{2N}\pi\right) \operatorname{ch}^2\left(\frac{1}{N} \operatorname{arsh}\left(\sqrt{10^{0,1A_s}} - 1\right)\right) + \sin^2\left(\frac{2k-1}{2N}\pi\right) \operatorname{sh}^2\left(\frac{1}{N} \operatorname{arsh}\left(\sqrt{10^{0,1A_s}} - 1\right)\right)}.$$

В результаті було створено п'ятисекційний фільтр Чебишева другого роду, графік амплітудно-частотної характеристики якого наведено на рис. И.1 додатку И, а коефіцієнти – в табл. И.1 цього ж додатку.

З метою мінімізації фазового зсуву між вхідним та вихідним сигналами синтезованого фільтра фільтрацію даних вибірок ТСГ-1 та ЗСГ-2 (кожного окремого вікна спостереження) було виконано у два проходи: спочатку здійснювалася фільтрація цієї вибірки від початку до кінця, а потім одержані результати повторно оброблювалися фільтром з кінця до початку. Час виконання такої фільтрації за умови застосування комп'ютера з процесором Intel Core i3 370М не перевищував 0,04с.

Результати розрахунку за допомогою “класичного” методу Проні параметрів мод НЧК для вибірки даних ТСГ-1 до та після цифрової фільтрації наведено в табл. 4.8. Аналіз даних цієї таблиці показав, що здійснення фільтрації даних кожного вікна спостереження вибірки даних ТСГ-1 з шумом до їх оброблення за допомогою “класичного” методу Проні призвело до підвищення адекватності результатів розрахунку, яке полягає в забезпеченні визначення із належною точністю параметрів (зокрема, частоти та амплітуди) реально існуючої в ТСГ-1 моди з частотою 0,2 Гц, яку не було виявлено за результатами оброблення цим же методом аналізу даних вікон спостереження цього ж сигналу за відсутності фільтрації. В той же час слід зазначити, що зазначені дії не забезпечили виявлення у відфільтрованому сигналі реально існуючої моди з частотою 0,1 Гц.

Таблиця 4.8 – Результати розрахунку параметрів мод НЧК вибірки даних ТСГ-1 за допомогою “класичного” методу Проні до та після цифрової фільтрації

Наявність фільтрації	Часовий відрізок, с															
	0–2			1–3			2–4			3–5			4–6			
Без фільтрації	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	
	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	5–7			6–8			7–9			8–10						
	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ				
	0,01	162,9	-0,791	–	–	–	–	–	–	–	–	–				
З фільтрацією	0–2			1–3			2–4			3–5			4–6			
	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	
	0,18	0,9	0,004	0,19	1,1	0,042	0,21	0,9	0,048	0,21	0,8	0,072	0,23	0,8	-0,002	
	5–7			6–8			7–9			8–10						
	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ				
0,21	0,6	-0,041	0,20	0,90	-0,052	0,19	1,1	-0,046	0,18	1,4	-0,229					

Результати розрахунку за допомогою “класичного” методу Проні параметрів мод НЧК для вибірки даних ЗСг-2 до та після цифрової фільтрації наведено в табл. 4.9, фрагменти графіків, побудованих за вибіркою даних ЗСг-2 до та після фільтрації даних вікна спостереження шириною у $2c$ наведено на рис. 4.2.

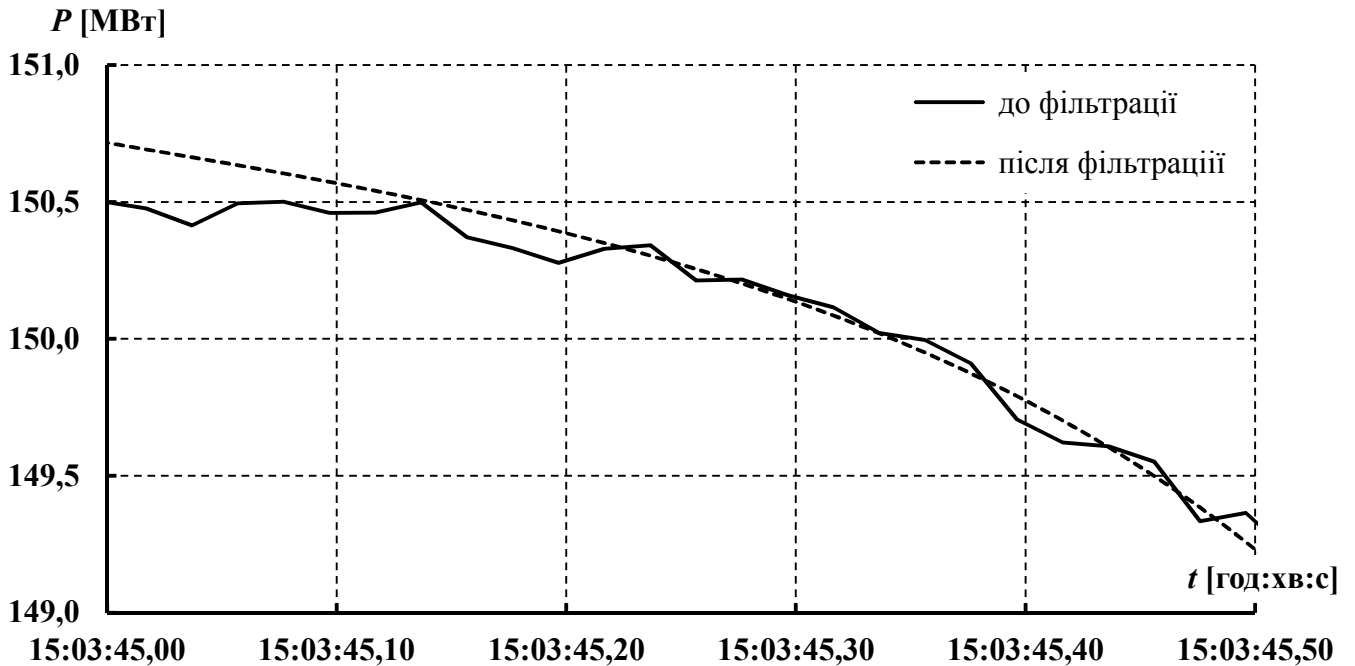


Рисунок 4.2 – Фрагменти графіків, побудованих за вибіркою даних ЗСг-2 до та після цифрової фільтрації

Аналіз даних табл. 4.9 показав, що здійснення фільтрації даних кожного вікна спостереження вибірки даних ЗСг-2 до їх оброблення за допомогою “класичного” методу Проні призвело до підвищення адекватності результатів розрахунку, яке полягає в забезпеченні виявлення та належної точності (виходячи з порівняння даних табл. 4.5 і табл. 4.9) визначення параметрів домінантної моди з частотою близько 0,5 Гц, яку не було виявлено за результатами оброблення цим же методом аналізу даних вікон спостереження цього ж сигналу за відсутності фільтрації, але ідентифіковано методами МР та HTLS.

Отже, цифрова фільтрація зареєстрованих ЕВРП “Регіна-Ч” сигналів до їх оброблення за допомогою “класичного” методу Проні дає змогу підвищити адекватність визначення цим методом параметрів домінантних мод НЧК, що позитивно впливає

Таблиця 4.9 – Результати розрахунку параметрів мод НЧК вибірки даних ЗСг-2 за допомогою “класичного” методу

Проні до та після цифрової фільтрації

Наявність фільтрації	Часовий відрізок, с															
	0–2			1–3			2–4			3–5			4–6			
Без фільтрації	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	
	–	–	–	0,52	15,2	0,571	–	–	–	–	–	–	–	0,04	162,1	0,413
	5–7			6–8			7–9			8–10						
	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ				
–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–					
З фільтрацією	0–2			1–3			2–4			3–5			4–6			
	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	
	0,51	3,2	–0,214	0,55	9,6	0,010	0,47	14,9	0,253	0,52	8,7	0,577	0,03	137,8	–0,106	
													0,57	1,1	–0,142	
	5–7			6–8			7–9			8–10						
$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ					
0,53	3,0	–0,019	0,44	2,9	0,200	0,46	5,2	0,327	–	–	–					

на якість результатів розрахунку параметрів складових НЧК, отримуваних від КІВП НЧК ІСД. Також можна показати, що застосування цифрової фільтрації дає змогу підвищити адекватність результатів визначення параметрів доміантних мод НЧК, отриманих за допомогою інших відібраних для роботи в КІВП НЧК ІСД методів аналізу сигналів, не призводячи при цьому до суттєвого збільшення часу розрахунку цих параметрів.

4.2.2 Дослідження впливу використання миттєвих значень сигналів на результати визначення параметрів низькочастотних складових коливань

Миттєві значення параметрів режиму є найбільш повною вимірювальною інформацією, застосування якої в мікропроцесорних системах захисту та керування режимами ЕС (ЕО) є досить перспективним з огляду на можливість підвищення їх швидкодії [16]. Застосування засобів цифрового оброблення сигналів з миттєвими значеннями режимних параметрів ЕС (ЕО) забезпечує можливість залучення нових критеріїв контролю їх режимів з метою забезпечення більш якісного керування цими режимами. Крім того, оцінювання похибки вимірювання миттєвих значень параметрів внаслідок відсутності їх залежності від кореляційних характеристик сигналів є більш простим у порівнянні з оцінюванням похибок вимірювання середніх або діючих значень параметрів, що спрощує подальше оброблення цієї вимірювальної інформації.

Дослідження можливості підвищення адекватності (точності) отриманих внаслідок роботи КІВП НЧК ІСД результатів розрахунку параметрів складових НЧК завдяки застосуванню миттєвих значень сигналів було проведено із використанням ТСг-2 (співвідношення для розрахунку діючих значень параметра, зміну якого з часом моделює ТСг-2, є таким: $y(t)=100+(1+t) \sin(2\pi 0,1t)+(1+1,1t) \sin(2\pi 0,15t)+(1+1,3t) \sin(2\pi 1,5t)+(1+1,1t) \sin(2\pi 1,9t)$). За результатами дослідження вибірки даних ТСг-2, яка охоплює часовий відрізок $[0;10]с$ та моделює, наприклад, зміну з часом діючих значень потоку активної потужності по певній ЛЕП, зареєстрованої з частотою дискретизації 50 Гц, було зроблено висновок, що відібрані для роботи в КІВП НЧК ІСД методи аналізу сигналів не забезпечують надійного “відокремлення” компонентів ТСг-2 з частотами 0,10 Гц та 0,15 Гц у разі застосування вікон спостереження шириною до 5с.

З метою порівняння результатів визначення параметрів складових НЧК, розрахованих для вибірок даних сигналів з діючими та миттєвими значеннями, для зазначеного

часового відрізка було сформовано відповідні вибірки даних ТСг-2 з частотою дискретизації 500 Гц (що відповідає можливостям ЕВРП “Регіна-Ч” щодо реєстрації даних). Результати оброблення цих вибірок даних за допомогою методів аналізу сигналів основної групи КІВП НЧК ІСД за умови застосування вікна спостереження шириною $2c$ наведено в табл. 4.10. Аналіз табл. 4.10 показав, що оброблення за допомогою методів HTLS та МР вибірки даних ТСг-2 з миттєвими значеннями надало змогу ідентифікувати в цьому сигналі реально існуючі компоненти з частотами близько 0,10 Гц та 0,15 Гц, чого не вдалося домогтися в результаті оброблення цими ж методами вибірки даних ТСг-2 з діючими значеннями, проведеного для аналогічних вікон спостереження за умови однакової частоти дискретизації обох вибірок даних ТСг-2. У той же час у випадку “класичного” і (як можна показати) модифікованого методів Проні застосування вибірки даних ТСг-2 з миттєвими значеннями не призвело до якісного покращення результатів розрахунку його параметрів у порівнянні з результатами, отриманими внаслідок аналізу вибірки даних ТСг-2 з діючими значеннями.

Втім, практичне застосування сигналів з миттєвими значеннями під час розрахунку параметрів складових НЧК ускладнено з декількох причин. Забезпечення якісного покращення результатів розрахунку параметрів сигналів внаслідок застосування миттєвих значень замість діючих потребує застосування вибірок даних сигналів з частотою дискретизації, яка в рази перевищує частоту основної гармоніки промислового струму, що призводить до зростання кількості відліків у вікні спостереження та збільшення часу, необхідного для його оброблення, що підтверджується даними табл. 4.11 (наведені в таблиці результати отримано із застосуванням комп’ютера з процесором Intel Core i3 370M).

Аналіз табл. 4.10 показує, що застосований з метою виконання розрахунків процесор у межах $1c$ (з урахуванням необхідності забезпечення роботи ансамблю методів аналізу сигналів) може забезпечити розрахунок параметрів сигналів за допомогою запропонованої в дисертаційній роботі КІВП НЧК ІСД лише для вікон спостереження, які містять менше 1000 точок (відліків). Тому робота ІСД НЧК у режимі реального часу за умови оброблення її інформаційним “ядром” миттєвих значень сигналів потребує (з урахуванням можливої необхідності здійснення моніторингу НЧК для декількох приєднань однієї ПС або ЕСт) наявності в структурі КІВП НЧК ІСД досить потужних обчислювальних засобів, що вимагає додаткових капітальних витрат на створення ІСД НЧК. Крім того, робота КІВП НЧК ІСД у режимі реального часу за умови використання сигналів з миттєвими

Таблиця 4.10 – Результати розрахунку параметрів ТСг-2 з діючими та миттєвими значеннями

Метод аналізу	Значення	Часовий відрізок, с														
		0–2			2–4			4–6			6–8			8–10		
		$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ
HTLS	діючі	0,17	3,9	-0,045	0,16	8,3	-0,075	0,16	6,4	-0,049	0,16	5,7	-0,040	0,17	6,7	-0,072
		1,50	0,9	0,001	1,50	0,6	0,000	1,50	3,3	0,000	1,50	3,9	0,000	1,50	2,9	0,000
		1,90	0,7	0,000	1,90	1,1	0,000	1,90	3,2	0,000	1,90	6,6	0,000	1,90	7,8	0,000
	миттєві	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ
		0,08	4,2	0,366	0,09	3,3	-0,014	0,11	8,5	-0,328	0,08	3,4	-0,112	0,11	5,0	0,050
		0,16	4,0	-0,059	0,16	6,6	-0,098	0,17	7,0	-0,130	0,16	5,6	-0,004	0,16	8,7	-0,159
		1,50	0,7	0,002	1,50	3,2	0,003	1,50	4,0	0,002	1,51	4,1	0,002	1,50	7,4	0,002
		1,90	0,5	0,000	1,90	2,4	0,001	1,90	3,7	0,001	1,90	7,2	0,001	1,90	4,1	0,000
		50,00	100,0	0,000	50,00	100,0	0,000	50,00	100,0	0,000	50,0	100,0	0,000	50,0	100,0	0,000
	MP	діючі	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A
0,17			3,7	-0,122	0,16	7,3	-0,064	0,16	7,6	-0,052	0,16	5,7	0,011	0,18	4,9	-0,072
1,50			0,9	0,014	1,50	2,5	0,008	1,49	11,0	-0,001	1,49	10,3	-0,005	1,48	15,4	-0,009
миттєві		1,91	0,3	0,001	1,90	2,3	0,002	1,51	12,2	-0,001	1,52	11,1	-0,005	1,52	14,5	-0,010
		1,90	2,5	0,000	1,91	4,3	0,002	1,91	8,7	0,005						
		$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ
		0,08	4,0	0,455	0,09	3,1	-1,000	0,09	5,7	-0,226	0,06	5,3	-0,708	0,12	3,7	0,138
		0,16	3,9	-0,069	0,16	6,4	-0,092	0,17	5,3	-0,078	0,19	5,8	-0,039	0,16	7,2	-0,190
		1,50	0,7	0,002	1,50	2,3	0,002	1,50	4,6	0,002	1,50	3,0	1,000	1,49	7,1	0,003
1,90		0,4	0,000	1,90	3,0	0,002	1,90	4,2	0,001	1,90	6,2	1,000	1,90	4,0	0,000	
50,00	100,0	0,000	50,00	100,0	0,000	50,00	100,0	0,000	50,00	100,0	0,000	50,00	100,0	0,000		
Проні ("класичний")	діючі	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ
		0,06	3,2	-0,785	0,16	4,6	-0,313	0,16	5,6	-0,106	0,17	6,9	0,052	0,15	7,0	0,416
		1,46	1,1	-0,071	1,50	3,9	-0,023	1,50	6,4	-0,017	1,50	8,7	-0,015	1,50	11,3	-0,012
	миттєві	1,94	1,1	-0,036	1,91	3,2	-0,020	1,90	5,4	-0,014	1,90	7,6	-0,011	1,90	9,7	-0,009
		$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ
		0,17	2,0	-0,533	0,14	6,1	-0,065	0,14	8,2	-0,036	0,15	8,7	0,266	0,13	10,4	0,031
		1,50	0,7	-0,087	1,50	3,8	-0,022	1,50	6,4	-0,017	1,50	8,8	-0,015	1,50	11,3	-0,012
		1,91	0,8	-0,123	1,91	3,3	-0,019	1,90	5,4	-0,014	1,90	7,6	-0,011	1,90	9,8	-0,009
		50,00	100,0	0,000	50,00	100,0	0,000	50,00	100,0	0,000	50,00	100,0	0,000	50,00	100,0	0,000

Таблиця 4.11 – Час розрахунку параметрів ТСГ-2 із застосуванням методів аналізу сигналів основної групи за різної кількості точок у вікні спостереження

Метод аналізу	Час аналізу вікна спостереження, с, за кількості точок у вікні спостереження					
	500	1000	1500	2000	2500	5000
HTLS	0,055	0,257	0,789	1,739	3,622	24,984
MP	0,053	0,253	0,717	1,640	3,210	23,640
Проні (“класичний”)	0,067	0,265	0,781	1,736	3,346	23,911
Проні (модифікований)	0,316	4,453	15,024	35,988	71,01	567,248

значеннями режимних параметрів, потребує наявності відповідних за пропускну здатністю каналів передавання даних між PMU та КІВП НЧК ІСД. Так, у [16] було показано, що передача від PMU за протоколом IEC 61850 вибірки даних сигналів з миттєвими значеннями струму і напруги за частоти дискретизації вибірки даних 500 Гц, потребує наявності каналу передавання даних із пропускну здатністю, не нижчою за 100 Мбіт/с, що збільшує капітальні витрати на створення ІСД НЧК. Зниження вимог до пропускну здатності каналів передавання даних від PMU є можливим у випадку перенесення обчислювального “ядра” ІСД НЧК на рівень PMU, проте такий підхід суттєво збільшує вартість PMU, оскільки потребує наявності потужних обчислювальних засобів безпосередньо в самих PMU.

Отже, застосування миттєвих значень сигналів призводить до покращення якості результатів розрахунку параметрів складових НЧК (насамперед – до покращення роздільної здатності за частотою) у порівнянні з результатами, отриманими із застосуванням діючих значень. Втім, забезпечення роботи ІСД НЧК у режимі реального часу за умови застосування миттєвих значень режимних параметрів потребує додаткових капітальних витрат.

4.3 Особливості реалізації програмних засобів інформаційного “ядра” ІСД НЧК

Наведені в дисертаційній роботі результати досліджень було застосовано для створення програмних засобів, розробленого в середовищі програмування Microsoft Visual Studio і призначеного для оброблення сигналів з метою визначення параметрів їх складових у режимі реального часу.

З урахуванням обґрунтованої в розділі 3 необхідності паралельної роботи ансамблю методів аналізу сигналів з метою забезпечення адекватних (точних) результатів

розрахунку параметрів складових НЧК для розроблених програмних засобів було застосовано багатопотоковий принцип виконання обчислень. Структурно-блочну схему організації розроблених програмних засобів наведено на рис. 4.3.

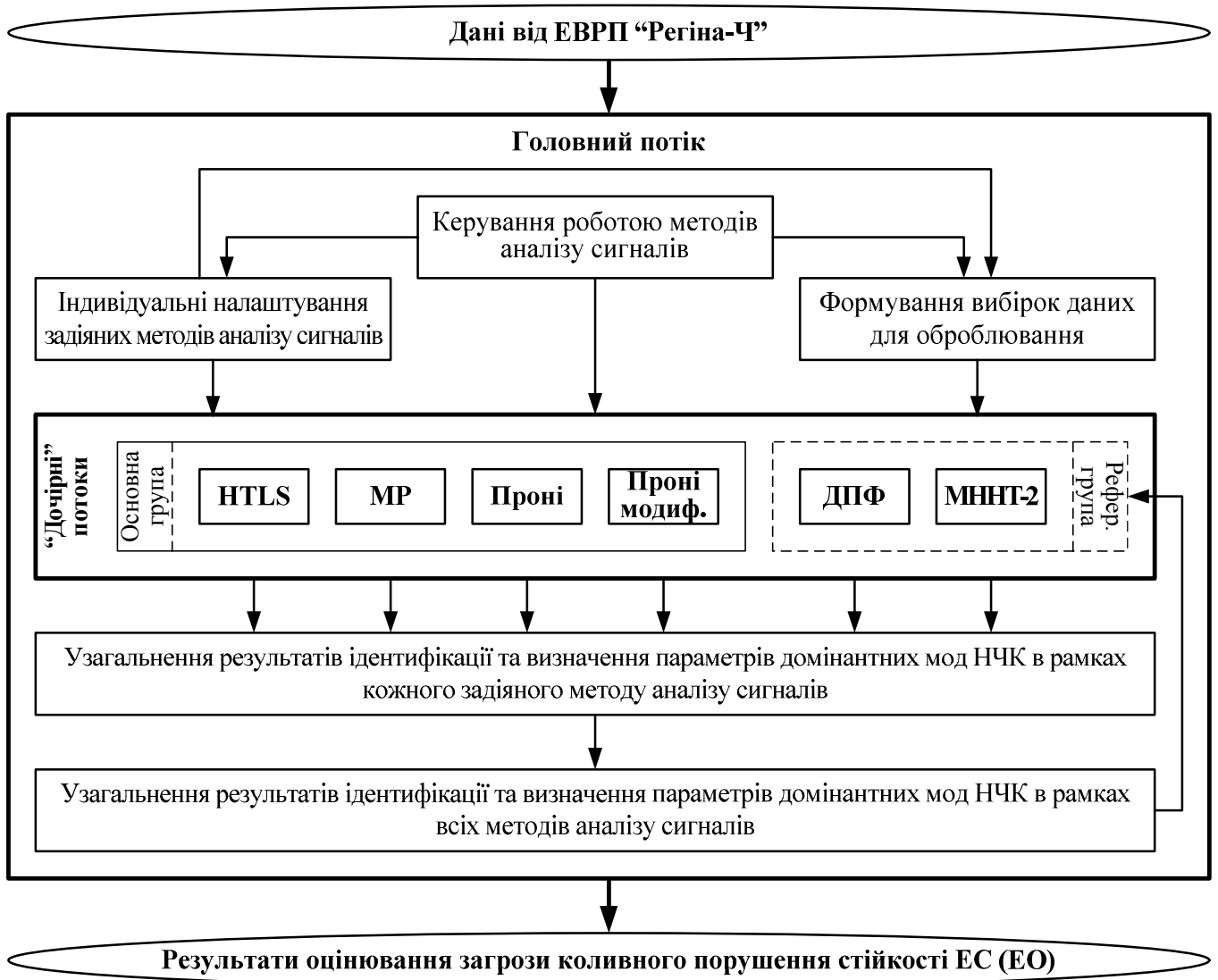


Рисунок 4.3 – Структурно-блочна схема організації програмних засобів для оцінювання загрози коливного порушення стійкості ЕО в режимі реального часу

Головний потік розроблених програмних засобів працює в неперервному режимі і виконує такі функції:

- прийом нової порції відліків сигналу;
- формування вибірки даних сигналу для подальшого їх аналізу;

- ініціалізацію запуску “дочірніх” потоків, призначених для розрахунку в режимі реального часу параметрів вибірки даних сигналу, яка підлягає аналізу, одним з методів аналізу сигналів основної або референсної групи, відповідно до кількості обраних для здійснення розрахунку методів аналізу сигналів;
- контроль пріоритету виконання “дочірніх” потоків у відповідності до налаштувань;
- контроль часу роботи “дочірніх” потоків з метою недопущення втрати оперативності надання інформації щодо параметрів мод НЧК аналізованого сигналу у випадку “затягування” розрахунку одним із задіяних з метою розрахунку цих параметрів методів аналізу сигналів;
- отримання від “дочірніх” потоків результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх домінантних мод і їх подальше узагальнення відповідно до алгоритмів рис. 4.1а і рис. 4.1б;
- наочне подання результатів розрахунку параметрів складових НЧК для кожного задіяного з метою розрахунку цих параметрів методу аналізу сигналів;
- забезпечення налаштувань параметрів КІВП НЧК ІСД (у тому числі – вибір методів, задіяних з метою розрахунку параметрів складових сигналу).

Розрахунок параметрів складових НЧК сигналу за допомогою кожного з обраних для виконання розрахунків методів аналізу сигналів здійснюється за допомогою окремого програмного засобу, який працює в окремому “дочірньому” потоці. Кожен з обраних для виконання розрахунків методів аналізу сигналів має загальні та індивідуальні налаштування.

Загальними налаштуваннями, які визначають режим роботи всіх методів аналізу сигналів, застосованих у розроблених програмних засобах, є:

- кількість відліків сигналу в кожній новій порції;
- періодичність надходження нової порції відліків сигналу;
- періодичність виконання розрахунку параметрів складових НЧК сигналу;
- частота дискретизації даних вибірки сигналу;
- діапазон частот, для якого в розроблених програмних засобах здійснюється наочне подання результатів розрахунку параметрів складових НЧК за кожним задіяним з метою розрахунку параметрів мод НЧК методом аналізу сигналів;
- налаштування, зазначені, наприклад, у табл. 4.1.

Індивідуальним налаштуванням для кожного з обраних для виконання розрахунків методів аналізу сигналів є ширина вікна спостереження, яка може бути неоднаковою для різних задіяних з метою розрахунку параметрів мод НЧК методів аналізу сигналів. На підставі значення ширини вікна спостереження для кожного такого методу аналізу сигналів здійснюється формування вибірки даних сигналу. Зазначена вибірка разом із загальними налаштуваннями подається на вхід програмних засобів, які реалізують обрані для виконання розрахунків методи аналізу сигналів.

Отримані для кожного з обраних для виконання розрахунків методів аналізу сигналів результати розрахунку параметрів складових НЧК узагальнюються в рамках цього методу із застосуванням процедури, реалізованої відповідно до алгоритму, наведеного на рис. 4.1а. Для методів аналізу сигналів, роботу яких було перервано на поточному періоді виконання розрахунків, зазначене узагальнення не виконується.

Узагальнення результатів розрахунку параметрів складових НЧК в рамках всіх обраних для виконання розрахунків методів аналізу сигналів здійснюється із застосуванням процедури, реалізованої відповідно до алгоритму, наведеного на рис. 4.1б. Під час виконання зазначеного узагальнення відповідно до цього алгоритму може знадобитися кількаразове виконання розрахунків параметрів складових НЧК із застосуванням методів аналізу сигналів референсної групи з поступовим збільшенням (до значення $T_{гр}$) ширини вікна спостереження аналізованої цими методами вибірки даних сигналу.

Скріншот головного вікна графічного інтерфейсу розроблених програмних засобів з визначеними за допомогою методів ДПФ, МНТТ-2 та “класичного” методу Проні параметрами складових ЗСг-3 наведено на рис. 4.4. У розглянутому випадку періодичність виконання розрахунку параметрів ЗСг-3 становить 1с, а значення параметрів загальних налаштувань розроблених програмних засобів є такими:

- кількість відліків сигналу в кожній новій порції: 50;
- періодичність надходження нової порції відліків сигналу: 1с;
- частота дискретизації даних вибірки: 50 Гц;
- діапазон частот НЧК, для якого в розроблених програмних засобах здійснюється наочне подання результатів розрахунку параметрів складових НЧК за кожним задіяним методом аналізу сигналів: від 0,01 Гц до 20 Гц;
- налаштування, зазначені в табл. 4.6.

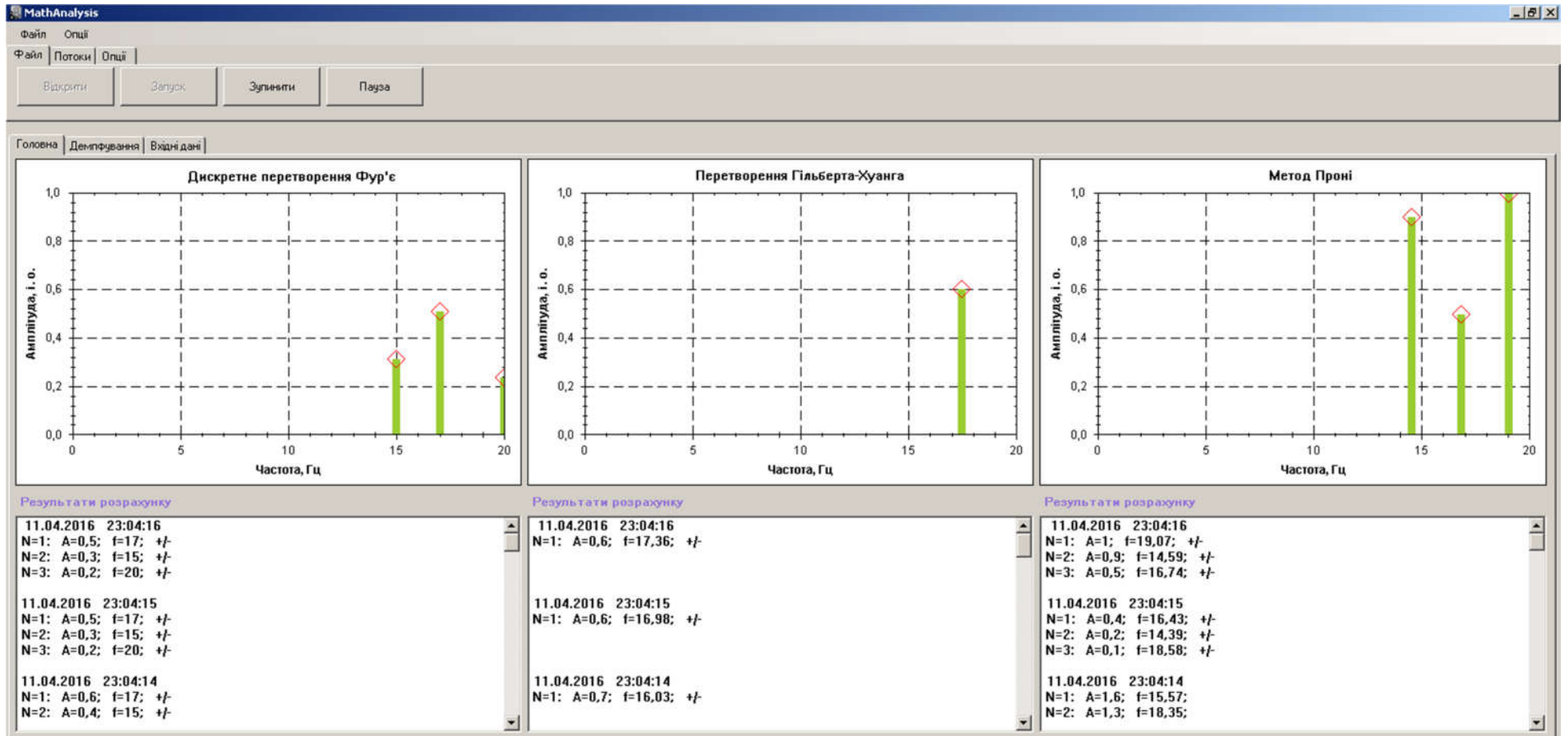


Рисунок 4.4 – Приклад варіанту відображення параметрів складових ЗСг-3, визначених різними методами аналізу сигналів, у головному вікні графічного інтерфейсу розроблених програмних засобів

В наведеному на рис. 4.4 головному вікні графічного інтерфейсу розроблених програмних засобів показано розрахований трьома зазначеними вище методами аналізу сигналів амплітудний спектр ЗСг-3 за даними останнього обробленого вікна спостереження. У текстових блоках, розташованих нижче графіків, наведено числові результати розрахунку параметрів складових ЗСг-3 за даними останнього обробленого вікна спостереження та попередніх вікон:

- порядковий номер моди, визначеної в результаті оброблення даних вікна спостереження, сформованого у зазначений у текстовому блоці час (найменший порядковий номер має мода з найвищою амплітудою, найбільший – з найнижчою);
- амплітуда моди в іменованих одиницях вимірювання;
- частота моди, Гц;
- характер демпфірування моди (символ “+” означає додатне демпфірування, символ “-” – від’ємне, позначення “+/-” означає вірогідно від’ємне демпфірування).

Розроблені програмні засоби впроваджено у виробництво і використано МПП “Анігер” (м. Київ) для розширення функцій комплексу програм верхнього об’єктного рівня ЕВРП “Регіна-Ч”, встановлених на об’єктах ОЕС України (копію акта впровадження наведено в Додатку К). Зазначені програмні засоби також може бути використано для виконання досліджень та аналізу параметрів складових сигналів в режимі offline на персональних комп’ютерах з операційними системами Microsoft Windows, починаючи з версії Windows 7.

Висновки по розділу 4

1) Розроблено процедуру узагальнення результатів виявлення НЧК та визначення параметрів їхніх домінуючих мод у програмному комплексі online-оцінювання загрози коливного порушення стійкості ЕО. Надійність визначення параметрів складових сигналів за допомогою цієї процедури експериментально підтверджено із застосуванням тестових сигналів та сигналів, зареєстрованих в ОЕС України ЕВРП “Регіна-Ч”.

2) Встановлено та експериментально доведено, що цифрова фільтрація сигналів до їх оброблення ансамблем методів аналізу сигналів підвищує надійність визначення параметрів домінуючих мод НЧК.

3) Встановлено та експериментально доведено, що для визначення параметрів складових НЧК використання миттєвих значень сигналу підвищує точність (насамперед – за частотою) такого визначення у порівнянні з використанням діючих значень.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-технічну задачу оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості енергооб'єднання, обумовленої виникненням НЧК. Розв'язання задачі базується на використанні спеціально підготовленого ансамблю методів аналізу сигналів для оброблення результатів синхронізованих вимірювань параметрів режиму енергооб'єднання.

В результаті виконання дисертаційної роботи одержано такі наукові та практичні результати:

1) Досліджено умови ефективного використання систем автоматичного керування збудженням синхронних машин з метою демпфірування НЧК в енергооб'єднаннях. Встановлено, що з метою підвищення надійності демпфірування зазначених коливань доцільно застосовувати системні стабілізатори, в яких передбачена можливість адаптивних налаштувань.

2) Визначено вимоги до розв'язання в реальному часі задачі оцінювання загрози коливного порушення стійкості енергооб'єднання на базі використання методів аналізу сигналів для розрахунку параметрів домінантних мод НЧК.

3) В результаті досліджень вперше за сукупністю вимог здійснено селекцію методів аналізу сигналів, які в режимі реального часу забезпечують надійні ідентифікацію та визначення параметрів домінантних мод НЧК.

4) Запропоновано і обґрунтовано доцільність застосування інтегрованої системи демпфірування НЧК з метою недопущення коливного порушення стійкості енергооб'єднання. За результатами модельно-розрахункових досліджень доведено вищу, у порівнянні з традиційними неадаптивними САКЗ СМ, ефективність зазначеної системи.

5) Для надійного оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості енергооб'єднання вперше запропоновано застосовувати ансамбль попередньо визначених методів аналізу сигналів. Розроблено і програмно реалізовано процедуру узагальнення отриманих з його використанням результатів визначення параметрів домінантних мод НЧК.

6) Встановлено та експериментально доведено, що цифрова фільтрація сигналів підвищує надійність визначення параметрів домінантних мод НЧК.

7) Встановлено та експериментально доведено, що використання миттєвих значень сигналу підвищує точність визначення (насамперед – за частотою) параметрів його складових у порівнянні з використанням діючих значень.

8) Для надійного оцінювання в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ОЕС України створено програмні засоби ідентифікації та визначення параметрів доміантних мод НЧК, які впроваджено у виробництво і використано МПП “Анігер” (м. Київ) для розширення функцій комплексу програм верхнього об’єктного рівня ЕВРП “Регіна-Ч”, встановлених на об’єктах ОЕС України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Буткевич О. Ф. Виявлення в режимі реального часу небезпеки коливного порушення стійкості об'єднаних енергосистем [Електронний ресурс] / О. Ф. Буткевич, В. В. Чижевський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 6. – С. 164–167. – ISSN 1997–9266. – Режим доступу : <http://visnyk.vntu.edu.ua/article/download/1788/3922>
2. Буткевич О. Ф. Деякі аспекти моніторингу низькочастотних коливань режимних параметрів енергооб'єднань [Текст] / О. Ф. Буткевич, В. В. Чижевський // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Зб. наук. праць. Спец. вип. – 2010. – С. 72–77. – ISSN 1727–9895.
3. Буткевич О. Ф. Деякі питання побудови інтегрованої системи запобігання коливному порушенню стійкості об'єднаної енергосистеми [Електронний ресурс] / О. Ф. Буткевич, В. В. Чижевський // Енергетика: економіка, технологія, екологія. – 2015. – № 3. – С. 28–36. – ISSN 1813–5420. – Режим доступу : http://energy.kpi.ua/files/3_2015.pdf
4. Буткевич О. Ф. Експериментально-модельні дослідження динамічних властивостей електроенергетичних систем [Текст] / О. Ф. Буткевич, В. С. Буланая, О. Б. Рибіна, В. В. Чижевський // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 4. – 2008 – №6. – С. 37–40. – ISSN 0204–3599.
5. Буткевич О. Ф. Ідентифікація в реальному часі низькочастотних коливань параметрів режиму енергосистеми [Текст] / О. Ф. Буткевич, В. В. Чижевський // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 4. – С. 35–37. – ISSN 1607–7970.
6. Буткевич О. Ф. Моніторинг та діагностування електроенергетичних об'єктів та систем України на базі комплексів “Регіна” [Текст] / О. Ф. Буткевич, В. Л. Тутик // Гідроенергетика України. – 2010. – № 3. – С. 46–49. – ISSN 1812–9277.
7. Буткевич О.Ф. Низькочастотні коливання режимних параметрів та покращення динамічних властивостей енергосистем [Текст] / О. Ф. Буткевич, О. М. Агамалов, В. В. Чижевський // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Зб. наук. праць. Спец. вип. – 2013. – С. 50–60. – ISBN 1727–9895.
8. Буткевич О. Ф. Оцінювання та зменшення в режимі реального часу небезпеки коливного порушення стійкості об'єднаної енергосистеми [Текст] / О. Ф. Буткевич, В. В. Чижевський // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 6. – С. 46–52. – ISSN 1607–7970.

9. Буткевич О. Ф. Проблемно-орієнтований моніторинг режимів ОЕС України [Текст] / О. Ф. Буткевич // Технічна електродинаміка. – 2007. – № 5. – С. 39–52. – ISSN 0204–3599.

10. Демчук А.Т. Методики и алгоритмы анализа переходных процессов в энергосистеме по данным СМПП [Электронный ресурс] / А.Т. Демчук, Й. Штефка // Сборник докладов 2-й Международной научно-технической конференции “Мониторинг параметров режимов электроэнергетической системы”, 28–30 апреля 2008, Санкт-Петербург, Российская Федерация. – 9 с. – Режим доступа : <http://www.twirpx.com/file/858201/>

11. Долгих Л. А. Спектральный анализ выборок малой длины [Текст] / Л. А. Долгих // Автоматизация и управление в технических системах: межвузовский сборник научных трудов. – Вып. 24. – Пенза : Информационно-издательский центр ПГУ. – 2005. – с. 146–151.

12. Дьяконов В. П. Вейвлет-анализ в MATLAB реальных осциллограмм [Электронный ресурс] / В. П. Дьяконов // Контрольно-измерительные приборы и системы. – Июнь, 2010. – №3. – С. 19–25. – Режим доступа : https://www.kipis.ru/upload/kipis_articles/article_Dyakov_3-2010.pdf

13. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории – к практике [Текст] / В. П. Дьяконов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : СОЛОН-Р, 2004. – 448 с. – ISBN 5–98003–171–5.

14. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. [Електронний ресурс]. – Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 1071. – 2012. – 166 с. – Режим доступа : <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=260994>

15. Енергетична стратегія України на період до 2035 року. Біла книга Енергетичної політики України. “Безпека та конкурентоспроможність” [Електронний ресурс] : [проект]. – 2015. – 49 с. – Режим доступа : <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=245012706>

16. Кириленко А. В. Интеллектуальные электроэнергетические системы: элементы и режимы [Текст] / И. В. Блинов, С. П. Денисюк, В. Я. Жуйков, А. В. Кириленко, А. Г. Киселева, Л. Н. Лукьяненко, Е. С. Осипенко, В. В. Павловский, Е. В. Парус, М. Ф. Сопель, А. О. Стелюк, С. Е. Танкевич ; под общ. ред. А. В. Кириленко. – К. : Ин-т электродинамики НАН Украины. – 2014. – 408 с. – ISBN 978–966–02–7207–1.

17. Ляпунов А.М. Собрание сочинений [Текст]. В 3-х т. Т. 2 / А. М. Ляпунов – М. ; Л. : Изд-во АН СССР. – 1956. – 472 с.
18. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: пер. с англ. [Текст] / С. Л. Марпл-мл. – М. : Мир. – 1990. – 584 с. – ISBN 5–03–001191–9.
19. Мисриханов М. Ш. Модальный синтез регуляторов энергосистемы на основе устройств FACTS [Текст] // М. Ш. Мисриханов, В. Ф. Ситников, Ю. В. Шаров // Электротехника. – 2007. – № 10. – С. 22–29. – ISSN 0013–5860.
20. Нагорнов О. В. Вейвлет-анализ в примерах: Учебное пособие [Электронный ресурс] / О. В. Нагорнов, В. Г. Никитаев, В. М. Простокишин, С. А. Тюфлин, А. Н. Проничев, Т. И. Бухарова, К. С. Чистов, Р. З. Кашафутдинов, В. А. Хоркин. – М. : НИЯУ МИФИ, 2010. – 120 с. – ISBN 978–5–7262–1387–3. – Режим доступа : http://library.mephi.ru/Data-IRBIS/book-mephi/Nagornov_Vejvlet-analiz_v_primerah_2010.pdf
21. Рабинер Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов [Текст] / Л. Рабинер, Б. Гоулд. – М. : Мир, 1978. – 848 с.
22. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А. Б. Сергиенко. – 3-е изд. – СПб. : БХВ-Петербург. – 2011. – 758 с. – ISBN 978–5–9775–0606–9.
23. СОУ–Н МЕВ 40.1–00100227–68:2012. Стійкість енергосистем. Керівні вказівки [Текст]. – Введ. 21.10.2012 р. – К. : 2012. – 29 с.
24. СТО 59012820.29.160.20.001–2012. Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов [Текст]. – Утв. 03.04.2012. – М. : 2012. – 67 с.
25. Стогний Б. С. Проблемно-ориентированный мониторинг режимов энергообъединения [Текст] / Б. С. Стогний, А. Ф. Буткевич, Е. В. Зорин, А. В. Левконюк, В. В. Чижевский // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 6. – С. 52–59. – ISSN 1607–7970.
26. Стогний Б. С. Інформаційне забезпечення задач керування електроенергетичними системами [Текст] / Б. С. Стогний, О. В. Кириленко, О. Ф. Буткевич, М. Ф. Сопель // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2012. – №1. – С. 13–22. – ISSN 1813–5420.
27. Стогний Б. С. Створення регіональної системи моніторингу перехідних режимів [Електронний ресурс] / Б. С. Стогний, М. Ф. Сопель, Г. М. Варський, Ю. В. Пилипенко // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2014. – Вип. 38. – С. 48–55. – ISSN 1727–9895. – Режим доступа : http://nbuv.gov.ua/j-pdf/PIED_2014_38_7.pdf

28. Сулейманов В. Н. Электрические сети и системы: Учеб. [Текст] / В. Н. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. – К. : НТУУ “КПИ”. – 2007. – 504 с. – ISBN 978–966–622–246–9.

29. Хрущев Ю. В. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах: учебное пособие [Текст] / Ю. В. Хрущев, К. И. Заповодников, А. Ю. Юшков. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета. – 2012. – 154 с. – ISBN 978–5–4387–0125–5.

30. Чижевський В. В. Особливості застосування методу Проні для аналізу режимних параметрів енергооб’єднань в режимі реального часу [Електронний ресурс] / В. В. Чижевський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012 – №1. – С. 54–57. – ISSN 1997–9274. – Режим доступу : <http://visnyk.vntu.edu.ua/article/download/1503/1128>

31. Юрганов А. А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов [Текст] / А. А. Юрганов, В. А. Кожевников // М. : Наука, 1996. – 145 с. – ISBN 5–02–0024772–3.

32. Abraham R. J. Damping oscillations in Tie-power and Area frequencies in a Thermal power system with SMES-TCPS combination [Текст] / Rajesh Joseph Abraham, D. Das, A. Patra // Journal of Electrical Systems. – March, 2011. – Vol. 7, Iss. 1. – P. 71–80. – ISSN 1112–5209.

33. Acharya N. Facts about Flexible AC Transmission Systems (FACTS) Controllers: Practical Installations and Benefits [Текст] / Naresh Acharya, Arthit Sode-Yome, Nadarajah Mithulananthan // Proceedings of Australian Universities Power Engineering Conference, 25–28 September, 2005, Hobart, Tasmania, Australia. – School of Engineering, 2005. – Vol. 2. – P. 184–189. – ISBN 978–1–8629–5277–5.

34. Analysis of CE Inter-Area Oscillations of 19 and 24 February 2011 [Електронний ресурс] : [ENTSO-E SG SPD Report] // ENTSO-E. – 21.08.2011. – 8 p. – Режим доступу : https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/publications/entsoe/RG_SOC_CE/Top7_110913_CE_inter-area-oscil_feb_19th_24th_final.pdf

35. Assous S. Evaluation of the modified S-transform for time-frequency synchrony analysis and source localisation [Електронний ресурс] / Said Assous, Boualem Boashash // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. – 2012. – No. 49. – 18 p. – ISSN 1687–6180. – Режим доступу : <http://www.asp.eurasipjournals.com/content/pdf/1687-6180-2012-49.pdf>

36. Azah M. Modelling, Simulation and Identification [Электронный ресурс] / Edited by Azah Mohamed. – Sciyo, 2010. – 354 p. – ISBN 978–953–307–136–7. – Режим доступа : <http://www.intechopen.com/books/modelling--simulation-and-identification>
37. Bari Saiful. Diesel Engine – Combustion, Emissions and Condition Monitoring [Текст] / Edited by Saiful Bari // Rijeka : InTech. – 2013. – 278 p. – ISBN 978–953–51–1120–7.
38. Battista B. M. Application of the empirical mode decomposition and Hilbert-Huang transform to seismic reflection data [Электронный ресурс] / Bradley Matthew Battista, Camelia Knapp, Tom McGee, Vaughn Goebel // Geophysics. – March–April, 2007. – Vol. 72, No. 2. – P. H29–H37. – ISSN 1942–2156. – Режим доступа : http://scholarcommons.sc.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1018&context=geol_facpub
39. Breulmann H. Analysis and Damping of Inter-Area Oscillations in the UCTE/CENTREL Power System [Электронный ресурс] / H. Breulmann, E. Grebe, M. Lösing, W. Winter, R. Witzmann, P. Dupuis, M. P. Houry, T. Margotin, J. Zerenyi, J. Dudzik, J. Machowski, L. Martín, J. M. Rodríguez, E. Urretavizcaya // Cigré Session, 2000, Paris, France. – Paper № 38-113. – 10 p. – Режим доступа : http://www.researchgate.net/profile/Jan_Machowski/publication/237660258_Analysis_and_Damping_of_InterArea_Oscillations_in_the_UCTECENTREL_Power_System/links/00b7d52264420434a9000000.pdf
40. Bronzini M. Power system modal identification via wavelet analysis [Текст] / M. Bronzini, S. Bruno, M. De Benedictis, M. La Scala // Proceedings of the 2007 IEEE Lausanne PowerTech, 1–5 July, 2007, Lausanne, Switzerland. – Curran Associates, Inc., 2008. – P. 2041–2046. – ISBN 978–1–4244–2189–3.
41. Brown R. A. A Fast Discrete S-Transform for Biomedical Signal Processing [Текст] / Robert A. Brown, Richard Frayne // Proceedings of the 2008 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 20–24 August, 2008, Vancouver, Canada. – Curran Associates, Inc., 2009 – P. 2586–2589. – ISBN 978–1–4244–1814–5.
42. Butkevych O. F. Power system stability and robustness of synchronous machine's excitation control with magnitude-phase voltage regulator [Текст] / O. F. Butkevych, O. M. Agamalov // Технічна електродинаміка. – 2014. – №5. – С. 41–43. – ISSN 0204–3599.

43. Cebeci M. E. The Effects of Hydro Power Plants' Governor Settings on the Stability of Turkish Power System Frequency [Электронный ресурс] / Mahmut Erkut Cebeci, Ulaş Karaağaç, Osman Bülent Tör, Arif Ertaş // Proceedings of the 5-th IEEE Conference ELECO 2007, 5–9 December, 2007, Bursa, Turkey. – 5 p. – Режим доступа : http://www.emo.org.tr/ekler/ad6635f33710af6_ek.pdf

44. Chang J.-Ch. Iris recognition with an improved empirical mode decomposition method [Текст] / Jyh-Chian Chang, Ming-Yu Huang, Jen-Chun Lee, Chien-Ping Chang, Te-Ming Tu // Optical Engineering. – April, 2009. – Vol. 48, Iss. 4. – 15 p. – ISSN 0091–3286.

45. Chen Y. A technique to improve the empirical mode decomposition in the Hilbert-Huang transform [Электронный ресурс] / Yangbo Chen, Maria Q. Feng // Earthquake Engineering and Engineering Vibration. – June, 2003. – Vol. 2, No. 1. – P. 75–85. – ISSN 1993–503X. – Режим доступа : http://academiccommons.columbia.edu/download/fedora_content/download/ac:158504/CONTENT/BF02857540.pdf

46. Choi Joon-Ho. Parameter Estimation Method of Low-Frequency Oscillating Signals Using Discrete Fourier Transforms [Текст] / Joon-Ho Cho, Kwan-Shik Shim, Hae-Kon Nam, Young-Chul Lim, Soon-Ryul Nam // Journal of Electrical Engineering & Technology. – March, 2012. – Vol. 7, No. 2. – P. 163–170. – ISSN 1975–0102.

47. Darabian M. PSSs and SVC Damping Controllers Design to Mitigate Low Frequency Oscillations Problem in a Multi-machine Power System [Текст] / Mohsen Darabian, Abolfazl Jalilvand, Mehdi Azari // Journal of Electrical Engineering and Technology. – November, 2014. – Vol. 9, No. 6. – P. 942–950. – ISSN 1975–0102.

48. Despa D. Inter-Area Power Oscillation Mode For Singapore–Malaysia Interconnected Power System Based on Phasor Measurements with Auto Spectrum Analysis [Текст] / Dikpride Despa, Yasunori Mitani, Changsong Li, Masayuki Watanabe // Proceedings of the 17th Power Systems Computation Conference (PSCC) 2011, Stockholm, Sweden, 22–26 August, 2011. – Vol. 2. – P. 847–852. – ISBN 978–1–61839–227–5.

49. Ding Q. Inconsistency of the MDL: On the Performance of Model Order Selection Criteria with Increasing Signal-to-Noise Ratio [Электронный ресурс] / Quan Ding, Steven Kay // IEEE Transactions on Signal Processing. – May, 2011. – Vol. 59, Iss. 5. – P. 1959 – 1969. – ISSN 1053–587X. – Режим доступа : http://www.ele.uri.edu/faculty/kay/New%20web/downloadable%20files/manuscript_MDL.pdf

50. Du Q. Improvement of the EMD method and applications in defect diagnosis of ball bearings [Текст] / Du Qiuhua, Yang Shunian // Proceeding of SPIE Sixth International Symposium on Instrumentation and Control Technology: Signal Analysis, Measurement Theory, Photo-Electronic Technology, and Artificial Intelligence, Beijing, China, 24 October, 2006. – SPIE Press, 2006. – Vol. 6357. – 5 p. – ISBN 978-0-8194-6452-1.

51. Duan G. Low Frequency Oscillation Monitoring and Assessment in CSS200 WAMS [Электронный ресурс] / G. Duan, X. Sun, J. T. Wu, D. Yang, Y. Zhang // Proceedings of the Cigré 2-nd International Conference “Monitoring of Power System Dynamics Performance”, 28–30 April 2008, Saint Petersburg, Russian Federation. – S2-5. – 8 p. – Режим доступа : <http://www.twirpx.com/file/858201/>

52. Elenius S. Transmission Capacity Increase by Retuning Power System Stabilizers [Текст] / Stefan Elenius, Jussi Jyrinsalo, Simo Joki-Korpela // CIGRÉ Session, 29 August – 3 September, 2004, Paris, France. – C1-207. – 8 p.

53. ENTSO-E. Articles of Association Member Companies [Электронный ресурс] : [Edition 30.09.2014]. – 35 p. – Режим доступа : https://www.entsoe.eu/Documents/General%20ENTSOE%20documents/General%20ENTSO-E%20documents/140930_Articles_of_Association.pdf

54. Fault recorder FR947-M PowerProbe [Электронный ресурс]. – LogicLab S. R. L., January, 2009. – 12 p. – Режим доступа : <http://www.logiclab.it/Documents/Fault%20recorder%20LogicLab.pdf>

55. Feasibility Study: Synchronous Interconnection of the IPS/UPS with the UCTE. Summary of Investigations and Conclusions [Электронный ресурс]. – December, 2008. – 16 p. – Режим доступа : https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/library/news/081208_UCTE-IPSUPS_SoIaC_published.pdf

56. Febres C. A. T. Damping of Low-Frequency Oscillations by Supplementary Control of Power System Stabilizers [Текст] / C. A. T. Febres, P. B. Araujo, M. A. Furini // Trends in Applied and Computational Mathematics. – August, 2008. – Vol. 9, Iss. 2. – P. 223–232. – ISSN 1677–1966.

57. Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations [Электронный ресурс] : [U.S.–Canada Power System Outage Task Force]. – April, 2003. – 238 p. – Режим доступа : <https://certs.lbl.gov/sites/all/files/2003-blackout-us-canada.pdf>

58. Follum J. D. Detection of Forced Oscillations in Power Systems with Multichannel Methods [Электронный ресурс] / J. D. Follum. – September, 2015. – Режим доступа : http://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-24681.pdf

59. Gajjar G. Power System Oscillation Modes Identifications From Wide Area Frequency Measurement System [Текст] / G. Gajjar, S.A. Soman // Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON 2012), 30 October – 2 November, 2012, Auckland, New Zealand. – Curran Associates, Inc., 2013. – P. 651–656. – ISBN 978–1–4673–2868–5.

60. Gama C. Commissioning and Operative Experience of TCSC for Damping Power Oscillation in the Brazilian North-South Interconnection [Электронный ресурс] // C. Gama, L. Ängquist, G. Ingeström, M. Noroozilan // CIGRÉ Session, August 27 – September 1, 2000, Paris, France. – C14–104. – 6 p. – Режим доступа : https://library.e.abb.com/public/812c934adbc95ed1c1256fda003b4d3f/14_104e.pdf

61. Gerasimov A. The registrator of parameters of the transient states “SMART-WAMS” and its testing [Электронный ресурс] / A. Gerasimov, A. Esipovich, G. Kiryenko, M. Korolev, Y. Kulikov, R. Mogilko // Proceedings of the CIGRÉ Conference on Monitoring of Power System Dynamics Performance, April 25–27, 2006, Moscow, Russian Federation. – 7 p. – Режим доступа : http://www.cigre.ru/activity/conference/conf_2006/proceedings/The_registrator_of_parameters.pdf

62. Giraldo B. F. Using the Heart Rate Variability for Classifying Patients with and without Chronic Heart Failure and Periodic Breathing [Электронный ресурс] / Beatriz F. Giraldo, Joan P. Téllez, Sergio Herrera, Salvador Benito // Jornades de recerca euetib. – December, 2013. – P. 145–152 – ISBN 978–84–695–9922–8. – Режим доступа : <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/15002/Using%20the%20Heart%20Rate%20Variability%20for%20classifying%20patients%20with%20and%20without%20Chronic%20Heart%20Failure%20and%20Periodic%20Breathing.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

63. Gong Y. Synchrophasor-Based Online Modal Analysis to Mitigate Power System Interarea Oscillation [Электронный ресурс] / Yanfeng Gong, Armando Guzmán // Journal of Reliable Power. – May, 2011. – Vol. 2, No. 2. – P. 42–47. – Режим доступа : http://www.selinc.com.br/journal_of_reliable_power/Journal-of-Reliable-Power_V2N2.pdf

64. Grigsby L. L. The Power System Stability and Control [Текст] / Leo L. Grigsby. – Taylor & Francis Group, 2001. – 1496 p. – ISBN 978–0–84–938578–0.
65. Gu L. Real Time Analysis of Low Frequency Oscillation for Large Scale Power System [Текст] / Lihong Gu, Min Liu, Jianfeng Yan, Yiru Shou // Proceedings of the 9-th WSEAS International Conference on Instrumentation, Measurement, Circuits and Systems. – 2010. – P. 124–130. – ISBN 978–960–474–174–8.
66. Hadi S. P. TCSC Power Oscillation Damping and PSS Design Using Genetic Algorithm Modal Optimal Control [Текст] / Sasongko Pramono Hadi, Hatta Imaduddin Wiennetou, Rian Fatah Mochamad // International Journal of Engineering & Computer Science. – February, 2013. – Vol. 13, No. 1. – P. 23–30. – ISSN 2319–7242.
67. Han S. Dynamic Characteristic Analysis of Power System Low Frequency Oscillation using Hilbert-Huang Transform [Текст] / Song Han, Bin Sun, Cheng Wu, Liquan He // Proceedings of the IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition 2009 (PSCE 2009), 15–18 March, 2009, Seattle, Washington, USA. – Curran Associates, Inc., 2009. – P. 1447–1452. – ISBN 978–1–4244–3810–5.
68. Hsu Y.-Y. Investigation of the Low Frequency Oscillations in the Taiwan Power System [Текст] / Yuan-Yih Hsu // Electric Power Systems Research. – 1986. – No. 10. – P. 95–102. – ISSN 0378–7796.
69. Huang N. E. A Review on Hilbert-Huang Transform: Method and its Application to Geophysical Studies [Электронный ресурс] / Norden E. Huang, Zhaohua Wu // Reviews of Geophysics. – June, 2008. – Vol. 46, Iss. 2. –ISSN 1944–9208. – Режим доступа : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007RG000228/full>
70. Huang N. E. Hilbert-Huang Transform and Its Applications [Электронный ресурс] / Norden E. Huang, Samuel S. P. Shen. – 2-nd edition. – World Scientific Publishing Company, 2014. – 400 p. – ISBN 978–981–4508–25–4. – Режим доступа : <http://www.twirpx.com/file/1731242/>
71. Huang N. E. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [Электронный ресурс] / Norden E. Huang, Zheng Shen, Steven R. Long, Manli C. Wu, Hsing H. Shih, Quanan Zheng, Nai-Chyuan Yen, Chi Chao Tung, Henry H. Liu // Proceedings of the Royal Society A. – March, 1998. – Vol. 454, Iss. 1971. – P. 903–995. – ISSN 1471–2946. – Режим доступа : <http://tec.earth.sinica.edu.tw/research/report/paper/20070711HHT.pdf>

72. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies (IEEE Std 421.5 – 2005) [Электронный ресурс]. – Approved 25 October 2005 IEEE-SA Standards Board. – 85 p. – ISBN 978–0–7381–4787–7. – Режим доступа : <http://www.igmc.ir/Portals/0/bazare%20bargh/darkhast%20sodor%20parvane%20tolid/IEEE%20Std%20421.5-2005.pdf>

73. IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems (IEEE Std C37.118.1 – 2011) [Электронный ресурс]. – Approved 7 December 2011 IEEE-SA Standards Board. – 61 p. – ISBN 978–0–7381–6811–1. – Режим доступа : <http://smartgridcenter.tamu.edu/resume/pdf/1/C37.118.1-2011.pdf>

74. IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems. Amendment 1: Modification of Selected Performance Requirements (IEEE Std C37.118.1a – 2014) [Текст]. – Approved 27 March 2014 IEEE-SA Standards Board. – 25 p. – ISBN 978–0–7381–8979–6.

75. IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems (IEEE Std C37.118.2 – 2011) [Текст]. – Approved 7 December 2011 IEEE-SA Standards Board. – 53 p. – ISBN 978–0–7381–6814–2.

76. Jakpattanajit Chairerg. On-line Estimation of Power System Low Frequency Oscillatory Modes in Large Power Systems [Текст] / Chairerg Jakpattanajit, Naebboon Hoonchareon, Akihiko Yokoyama // Journal of International Council on Electrical Engineering. – July, 2011. – Vol. 1, Iss. 3. – P. 352–358. – ISSN 2233–5951.

77. Jan-E-Alam M. Application of TCSC for Stabilization of Inter-Area Oscillation in Bangladesh Power System [Текст] / M. Jan-E-Alam, A. H. Chowdhury // Proceedings of the International Conference on Electrical & Computer Engineering (ICECE 2010), 18–20 December, 2010, Dhaka, Bangladesh. – Curran Associates, Inc., 2011. – P. 283–286. – ISBN 978–1–4244–6277–3.

78. Jones D. Estimation of Power System Parameters [Текст] / Dewi Jones // IEEE Transactions on Power Systems. – November, 2004. – Vol. 19, No. 4. – P. 1981–1989. – ISSN 0885–8950.

79. Kahn M. H. On the consistency of Prony's method and related algorithms [Электронный ресурс] / M. H. Kahn, M. S. Mackisack, M. R. Osborne, G. K. Smyth // Journal of Computational and Graphical Statistics. – Vol. 1, No. 4. – December, 1992. – P. 329–349. – ISSN 1061–8600. – Режим доступа : <http://www.statsci.org/webguide/smyth/pubs/consist.pdf>

80. Kakimoto N. Monitoring of Interarea Oscillation Mode by Synchronized Phasor Measurement [Текст] / Naoto Kakimoto, Masahiro Sugumi, Tohru Makino, Katsuyuki Tomiyama // IEEE Transactions on Power Systems. – February, 2006. – Vol. 21, No. 1. – P. 260–268. – ISSN 0885–8950.

81. Kamwa I. IEEE PSS2B Versus PSS4B: The Limits of Performance of Modern Power System Stabilizers [Текст] / I. Kamwa, R. Grondin, G. Trudel // IEEE Transactions on Power Systems. – May, 2005. – Vol. 20, No. 2. – P. 903–915. – ISSN 0885–8950.

82. Kamwa I. Optimal Integration of Disparate C37.118 PMUs in Wide-Area PSS with Electromagnetic Transients / Innocent Kamwa, S. R. Samantaray, Geza Joos // IEEE Transactions on Power Systems. – November, 2013. – Vol. 28, No. 4. – P. 4760–4770. – ISSN 0885–8950.

83. Kay S. The Exponentially Embedded Family of Distribution for Effective Data Representation, Information Extraction and Decision Making: Final Report [Электронный ресурс] / Steven Kay, Haibo He, Quan Ding // University of Rhode Island. – March, 2013. – 41 p. – Режим доступа : <http://www.dtic.mil/get-tr-doc/pdf?AD=ADA582481>

84. Kay S. Model Estimation and Classification Via Model Structure Determination [Текст] / Steven Kay, Quan Ding // IEEE Transactions on Signal Processing. – May, 2013. – Vol. 61, Iss. 10. – P. 2588–2597. – ISSN 1053–587X.

85. Khairudin. Synchrophasor measurement based damping estimation and oscillation mode detection using FFT-CWT approach in Japan campus WAMS [Электронный ресурс] / Khairudin, Yaser Qudaiha, Yasunori Mitani // International Journal of Smart Grid and Clean Energy. – April, 2015. – Vol. 4, No. 2. – P. 93–102. – ISSN 2373–3594. – Режим доступа : <http://www.ijsgce.com/uploadfile/2015/0811/20150811025626546.pdf>

86. Khanna R. Damping of Low frequency Oscillations Using GA based Unified Power Flow Controller [Текст] / Rintu Khanna, Pooja Manrai // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). – October, 2012. – Vol. 2, Iss.1 – P. 307–311. – ISSN 2249–8958.

87. Kitamura M. A Model Order Estimation in the Matrix Pencil Method For the Transient Response of a Microwave Circuit Discontinuity [Электронный ресурс] / Manabu Kitamura, Junichi Takada, Kiyomichi Araki // IEICE Transactions on Electronics. – Vol. E82-C, No. 11. – November, 1999. – P. 2081–2085. – ISSN 1745–1353. – Режим доступа : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.29.7869&rep=rep1&type=pdf>

88. Kiviniemi A. M. α -Adrenergic effects on low-frequency oscillations in blood pressure and R–R intervals during sympathetic activation [Электронный ресурс] / Antti M. Kiviniemi, Maria F. Frances, Suvi Tiinanen, Rosemary Craen, Maxim Rachinsky, Robert J. Petrella, Tapio Seppanen, Heikki V. Huikuri, Mikko P. Tulppo, J. Kevin Shoemaker // *Experimental Physiology*. – July, 2011. – Vol. 96, Iss. 8. – P. 718–735. – ISSN 1469–445X. – Режим доступа : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1113/expphysiol.2011.058768/pdf>

89. Klien M. A fundamental study of inter-area oscillations in power systems [Текст] / M. Klein, G. J. Rogers, P. Kundur // *IEEE Transactions on Power Systems*. – August, 1991. – Vol. 6, Iss. 3. – P. 914–921. – ISSN 0885–8950.

90. Kundu D. Estimating the parameters of undamped exponential signals [Электронный ресурс] / Debasis Kundu // *Technometrics*. – May, 1993. – Vol. 35, No. 2 – P. 215–218. – ISSN 0040–1706. – Режим доступа : <http://home.iitk.ac.in/~kundu/paper9.pdf>

91. Kundur P. Power system stability and control [Текст] / P. Kundur. – New York : McGraw-Hill. – 1994. – 1200 p. – ISBN 978–0–07–035958–1.

92. Kyrylenko O. Monitoring of operational parameters of interconnected power systems [Электронный ресурс] / Oleksandr Kyrylenko, Oleksandr Butkevych, Volodymyr Chyzhevskiy // *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*. – 2012. – R. 88, No. 3a. – P. 25–27. – ISSN 0033–2097. – Режим доступа : <http://pe.org.pl/articles/2012/3a/9.pdf>

93. LabVIEW 2015 Help [Электронный ресурс]. – Edition Date : June, 2015. Part Number: 371361M-01. – Режим доступа : http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361M-01/lvanls/stft_spectrogram_core/

94. Laila D. Sh. Variants of Hilbert–Huang Transform with Applications to Power Systems' Oscillatory Dynamics [Текст] / Dina Shona Laila, Arturo Roman Messina, Bikash Chandra Pal // *Inter-area Oscillations in Power Systems: A Nonlinear and Nonstationary Perspective*. – Springer, 2009. – P. 63–100. – ISBN 978–0–387–89529–1.

95. Lauria D. On Hilbert transform methods for low frequency oscillations detection [Текст] / Davide Lauria, Cosimo Pisani // *IET Generation, Transmission & Distribution*. – June, 2014. – Vol. 8, Iss. 6. – P. 1061–1074. – ISSN 1751–8687.

96. Liao Q. Applications of Improved Matrix Pencil Method for UHV Power System and Excitation Controller [Электронный ресурс] / Qingfen Liao, Dichen Liu, Yuzhi Wu, Ling Zhang, Zheng Zeng // *Proceedings of the 2010 Power and Energy Engineering Conference (PEEC 2010)*, 9–13 September, 2010, Wuhan, China. – Scientific Research Publishing, 2010. – P. 521–525. – ISBN 978–1–935068–17–4. – Режим доступа : <http://www.scirp.org/journal/PaperDownload.aspx?paperID=12148>

97. Liu G. Oscillation Monitoring System Based on Wide Area Synchrophasors in Power Systems [Текст] / Guoping Liu, Jaime Quintero, and Vaithianathan “Mani” Venkatasubramanian // Proceedings of the 2007 iREP Symposium-Bulk Power System Dynamics and Control – VII Revitalizing Operational Reliability, 19–24 August, 2007, Charleston, South Carolina, USA. – Curran Associates, Inc., 2008 – P. 340–350. – ISBN 978–1–4244–1519–9.

98. Liu L. Notice of Retraction Feature analysis of heart sound based on the improved Hilbert-Huang Transform [Электронный ресурс] / Lihan Liu, Haibin Wang, Yan Wang, Ting Tao, Xiaochen Wu // Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology 2010 (ICCSIT 2010), 9–11 July, 2010, Chengdu, China. – Curran Associates, Inc., 2010. – P. 378–381. – ISBN 978–1–4244–5537–9. – Режим доступа : <http://www.meeting.edu.cn/meeting/UploadPapers/1281671408562.pdf>

99. Liu Y. Wide-Area Measurement System Development at the Distribution Level: an FNET/GridEye Example [Электронный ресурс] / Yong Liu, Lingwei Zhan, Ye Zhang, Penn N. Markham, Dao Zhou, Jiahui Guo, Yin Lei, Gefei Kou, Wenxuan Yao, Jidong Chai, Yilu Liu // IEEE Transactions on Power Delivery. – April, 2016. – Vol. 31, No. 2. – P. 721–731. – ISSN 0885–8977. – Режим доступа : <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7265090>

100. Luo J. Online detection and disturbance source location of low frequency oscillation [Текст] / J. Luo, F. Z. Wang, C. W. Zhou, B. J. Wen // Proceedings of the 2014 Asia-Pacific Electronics and Electrical Engineering Conference (EEEC 2014), December 27–28, 2014, Shanghai, China. – Boca Raton : CRC Press. – 2015. – P. 155–160. – ISBN 978–1–13–802809–8.

101. Machowski Jan. Power system dynamics: stability and control [Текст] / Jan Machowski, Janusz W. Bialek, James R. Bumby // John Wiley & Sons, Ltd. – 2-nd edition. – 2008. – 629 p. – ISBN 978–0–470–72558–0.

102. Mahmudul Hasan Sajeeb M. Power System Stability Problem because of Low Frequency Oscillation and A brief Overview of Recent Power Blackout in Bangladesh Power System Stability Problem because of Low Frequency Oscillation and A brief Overview of Recent Power Blackout in Bangladesh [Электронный ресурс] / M. Mahmudul Hasan Sajeeb, Md. ArifurKabir, Syed Md. Sifat Morshed Chowdhury, Manik Dautta // Proceedings of the 2-nd International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology, May 21–23, 2015, Jahangirnagar University, Dhaka, Bangladesh. – 6 p. – Режим доступа : <https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWVpbnxtYW5pa2RhdxR0YXxneDo2OTg0ZDNhYTUwMzBiZWl0>

103. McCalley J. D. Low Frequency Oscillations in Power Systems #2 Nonlinear System View. Presentation [Электронный ресурс] / James D. McCalley. – 84 p. – Режим доступа : <http://biblioteca.cenace.org.ec/jspui/bitstream/123456789/826/77/modelos.pdf>

104. Meier R. J. Toward Automated Decision-Making in Power Systems Wide-Area Protection: Thesis for the degree of Master of Science in Electrical and Computer Engineering : presented on June 12, 2015 [Электронный ресурс] / Richard John Meier. – Oregon State University. – 92 p. – Режим доступа : https://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/bitstream/handle/1957/56382/MeierRichardJ_2015.pdf?sequence=1

105. Messina A. R. Damping of Low-Frequency Interarea Oscillations Using HVDC Modulation and SVC Voltage Support [Текст] / A. R. Messina, J. Arroyo, N. Evaristo, I. Castillo // Electric Power Components and Systems. – April, 2003. – Vol. 31, Iss. 4. – P. 389–402. – ISSN 1532–5008.

106. Messina A. R. Nonlinear, Non-Stationary Analysis of Interarea Oscillations via Hilbert Spectral Analysis [Текст] / A. R. Messina, Vijay Vittal // IEEE Transactions on Power Systems. – August, 2006. – Vol. 21, No. 3. – P. 1234–1241. – ISSN 0885–8950.

107. Miri A. M. Active damping of torsional modes in turbine-generator shafts [Электронный ресурс] / A. M. Miri, C. Sihler, T. Zoller // Universität Karlsruhe, Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik. – June, 2009. – 6 p. – Режим доступа : https://www.ieh.kit.edu/rd_download/ActiveDamping_TorsionalModes.pdf

108. Mitani Y. Monitoring the Wide Area Power System Dynamics by Phasor Measurement Units Based on Campus WAMS Strategy [Текст] / Yasunori Mitani, Takeshi Kudo, Akihiro Satake, Khairudin Hasan Basri // Proceedings of the 19th World Congress The International Federation of Automatic Control (IFAC), Cape Town, South Africa, 24–29 August, 2014. – P. 2273–2278. – ISBN 978–3–902823–62–5.

109. Mondal Debasish. Power system small signal stability analysis and control [Текст] / Debasish Mondal, Abhijit Chakrabarti, Aparajita Sengupta // London : Waltham Mass. : Academic Press. – 2014. – 328 p. – ISBN 978–0–128–00572–9.

110. Mustafa M. W. TCSC Control of Power System Oscillation and Analysis Using Eigenvalue Techniques [Текст] / M. W. Mustafa, N. Magaji, Z. Memberand // International Journal of Engineering & Technology. – December, 2009. – Vol. 9, Iss. 10. – P. 47–53. – ISSN 1793–8236.

111. Neely J. C. Damping of Inter-area Oscillations Using Energy Storage [Электронный ресурс] / Jason C. Neely, Raymond H. Byrne, Ryan T. Elliott, Cesar A. Silva-Monroy, David A. Schoenwald, Daniel J. Trudnowski, Matthew K. Donnelly // Proceedings of the 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 21–25, July 2013, Vancouver, British Columbia, Canada. – Curran Associates, Inc., 2014. – P. 2808–2812. – ISBN 978–1–4799–1302–2. – Режим доступа : http://www.sandia.gov/ess/docs/other/PES_Damping_Control.pdf

112. Ngamroo I. A robust SMES controller design for stabilization of inter-area oscillations based on wide area synchronized phasor measurements [Текст] / I. Ngamroo, C. S. A. Nanda, S. Dechanupaprittha, W. Watanabe, Y. Mitani // Electric Power Systems Research. – December, 2009 – Vol. 79, Iss. 12. – P. 1738–1749. – ISSN 0378–7796.

113. Ngamroo Issarachai. PMU Based Monitoring of Inter-Area Oscillation in Thailand Power System via Home Power Outlets [Текст] / Issarachai Ngamroo, Sanchai Dechanupaprittha, Yasunori Mitani // ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics and Communications. – August, 2007. – Vol. 5, No. 2. – P. 2273–2278. – ISSN 1685–9545.

114. Nwohu M. N. Low-frequency power oscillation damping enhancement and voltage improvement using unified power flow controller (UPFC) in multi-machine power system [Текст] / Mark Ndubuka Nwohu // Journal of Electrical and Electronics Engineering Research. – July, 2011. – Vol. 3, No. 5. – P. 87–100. – ISSN 2141–2367.

115. Osborne M. R. A modified Prony algorithm for fitting functions defined by difference equations [Электронный ресурс] / M. R. Osborne, G. K. Smyth // SIAM Journal of Scientific and Statistical Computing. – March, 1991. – Vol. 12., Iss. 2. – P. 362–382. – ISSN 1095–7197. – Режим доступа : <http://www.statsci.org/smyth/pubs/pronyr.pdf>

116. Osborne M. R. A modified Prony algorithm for fitting sums of exponential functions [Электронный ресурс] / M. R. Osborne, G. K. Smyth // SIAM Journal of Scientific Computing. – 1995. – Vol. 16., Iss. 1. – P. 119–138. – ISSN 1095–7197. – Режим доступа : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=5BE7859044A806EEBE288CE05A5AEDEE?doi=10.1.1.49.218&rep=rep1&type=pdf>

117. Pal Bikash. Robust Control in Power Systems [Текст] / Bikash Pal, Balarko Chaudhari. – New York : Springer Inc. – 2005. – 190 p. – ISBN 978–0387–25949–9.

118. Park J. H. Modified Hilbert-Huang Transform and its Application to Measured Micro Doppler Signatures from Realistic Jet Engine Models [Электронный ресурс] / J. H. Park, H. Lim, N. H. Myung // Progress In Electromagnetics Research. – 2012. – Vol. 126. – P. 255–268. – ISSN 1559–8985. – Режим доступа : <http://www.jpier.org/PIER/pier126/14.12010602.pdf>

119. Patil V. S. Real-time Identification of Electromechanical Modes using Controlled Window-size Multi-Prony Analysis [Электронный ресурс] / V. S. Patil, P. P. Jambhulkar, V. P. Kamble // International Journal of Engineering Research & Technology. – April, 2014. – Vol. 3, Iss. 4. – P. 1627–1634. – ISSN 2278-0181. – Режим доступа : <http://www.ijert.org/download/9337/real-time-identification-of-electromechanical-modes-using-controlled-window-size-multi-prony-analysis>

120. Pentayya P. Low Frequency Oscillations in Indian Grid [Электронный ресурс] / P. Pentayya, A. Gartia, Pushpa Seshadri, A. Rajkumar, Chandan Kumar // Proceedings of the 5-th International Conference on Power and Energy Systems, Kathmandu, Nepal, 28–30 October, 2013. – 5 p. – Режим доступа : <https://www.ee.iitb.ac.in/icps2013/package/papers/Session%20B/74.pdf>

121. Pico H.V. Analysis of Very Low Frequency Oscillations in Hydro-Dominant Power Systems Using Multi-Unit Modeling / H.V. Pico, J. D. McCalley, A. Angel, R. Leon, N. J. Castrillon // IEEE Transactions on Power Systems. – November, 2012. – Vol. 27, No. 4. – P. 1906–1915. – ISSN 0885–8950.

122. Power Systems Dynamics Tutorial. Final Report [Электронный ресурс] : [July 2009] // Electric Power Research Institute. – 2009. – 1010 p. – Режим доступа : <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000000001016042&Mode=download>

123. Prasertwong K. Understanding low frequency oscillation in power systems [Текст] / K. Prasertwong, N. Mirthulanathan, D. Thakur // International Journal of Electrical Engineering Education. – July, 2010. – Vol. 47, No. 3. – P. 248–262. – ISSN 0020–7209.

124. Prince A. Modal Phase Identification from WAMS data using Hilbert transform and S-transform: A Comparative Study [Текст] / A. Prince, N. Senroy, R. Balasubramanian // Proceedings of the 2011 IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems (RAICS 2011), 22–24 September, 2011, Trivandrum, India. – Curran Associates, Inc., 2011. – P. 183–187. – ISBN 978–1–4244–9478–1.

125. PSS-100 Power System Stabilizer. SRC-3 Bulletin [Электронный ресурс]. – Basler Electric, 2004. – 8 p. – Режим доступа : <http://electro-dynamics.eu/pdf/pss100.pdf>

126. Quintero J. Results on a Real-Time Wide-Area Control for Mitigating Small-Signal Instability in Large Electric Power Systems [Текст] / Jaime Quintero, Vaithianathan (Mani) Venkatasubramanian // Proceedings of the 2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition (TDC'06): Latin America, 15–18 August 2006, Caracas, Venezuela. – Curran Associates, Inc., 2007. – P. 825–832. – ISBN 1–4244–0287–5.

127. Rai Sh. A Robust TLS-ESPIRIT Method using Covariance Approach for Identification of Low-Frequency Oscillatory Mode in Power Systems [Текст] / Shekha Rai, P. Tripathy, S. K. Nayak // Proceedings of the Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC 2014), 18–20 December, 2014, Guwahati, India. – Curran Associates, Inc., 2015. – P. 625–630. – ISBN 978–1–4799–7852–6.

128. Rampurkar V. Synchrophasor Based Oscillatory Mode Source Identification. A case Study Indian Grid [Электронный ресурс] / Vaishali Rampurkar, Faruk Kazi, H. A. Mangalvedekar, P. Pentayya // Proceedings of the 6th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS 2015), 9–12 February, 2015, Kuala Lumpur, Malaysia. – IEEE, 2015. – P. 169–174. – ISBN 978–1–4799–8258–5. – Режим доступа : <http://ijssst.info/Vol-16/No-4/data/8258a169.pdf>

129. Rangaswamy M. Model Order Estimation for Adaptive Radar Clutter Cancellation [Электронный ресурс] / Muralidhar Rangaswamy, Steven Kay, Cuichun Xu, Freeman C. Lin // Proceedings of the 2007 International Waveform Diversity and Design Conference, 4–8 June, 2007, Pisa, Italy. – Curran Associates, Inc., 2008. – P. 339–343. – ISBN 978–1–4244–1275–4. – Режим доступа : <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a519297.pdf>

130. Report on Power System oscillations experienced in Indian Grid on 9th, 10th, 11th and 12th August 2014 [Электронный ресурс] – POSOCO, 2014. – 127 p. – Режим доступа : http://posoco.in/attachments/article/201/Report_Power%20System%20oscillations_India_POSOCO_Final.pdf

131. Report on the Grid Disturbances on 30th July and 31st July 2012 [Электронный ресурс] : Submitted in Compliance to CERC Order in Petition No. 167/Suo-Motu/2012 dated 1st Aug 2012. – 129 p. – Режим доступа : http://www.cercind.gov.in/2012/orders/Final_Report_Grid_Disturbance.pdf

132. Rilling G. On empirical mode decomposition and it's algorithms [Электронный ресурс] / Gabriel Rilling, Patrick Flandrin, Paulo Gonçalves // Proceedings of the 6th IEEE/EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing (NSIP '03), 8–11 July, 2003, Grado, Italy. – 5 p. – Режим доступа : <http://perso.ens-lyon.fr/patrick.flandrin/NSIP03.pdf>

133. Rivett M. PI Server 2012 Webinar Series: WAMS/Synchrophasor, PI Server 2012 and OSIsoft/Dell collaboration at Dell Solution Centers : Presentation [Электронный ресурс] / Matt Rivett, Jim Kleitsch, Rick Reeder, Ann Moore, Jay Lakumb. – 2012. – 76 p. – Режим доступа : http://cdn.osisoft.com/corp/en/media/webinars/PIServer2012_WAMS_12052012.pdf

134. Rogers G. Power system oscillations [Текст] / G. Rogers. – Boston : Kluwer Academic Publishers. – 2000. – 344 p. – ISBN 0–7923–7712–5.

135. Rouco L. Eigenvalue-based methods for analysis and control of power system oscillations [Текст] / L. Rouco // IEE Colloquium on Power System Dynamics Stabilisation (Digest No. 1998/196 and 1998/278) – IET, 1998. – P. 3/1–3/6.

136. Rudervall R. High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Systems Technology Review Paper [Электронный ресурс] / Roberto Rudervall, J. P. Charpentier, Raghuvveer Sharma // Presented at Energy Week, 7–8 March, 2000, Washington, D. C, USA. – 17 p. – Режим доступа : <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/hamerly1/docs/energyweek00.pdf>

137. Ruhle O. Eigenvalue Analysis – All Information on Power System Oscillation Behavior Rapidly Analyzed [Электронный ресурс] / Olaf Ruhle // Siemens PTI. – Iss. 99. – September, 2006. – 5 p. – Режим доступа : http://w3.usa.siemens.com/datapool/us/SmartGrid/docs/pti/2006June/Eigenvalue_Analysis.pdf

138. San Martín J. I. Energy Storage Technologies for Electric Applications [Электронный ресурс] / J. I. San Martín, I. Zamora, J. J. San Martín, V. Aperribay, P. Eguía // Proceedings of the 2011 International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11), 13–15 April, 2011, Las Palmas de Gran Canaria, Spain. – Paper 398. – 6 p. – ISBN 978–84–614–7527–8. – Режим доступа : <http://www.icrepq.com/icrepq11/398-san-martin.pdf>

139. Schweitzer III E. O. Advanced Real-Time Synchrophasor Applications [Электронный ресурс] / Edmund O. Schweitzer, III, David Whitehead, Armando Guzmán, Yanfeng Gong, Marcos Donolo // Journal of Reliable Power. – May, 2011. – Vol. 2, No. 2. – P. 16–28. – Режим доступа : http://www.selinc.com.br/journal_of_reliable_power/Journal-of-Reliable-Power_V2N2.pdf

140. Sen Gupta D. P. Low frequency oscillations in power systems: A physical account and adaptive stabilizers [Электронный ресурс] / D. P. Sen Gupta, Sen Indraneel // Sadhana. – September, 1993. – Vol. 18, Part 5. – P. 843–856. – ISSN 0256–2499. – Режим доступа : <http://eprints.iisc.ernet.in/35530/1/Low.pdf>

141. Senroy N. Enhancements to the Hilbert–Huang Transform for Application to Power System Oscillations [Текст] / Nilanjan Senroy // Inter-area Oscillations in Power Systems: A Nonlinear and Nonstationary Perspective. – Springer, 2009. – P. 37–62. – ISBN 978–0–387–89529–1.

142. Shanechi H. M. General Nonlinear Modal Representation of Large Scale Power Systems [Текст] / Hasan Modir Shanechi, Naser Pariz, Ebrahim Vaahedi // IEEE Transactions on Power Systems. – August, 2003. – Vol. 18, No. 3. – P. 1103–1109. – ISSN 0885–8950.

143. Sharma Ch. Contribution of Loads to Low Frequency Oscillations in Power System Operation [Текст] / Chandrabhan Sharma, Parasnath Singh // 2007 iREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control – VII: Revitalizing Operational Reliability, 19–24 August, 2007, Charleston, USA. – Curran Associates, Inc., 2008. – P. 132–139. – ISBN 978–1–4244–1518–2.

144. Shi F. The HVDC Supplementary Control for AC/DC Interconnected Power Grid Based on Hamilton Energy Function Theory [Текст] / Fang Shi, Jie Wang // Elektronika ir elektrotechnika. – 2014. – Vol. 20, No. 4. – P. 15–21. – ISSN 1392–1215.

145. Shi J. H. Implementation of an Adaptive Continuous Real-Time Control System Based on WAMS [Текст] / J. H. Shi, P. Li, X. C. Wu, J. T. Wu, C. Lu, Y. Zhang, Y. K. Zhao, J. Hu // Proceedings of the Cigré 2-nd International Conference “Monitoring of Power System Dynamics Performance”, 28–30 April 2008, Saint Petersburg, Russian Federation. – S1–12. – 9 p.

146. Shofiqul I. Spectral Analysis of Synthetic Power Signals of Different Regions Using Parametric Methods and Spectrogram Representations [Электронный ресурс] / Shofiqul Islam, Celia Shahnaz, Ziaul Hoque // IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering. – September–October, 2014. – Vol. 9, Iss. 5, Ver. II. – P. 28–39. – ISSN 2278–1676.

147. Spain to invest heavily in transmission grid upgrades over next five years [Электронный ресурс] // CSP Today. – April, 1, 2010. – Режим доступа : <http://social.csptoday.com/markets/spain-invest-heavily-transmission-grid-upgrades-over-next-five-years>

148. Stockwell R.G. Localization of the complex spectrum: The S transform [Электронный ресурс] / R. G. Stockwell, L. Mansinha, R. P. Lowe // IEEE Transactions on Signal Processing. – April, 1996. – Vol. 44, Iss. 4. – P. 998–1001. – ISSN 1053–587X. – Режим доступа : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.462.1500&rep=rep1&type=pdf>
149. Su Yu. Ship Power Quality Detection based on Improved Hilbert-Huang Transform [Электронный ресурс] / Yuxiang Su, Guoping Liu, ravin Li, Xiaoqun Shen // Journal of Computers. – August, 2012. – Vol. 7, No. 8. – P. 1990–1997. – ISSN 1991–1599. – Режим доступа : <http://www.csroc.org.tw/journal/JOC25-3/JOC25-3-3.pdf>
150. Sui X. Energy-Storage-Based Low-Frequency Oscillation Damping Control Using Particle Swarm Optimization and Heuristic Dynamic Programming [Текст] / Xianchao Sui, Yufei Tang, Haibo He, Jinyu Wen // IEEE Transactions on Power Systems. – September, 2014. – Vol. 29, No. 5. – P. 2539–2548. – ISSN 0885–8950.
151. Sushil Ch. Operational Experience of Real Time Oscillation Monitoring System in India [Электронный ресурс] / Cherian Sushil, A. S. Biju, Jose Nilby, Raman Rakesh // CIGRÉ 2013 Colloquium, November 13–15, 2013, Mysore, Karnataka, India. – 6 p. – Режим доступа : http://www.cbip.org/TechnicalPapers/PS1/D2-01_26.pdf
152. Swan Lake Powerhouse Roof Membrane Project [Электронный ресурс]. – South-East Alaska Power Agency, 7 July, 2015. – 21 p. – Режим доступа : <http://www.seapahydro.org/pdfs/meetings/61ac1ca3d46bbb99350c53f67634e2cf.pdf>
153. Thambirajah J. A Multivariate Approach Towards Inter-Area Oscillation Damping Estimation Under Ambient Conditions Via Independent Component Analysis And Random Decrement [Текст] / Jegatheeswaran Thambirajah, Nina F. Thornhill, Bikash C. Pal // IEEE Transactions on Power Systems. – February, 2011. – Vol. 26, Iss. 1. – P. 315–322. – ISSN 0885–8950.
154. Thomson D. J. Spectrum estimation and harmonic analysis [Электронный ресурс] / D. J. Thomson // Proceedings of the IEEE. – 1982. – Vol. 70, Iss. 9. – P. 1055–1096. – ISSN 0018–9219. – Режим доступа : http://www.mast.queensu.ca/~driegert/papers/DJT_1982-Spectrum_Estimation_and_Harmonic_Analysis.pdf
155. UCTE. Final Report – System Disturbance on 4 November 2006 [Электронный ресурс]. – 30.01.2007. – 84 p. – Режим доступа : https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/publications/ce/otherreports/Final-Report-20070130.pdf

156. UNITROL®5000. Excitation Systems for Medium and Large Synchronous Machines [Электронный ресурс]. – ABB, 2000. – 8 p. – Режим доступа : https://library.e.abb.com/public/3c500e869b7097ffc125774a0030012f/3ВНТ490300_E01_B_O.pdf

157. UNITROL®6000. Nuclear excitation systems [Электронный ресурс]. – ABB, 2015. – 10 p. – Режим доступа : <https://library.e.abb.com/public/7bec10a832a43cbb64b2f7ea8d5644c/ABB%20Excitation%20UNITROL%206000%20Nuclear%20brochure.pdf>

158. Vanfretti L. Application of Ambient Analysis Techniques for the Estimation of Electromechanical Oscillations from Measured PMU Data in Four Different Power Systems [Электронный ресурс] / Luigi Vanfretti, Luke Dosiek, John W. Pierre, Daniel Trudnowski, Joe H. Chow, Rodrigo García-Valle, Usman Aliyu // European Transactions on Electrical Power Special Issue: Power System Measurement Data and their Applications. – May, 2011. – Vol. 21, Iss. 4. – P. 1640–1656. – ISSN 2050–7038. – Режим доступа : <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:439414/FULLTEXT01.pdf>

159. Vanfretti L. Applications of Spectral Analysis Techniques for Estimating the Nordic Grid's Low Frequency Electromechanical Oscillations [Электронный ресурс] / Luigi Vanfretti, Sebastian Bengtsson, Vemund H. Aarstrand, Jan O. Gjerde // Proceedings of the 16-th IFAC Symposium on System Identification 2012, July 11–13, 2012, Brussels, Belgium. – Curran Associates, Inc., 2012. – P. 1001–1006. – ISBN 978–1–6227–6229–3. – Режим доступа : <http://ifac.papercept.net/images/sysid/SYSID12/files/0116.pdf>

160. Vanfretti L. Estimation of Electromechanical Modes in Power Systems using Synchronized Phasor Measurements and Applications for Control of Inter-Area Oscillations [Электронный ресурс] / Luigi Vanfretti. – CIGRE WG B5-14 “Wide Area Protection and Control Technologies”, 4 August, 2013. – 32 p. – Режим доступа : <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:638863/FULLTEXT01.pdf>

161. Venkatasubramanian V. Detection, Prevention and Mitigation of Cascading Events. Final Project Report [Электронный ресурс] / Mani V. Venkatasubramanian, Mladen Kezunovic, Vijay Vittal – September, 2008. – 164 p. – Режим доступа : http://pserc.wisc.edu/documents/publications/reports/2008_reports/venkatasubramanian_pserc_s-29_project_report_2008.pdf

162. Vesalainen R. K. Effects of tocolytic treatment with ritodrine on cardiovascular autonomic regulation [Электронный ресурс] / Risto K. Vesalainen, Eeva M. K. Ekholm, Thomas T. Jartti, Kari U. O. Tahvanainen, Timo J. Kaila, Risto U. Erkkola // *British Journal of Obstetrics and Gynaecology*. – March, 1999. – Vol., 106. – P. 238–243. – ISSN 1471–0528. – Режим доступа : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1471-0528.1999.tb08237.x/pdf>

163. Waagen D. E. A Combined Stochastic and Deterministic Approach for Classification Using Generalized Mixture Densities [Электронный ресурс] / Donald E. Waagen, John R. McDonnell // *Proceedings of the Fourth Annual Conference on Evolutionary Programming*, 1–3 March, 1995, San Diego, California, USA. – The MIT Press, 1995. – P. 159–174. – ISBN 978–0–2621–3317–3. – Режим доступа : <https://www.uploadable.ch/file/6UBMCpW55fmB/t7qpp.Evolutionary.Programming.IV.Proceedings.of.the.Fourth.Annual.Conference.on.Evolutionary.Programming.pdf>

164. Wallace C. S. An information measure for classification [Электронный ресурс] / C. S. Wallace, D. M. Boulton // *Computer Journal*. – August, 1968. – Vol. 11, No. 2 – P. 185–194. – Режим доступа : <http://comjnl.oxfordjournals.org/content/11/2/185.full.pdf>

165. Wang H. Generation Unit Correlativity-Based Prony Analysis on Multi-Signal Classification of Low-Frequency Oscillation [Электронный ресурс] / Hui Wang, Xiaolin Su // *Power System Technology*. – June, 2011. – Vol. 35, No. 6 – P. 128–133. – ISSN 1000–3673. – Режим доступа : <http://www.dwjs.com.cn/CN/article/downloadArticleFile.do?attachType=PDF&id=23845>

166. Wang Xi-Fan. *Modern Power Systems Analysis* / Xi-Fan Wang, Yonghua Song, Malcolm Irving // New York: Springer Science & Business Media. – 2010. – 561 p. – ISBN 978–0–387–72852–0.

167. Weekes Tony. MB Hydro Experiences with Synchrophasor Implementations. Presentation [Электронный ресурс] / Tony Weekes, Husam Al Hadidi, Brian Archer. – 44 p. – Режим доступа : https://www.smartgrid.gov/files/MB_Hydro_Experiences_with_Synchrophasor_Implementations_20min_version.pptx

168. Wen B.-J. A New Method for Visual Real-Time Monitoring of Low Frequency Oscillation [Электронный ресурс] / Bo-Jian Wen, Shi-Ming Li, Chong-Wen Zhou, Jun Luo, Fang-Zong Wang // *Smart Grid and Renewable Energy*. – June, 2015. – No. 6. – P. 59–66. – ISSN 2151–4844. – Режим доступа : <http://www.scirp.org/journal/PaperDownload.aspx?paperID=55919>

169. Xiaopeng L. A Novel Fault Location Method Using Traveling Wave Natural Frequencies for Transmission Grid [Текст] / Li Xiaopeng, He Zhengyou, Xia Lulu // Proceedings of the 4-th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT 2011), 6-9 July, 2011, Weihai, China. – Curran Associates, Inc., 2011. – P. 209–212. – ISBN 978-1-4577-0364-5.

170. Xie G. Parameter Identification of Wind Power System Low Frequency Oscillation Based on Matrix Pencil Algorithm and Stabilization Diagram [Электронный ресурс] / Guoqiang Xie, Benren Pan, Lixia Xiong, Jin Zou, Kansheng Yu // Proceedings of the 5-th International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling (KAM 2015), June 27–28, 2015, London, UK. – Atlantic Press, 2015. – P. 25–28. – ISBN 978-94-62520-87-5. – Режим доступа : http://www.atlantispress.com/php/download_paper.php?id=25418

171. Yan J. Improved Hilbert–Huang transform based weak signal detection methodology and its application on incipient fault diagnosis and ECG signal analysis [Текст] / Jihong Yan, Lei Lu // Signal Processing. – May, 2014. – Vol. 98. – P. 74–87. – ISSN 0165-1684.

172. Yang G. Study on Ways to Restrain End Effect of Hilbert-Huang Transform [Электронный ресурс] / Guang Yang, Xiang-Bin Sun, Ming-Xi Zhang, Xiao-Li Li, Xin-Rong Liu // Journal of Computers. – October, 2014. – Vol. 25, No. 3. – P. 22–31. – ISSN 1991-1599. – Режим доступа : <http://www.csroc.org.tw/journal/JOC25-3/JOC25-3-3.pdf>

173. Yang J.-Zh. A Hybrid Method for the Estimation of Power System Low-Frequency Oscillation Parameters [Текст] / Jun-Zhe Yang, Chih-Wen Liu, Wen-Giang Wu // IEEE Transactions on Power Systems. – November, 2007. – Vol. 22, No. 4. – P. 2115–2123. – ISSN 0885-8950.

174. Zhang L. Bulk Power System Low Frequency Oscillation Suppression By FACTS/ESS [Текст] / Li Zhang, Y. Liu Michael R. Ingram, Dale T. Bradshaw, Steve Eckroad, Mariesa L. Crow // Proceedings of the 2004 IEEE Power Systems Conference and Exposition (PES 2004), 10–13 October, 2004, New York, NY, USA. – IEEE, 2004. – Vol. 1. – P. 219–226. – ISBN 0-7803-8718-X.

175. Zhang L. Power System Reliability and Transfer Capability Improvement by VSCHVDC (HVDC Light©) [Электронный ресурс] / Lidong Zhang, Lennart Harnefors, Pablo Rey // CIGRÉ Regional Meeting “Security and Reliability of Electric Power Systems”, 18–20 June, 2007, Tallinn, Estonia. – 7 p. – Режим доступа : <https://library.e.abb.com/public/158b677a7b207f5bc125731d00477d6a/Power%20system%20reliability%20and%20transfer%20capability%20improvement%20by%20VSC%20-%20HVDC%20Light.pdf>

Додаток А

Параметри моделі чотиримашинної тестової схеми ЕС

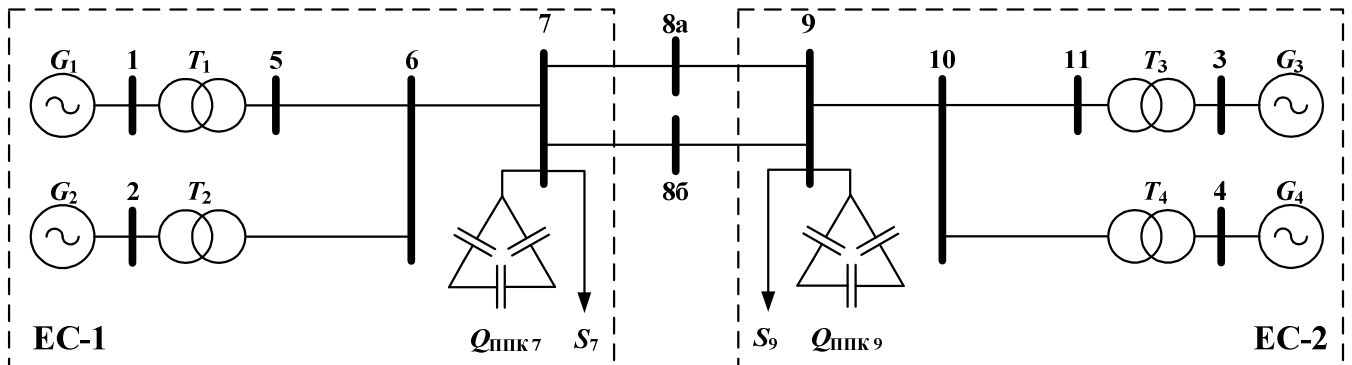


Рисунок А.1 – Тестова чотиримашинна схема (ТС-I)

Таблиця А.1 – Параметри синхронних генераторів ТС-I

СГ	S_n , МВ А	U_n , кВ	x_d , в.о.	x_q , в.о.	x_l , в.о.	x_d' , в.о.	x_q' , в.о.	x_d'' , в.о.	x_q'' , в.о.	R_a , в.о.	T'_{d0} , с	T'_{q0} , с	T''_{d0} , с	T''_{q0} , с	A_{Sat} , в.о.	B_{Sat} , в.о.	Ψ_{T1} , в.о.	K_D	H , с
G_1	900	20	1,8	1,7	0,2	0,3	0,55	0,25	0,25	0,0025	8,00	0,40	0,03	0,05	0,015	9,6	0,9	0	6,500
G_2																			6,500
G_3																			6,175
G_4																			6,175

Таблиця А.2 – Параметри ЛЕП ТС-I

Ділянка ЛЕП	L , км	U_6 , кВ	S_6 , МВ А	r_0 , в.о.	x_0 , в.о.	b_0 , в.о.
5–6	25	230	100	0,0001	0,001	0,00175
6–7	10					
7–8a	110					
7–8б	110					
8a–9	110					
8б–9	110					
9–10	10					
10–11	25					

Таблиця А.3 – Параметри трансформаторів ТС-I

Трансформатор	$U_{вн}$, кВ	$U_{нн}$, кВ	S_n , МВ А	R , в.о.	X , в.о.
$T_1 - T_4$	230	20	900	0	0,15

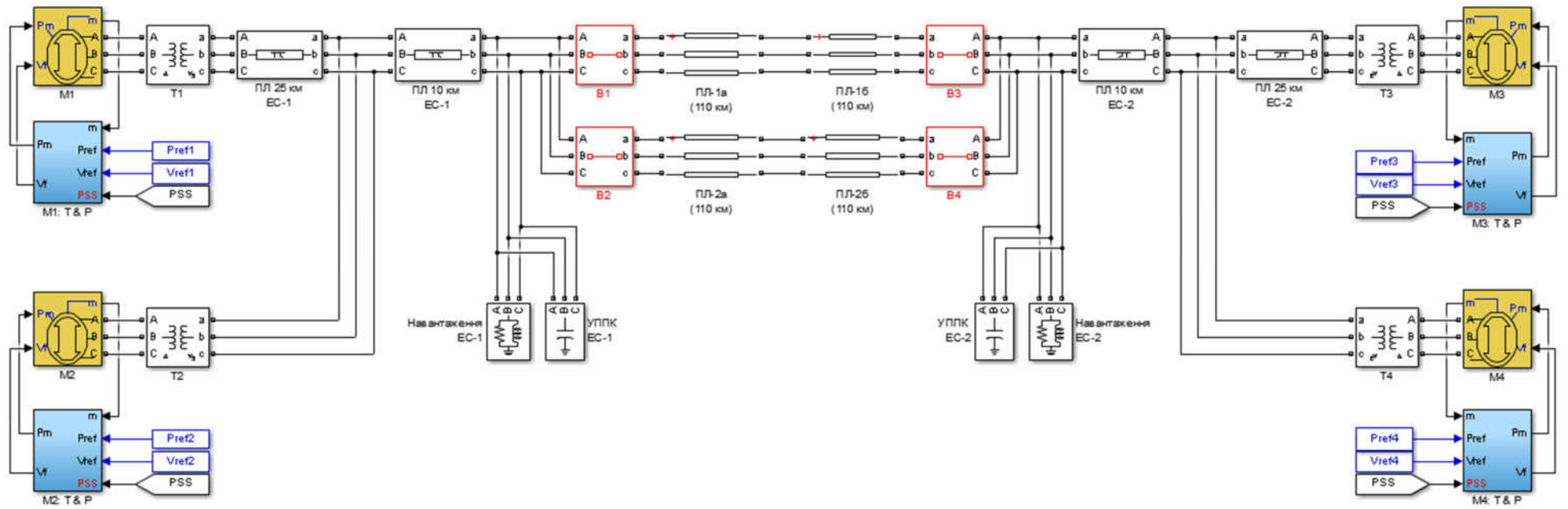


Рисунок А.2 – Модель ТС-I у середовищі “Matlab”

Таблиця А.4 – Навантаження синхронних генераторів ТС-І

СГ	G_1	G_2	G_3	G_4
$P, \text{ МВт}$	700	700	719	700

Таблиця А.5 – Навантаження та потужності засобів ППК пунктів ТС-І

Номер пункту	$S, \text{ МВ А}$	$Q_{\text{ППК}}, \text{ МВ Ар}$
7	$967-j100$	387
9	$1767-j100$	537

Додаток Б

Параметри моделі шестимашинної тестової схеми ЕС

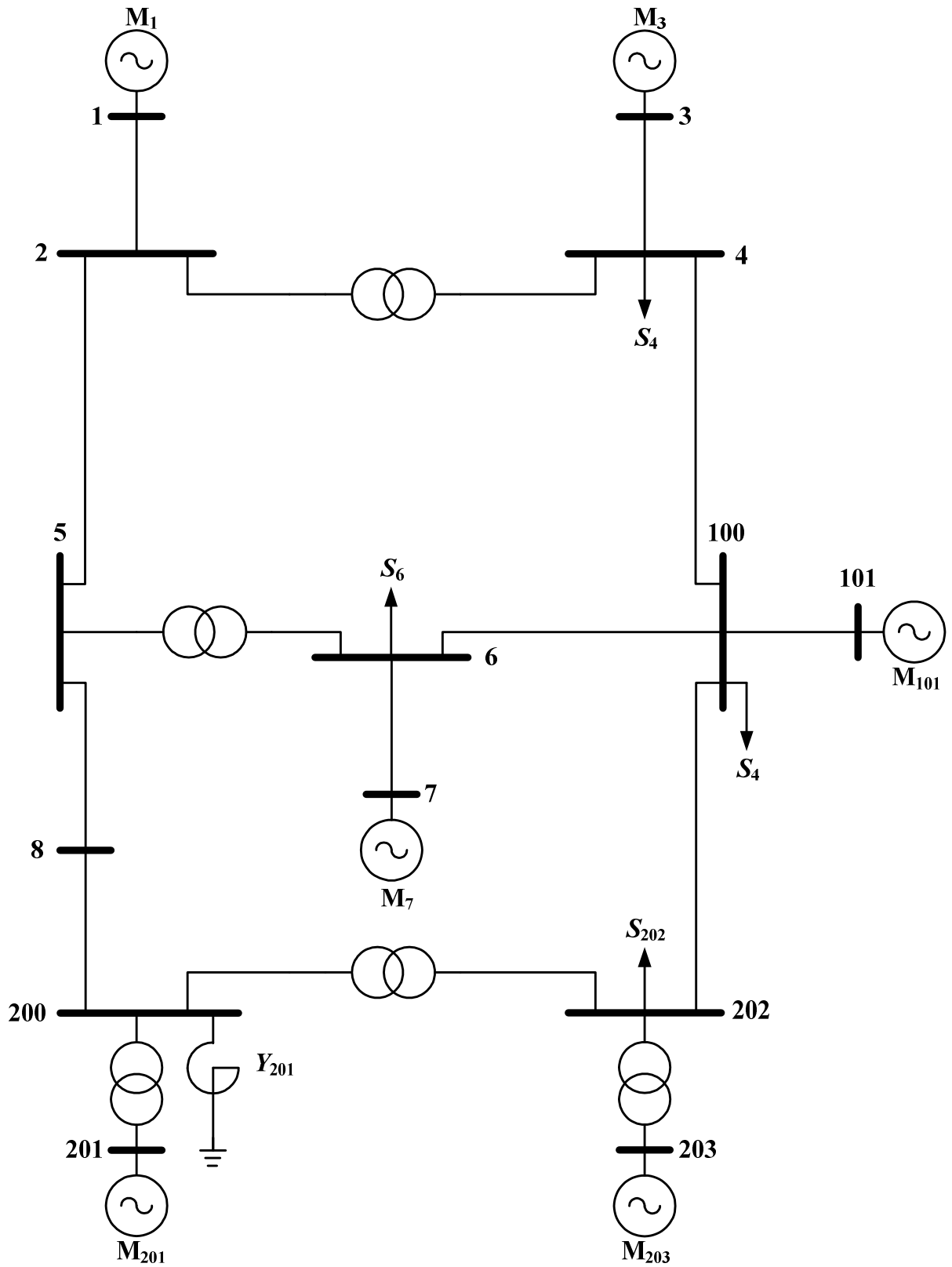


Рисунок Б.1 – Тестова шестимашинна схема (ТС-II)

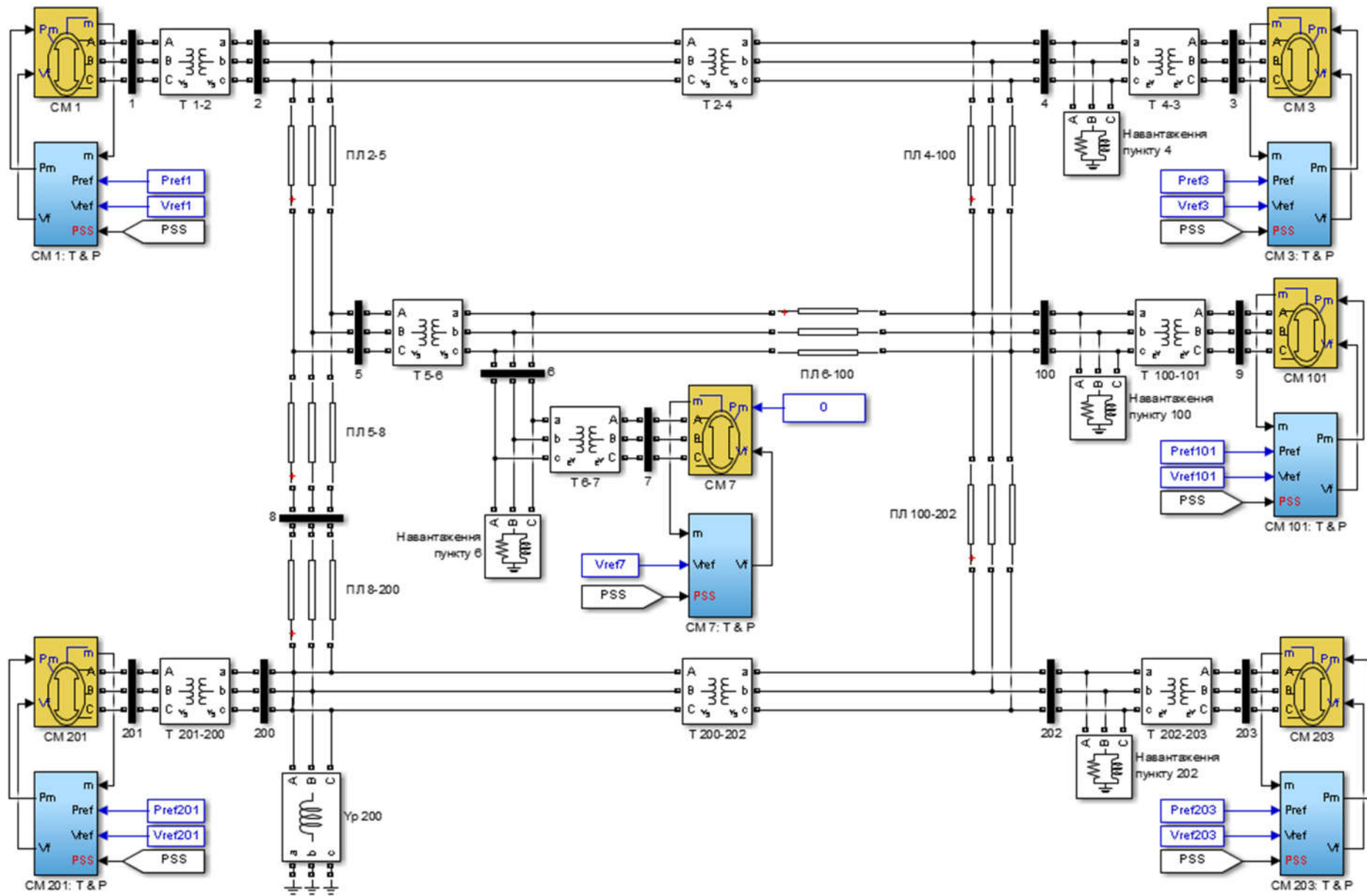


Рисунок Б.2 – Модель ТС-II у середовищі “Matlab”

Таблиця Б.1 – Параметри синхронних машин ТС-II

Номер СМ	S_n , МВ А	U_n , кВ	$\cos\varphi_n$	x_d , Ом	x_q , Ом	x_d' , Ом	T_{d0} , с	T_j , с
1	470,59	525	0,85	1102,49	1102,49	161,27	6,38	7,0
3	470,59	242	0,85	234,26	234,26	34,27	6,38	7,0
7	320,00	230	0,01	222,45	222,45	74,26	8,50	2,8
101	2117,65	242	0,85	20,24	20,24	9,79	8,50	10,8
201	1411,76	20	0,85	0,48	0,48	0,07	5,90	6,4
203	1411,76	20	0,85	0,48	0,48	0,07	5,90	6,4

Таблиця Б.2 – Параметри трансформаторів ТС-II

Трансформатор	$U_{вн}$, кВ	$U_{нн}$, кВ	R , в.о.	X , в.о.
2-4	525	242	0	31,20
5-6	525	242	0	3,32
200-201	525	20	0	21,50
200-202	525	242	0	15,60
202-203	242	20	0	4,00

Таблиця Б.3 – Параметри ЛЕП ТС-II

Ділянка ЛЕП	R , Ом	X , Ом	Y , мкСм
1-2	0	43,00	0
2-5	4,65	44,90	560
3-4	0	12,80	0
4-100	8,00	60,00	752
5-8	6,71	90,00	1155
6-100	2,66	25,40	2775
7-6	0	4,52	0
8-200	6,71	90,00	1155
100-101	0	3,20	0
100-202	6,50	41,00	4480

Таблиця Б.4 – Навантаження синхронних машин ТС-II

Номер СМ	1	3	7	101	201	203
P , МВт	400	400	0	без обмежень	1200	1200
Q , МВ Ар	без обмежень	без обмежень	без обмежень	без обмежень	без обмежень	без обмежень

Таблиця Б.5 – Навантаження пунктів ТС-II

Номер пункту	4	6	100	200
P , МВт	1000	1100	2000	500
Q , МВ Ар	-100	-300	-600	-200

Таблиця Б.6 – Коефіцієнти регулювання АРЗ СД синхронних машин ТС-II

Номер СМ	K_{0U}	K_{1U}	$K_{0\omega}$	$K_{1\omega}$
1	-200	-7,104	0,0328	0,3094
3	-200	-7,362	0,4556	0,2500
7	-200	-7,104	1,9600	0,2500
101	-200	-11,201	1,9600	0,2500
201	-200	-11,400	0,1600	0,0307
203	-200	-11,703	0,0207	0,1600

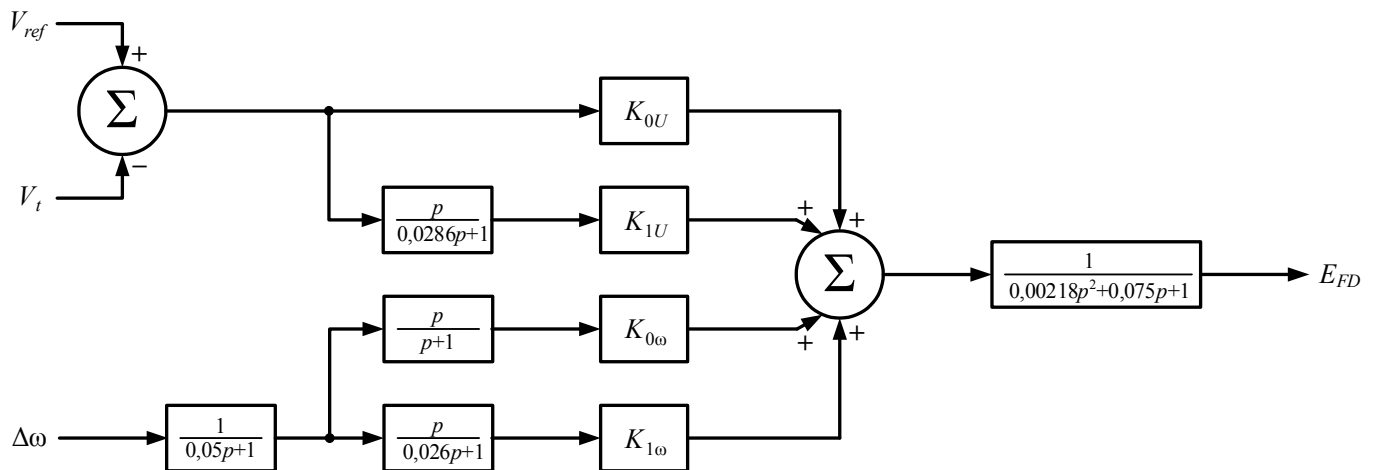


Рисунок Б.3 – Схема АРЗ СД синхронних машин ТС-II

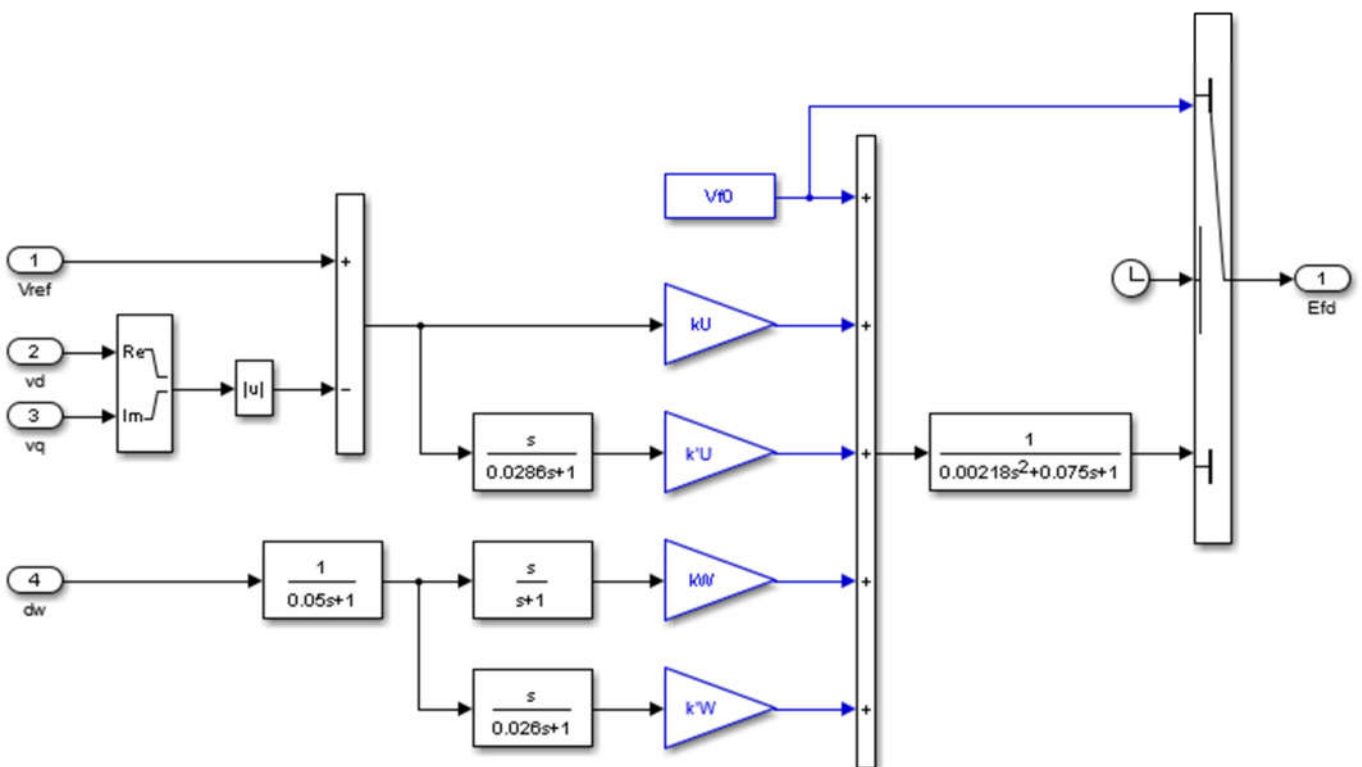


Рисунок Б.4 – Модель АРЗ СД СМ у середовищі “Matlab”

Додаток В

Моделі деяких типів AVR САКЗ СМ у середовищі “Matlab” та їхні параметри

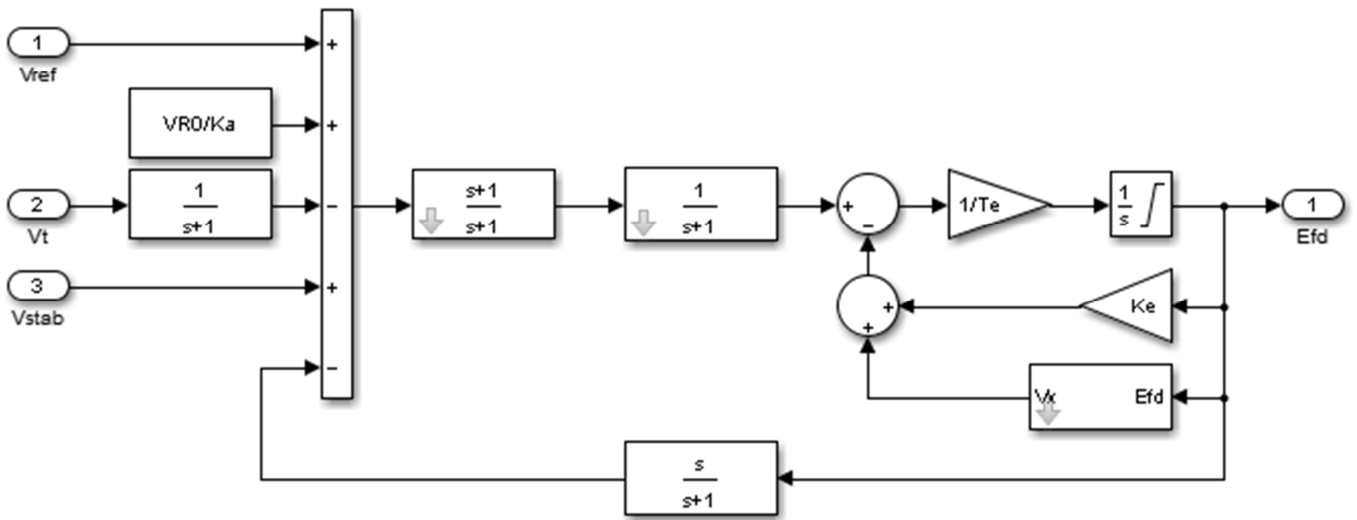


Рисунок В.1 – Модель AVR типу DC1A в середовищі “Matlab”

Таблиця В.1 – Параметри для AVR типу DC1A

Параметр	E_{FD1}	E_{FD2}	K_A	K_E	K_F	T_A	T_B	T_C	T_E	T_F	$S_E[E_{FD1}]$	$S_E[E_{FD2}]$	V_{RMAX}	V_{RMIN}
Значення	3,1	2,3	46	обчисл.	0,1	0,06	0	0	0,46	1,0	0,33	0,10	1,0	-0,9

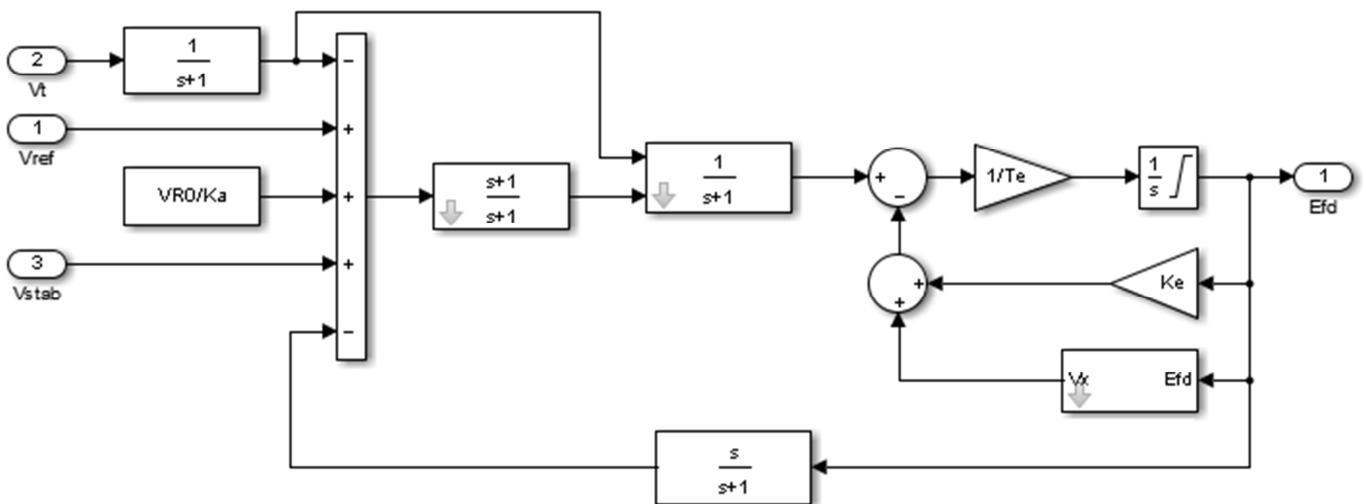


Рисунок В.2 – Модель AVR типу DC2A в середовищі “Matlab”

Таблиця В.2 – Параметри для AVR типу DC2A

Параметр	E_{FD1}	E_{FD2}	K_A	K_E	K_F	T_A	T_B	T_C	T_E	T_F	$S_E[E_{FD1}]$	$S_E[E_{FD2}]$	V_{RMAX}	V_{RMIN}
Значення	3,05	2,29	300	1,0	0,1	0,01	0	0	1,33	0,675	0,279	0,117	4,95	-4,90

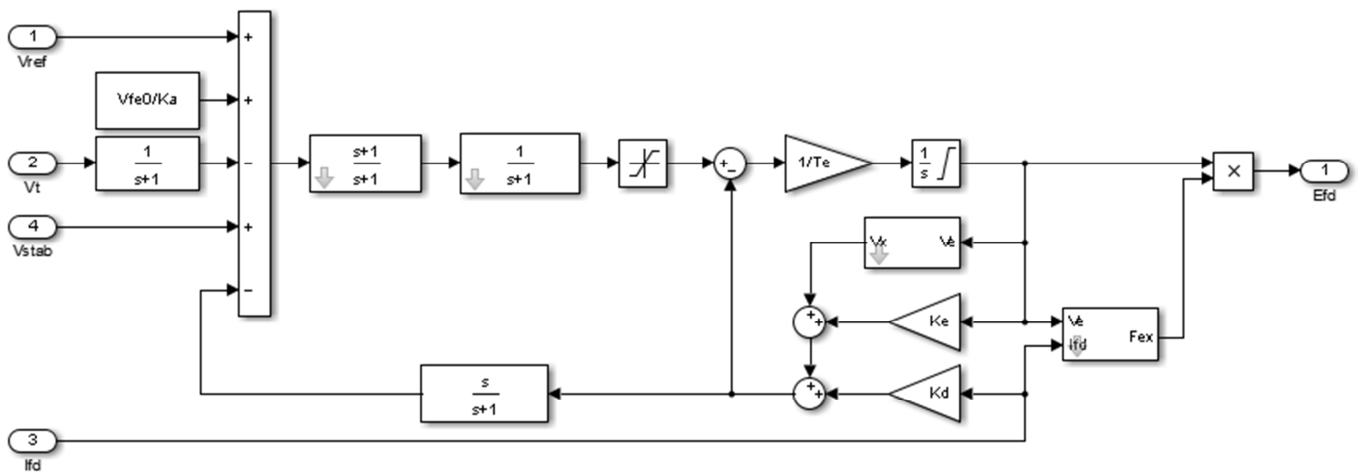


Рисунок В.3 – Модель AVR типу AC1A в середовищі “Matlab”

Таблиця В.3 – Параметри для AVR типу AC1A

Параметр	K_A	K_C	K_D	K_E	K_F	R_C	T_A	T_B	T_C	T_E	T_F
Значення	400	0,20	0,38	1,0	0,03	0	0,02	0	0	0,80	1,0

Параметр	T_R	$S_E[V_{E1}]$	$S_E[V_{E2}]$	V_{AMAX}	V_{AMIN}	V_{E1}	V_{E2}	V_{RMAX}	V_{RMIN}	X_C
Значення	0,02	0,10	0,03	14,5	-14,5	4,18	3,14	6,03	-5,43	0

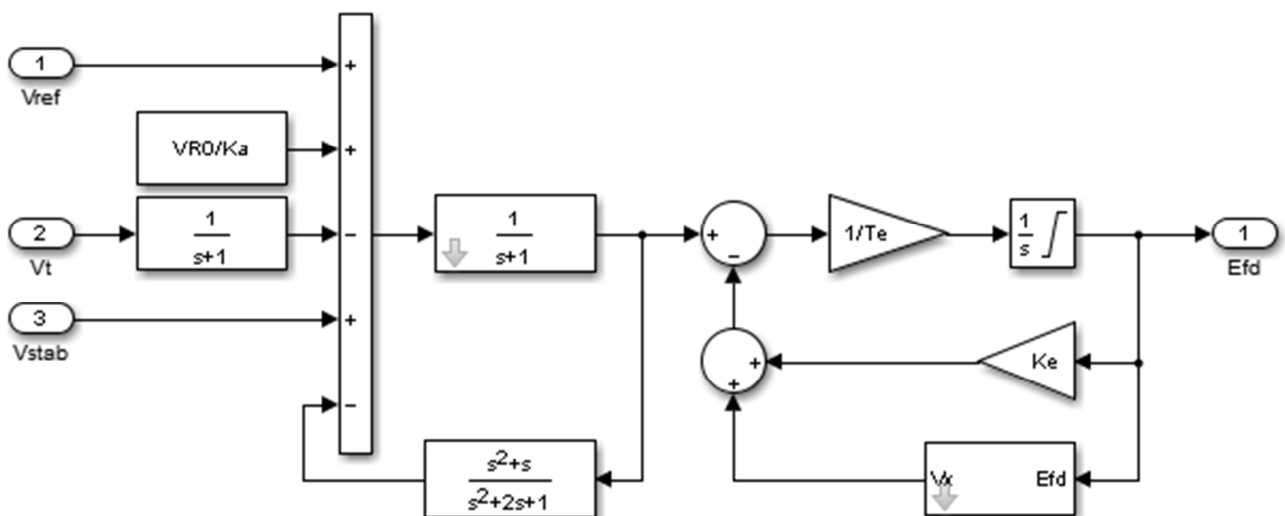


Рисунок В.4 – Модель AVR типу AC5A в середовищі “Matlab”

Таблиця В.4 – Параметри для AVR типу AC5A

Параметр	E_{FD1}	E_{FD2}	K_A	K_E	K_F	R_C	T_A	T_E	T_{F1}
Значення	5,6	$0,75 E_{FD1}$	400	1,0	0,03	0	0,02	0,8	1,0
Параметр	T_{F2}	T_{F3}	T_R	$S_E[E_{FD1}]$	$S_E[E_{FD2}]$	V_{RMAX}	V_{RMIN}	X_C	
Значення	0	0	0	0,86	0,5	7,3	-7,3	0	

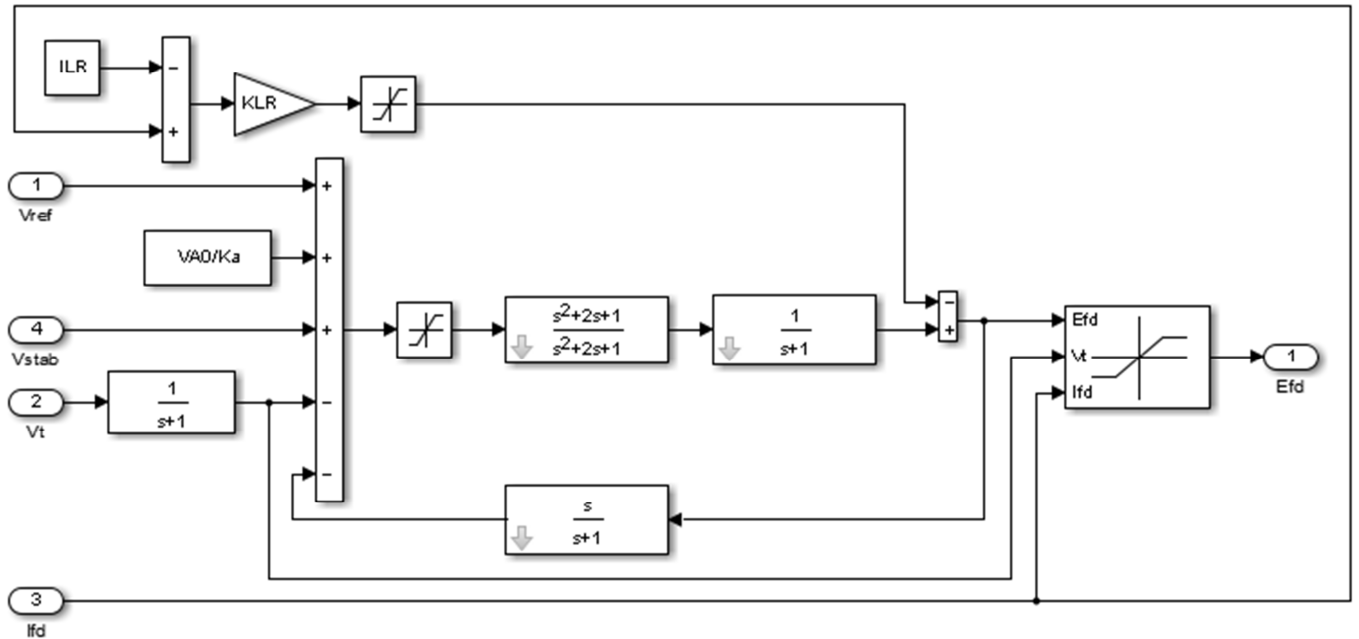


Рисунок В.5 – Модель AVR типу ST1A в середовищі “Matlab”

Таблиця В.5 – Параметри для AVR типу ST1A

Параметр	I_{LR}	K_A	K_C	K_F	K_{LR}	R_C	T_A	T_B
Значення	0	190	0,08	0	0	0	0	10,0
Параметр	T_{B1}	T_C	T_{C1}	T_F	T_R	V_{RMAX}	V_{RMIN}	X_C
Значення	0	1,0	0	1	0,04	7,80	-6,70	0

Таблиця В.6 – Параметри для AVR типу ST2A

Параметр	E_{FDMAX}	K_A	K_C	K_E	K_F	K_I	K_P
Значення	$2,75 x_d$	120	1,82	1,0	0,05	8,0	4,88
Параметр	T_A	T_E	T_F	T_R	V_{RMAX}	V_{RMIN}	
Значення	0,15	0,5	1,0	0	1,0	0,0	

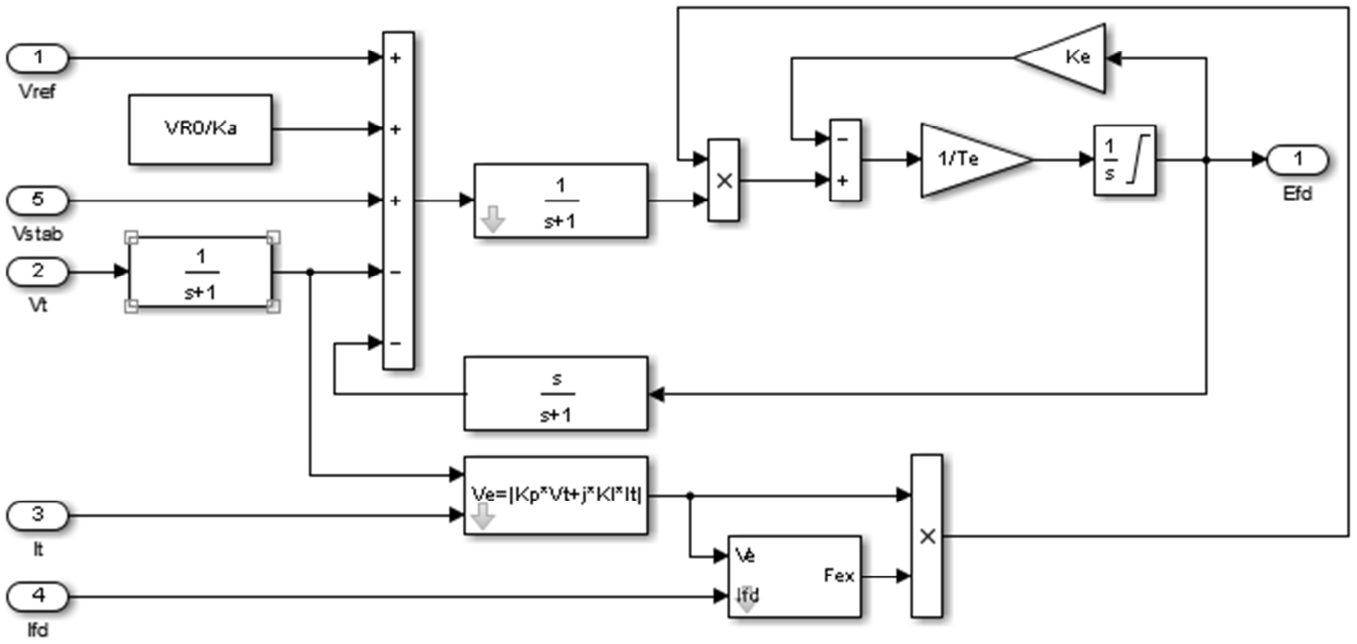


Рисунок В.6 – Модель AVR типу ST2A в середовищі “Matlab”

Додаток Г

Моделі деяких типів PSS у середовищі “Matlab” та їхні параметри

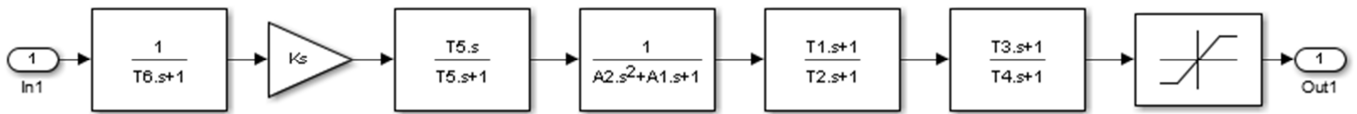


Рисунок Г.1 – Модель PSS типу PSS1A в середовищі “Matlab”

Таблиця Г.1 – Параметри для PSS типу PSS1A

Тип СЗ	Параметри									
	K_S	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	V_{STMAX}	V_{STMIN}	Вхідний сигнал
DC1A	3,15	0,76	0,10	0,76	0,10	10,00	0,00	0,09	-0,09	ω
DC2A	1,40	0,50	0,06	0,50	0,06	30,0	0,016	0,05	-0,05	ω
ST1A	16,70	0,15	0,03	0,15	0,03	1,65	0,00	0,10	-0,066	$\Delta\omega$

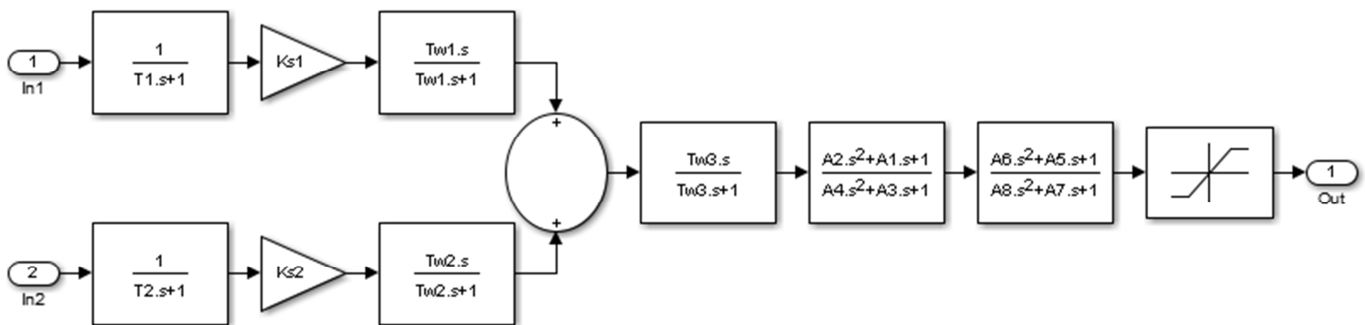


Рисунок Г.2 – Модель PSS типу PSS3B в середовищі “Matlab”

Таблиця Г.2 – Параметри для PSS типу PSS3B

Параметр	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	K_{S1}
Значення	0,359	0,586	0,429	0,564	0,001	0,000	0,031	0,000	-0,602
Параметр	K_{S2}	T_1	T_2	T_{W1}	T_{W2}	T_{W3}	V_{STMAX}	V_{STMIN}	Вх. сигн.
Значення	30,120	0,012	0,012	0,300	0,300	0,600	0,100	-0,100	$\Delta\omega; P_e$

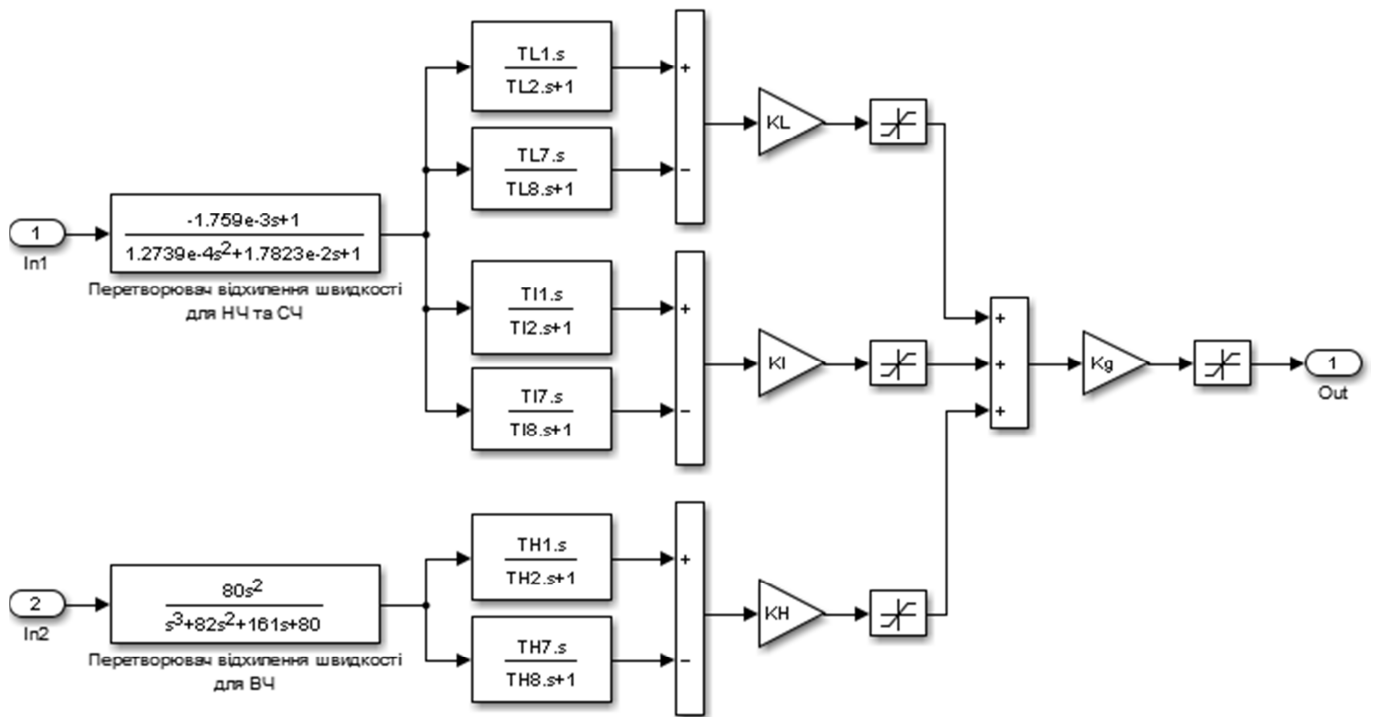


Рисунок Г.3 – Спрощена модель PSS типу PSS4B у середовищі “Matlab”

Таблиця Г.3 – Параметри для PSS типу PSS4B (спрощена модель)

Параметр	F_H	F_L	F_L	K_H	K_I	K_L
Значення	8,00	0,70	0,07	120,0	30,0	7,5

Решту параметрів спрощеної моделі PSS типу PPS4B згідно з [72] визначають так:

$$K_{L1} = K_{L2} = \frac{R^2 + R}{(R - 1)^2},$$

$$T_{L2} = T_{L7} = \frac{1}{2\pi F_L \sqrt{R}},$$

$$T_{L1} = T_{L2} / R,$$

$$T_{L8} = T_{L7} R,$$

де R – константа, яка становить 1,2.

Параметри K_{H1} , K_{H2} , K_{I1} , K_{I2} , T_{H1} , T_{H2} , T_{H7} , T_{H8} , T_{I1} , T_{I2} , T_{I7} , T_{I8} розраховують за аналогічними виразами.

Додаток Д
Тестові та зареєстровані сигнали

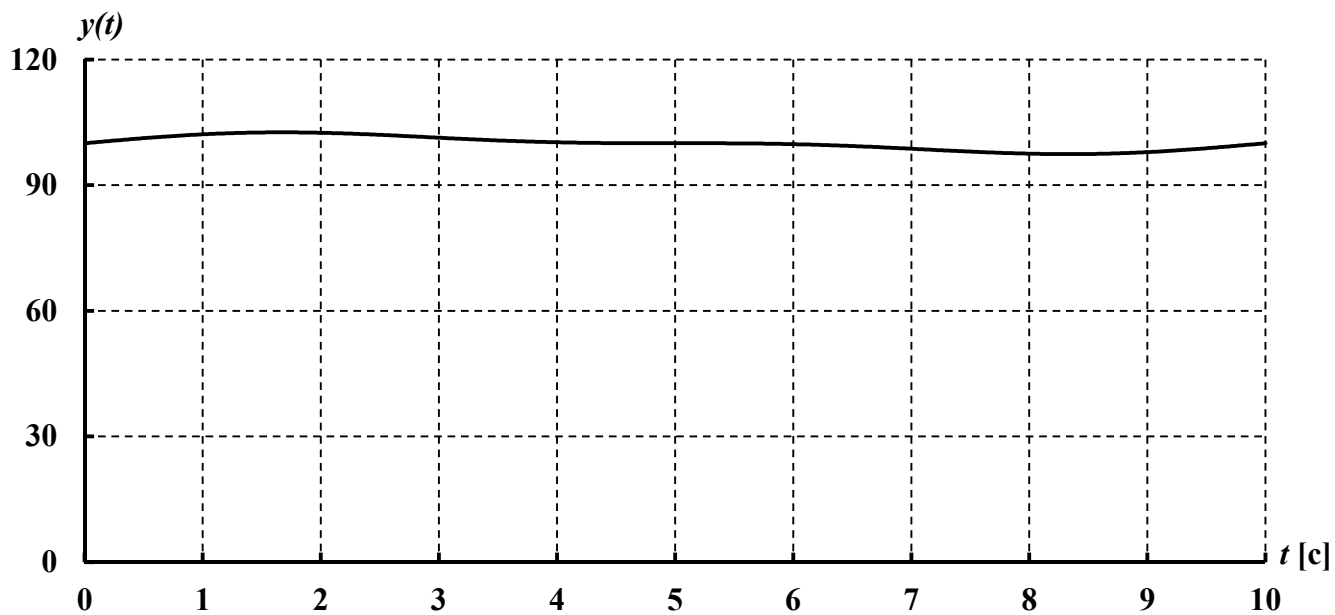


Рисунок Д.1 – Фрагмент графіка ТСГ-1 ($y(t) = 100 + 2\sin(2\pi \cdot 0.1t) + 1\sin(2\pi \cdot 0.2t)$)

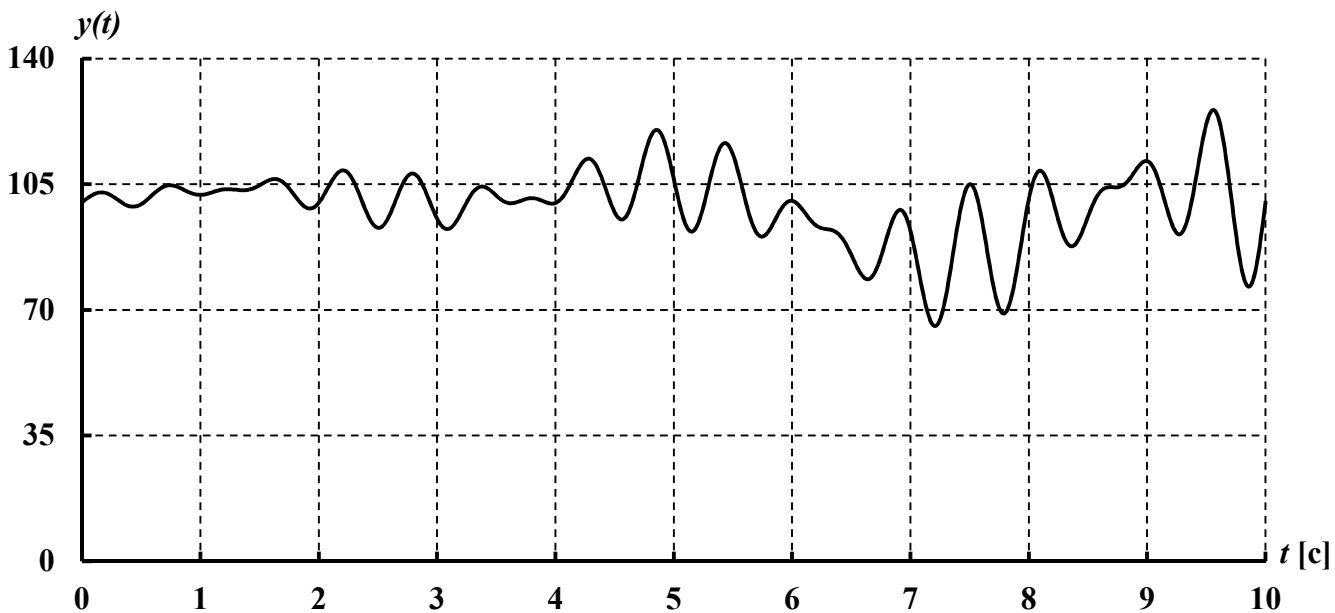


Рисунок Д.2 – Фрагмент графіка ТСГ-2

$$y(t) = 100 + (1+t) \sin(2\pi \cdot 0,1t) + (1+1,1t) \sin(2\pi \cdot 0,15t) + (1+1,3t) \sin(2\pi \cdot 1,5t) + (1+1,1t) \sin(2\pi \cdot 1,9t)$$

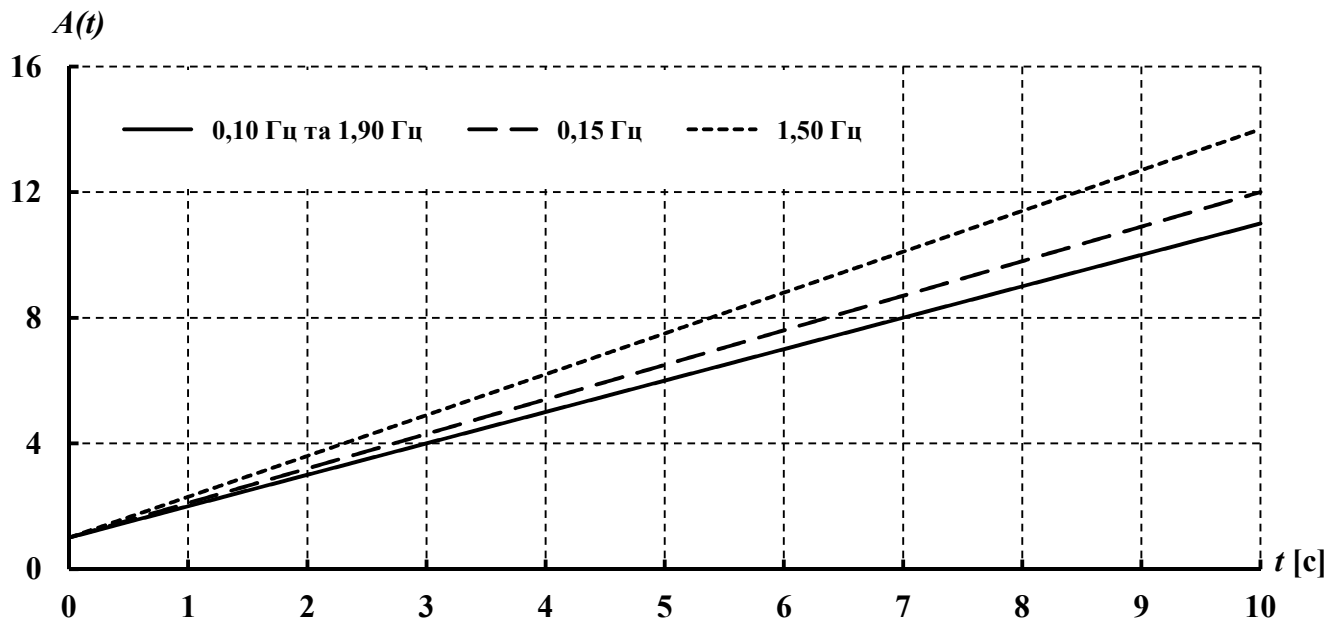
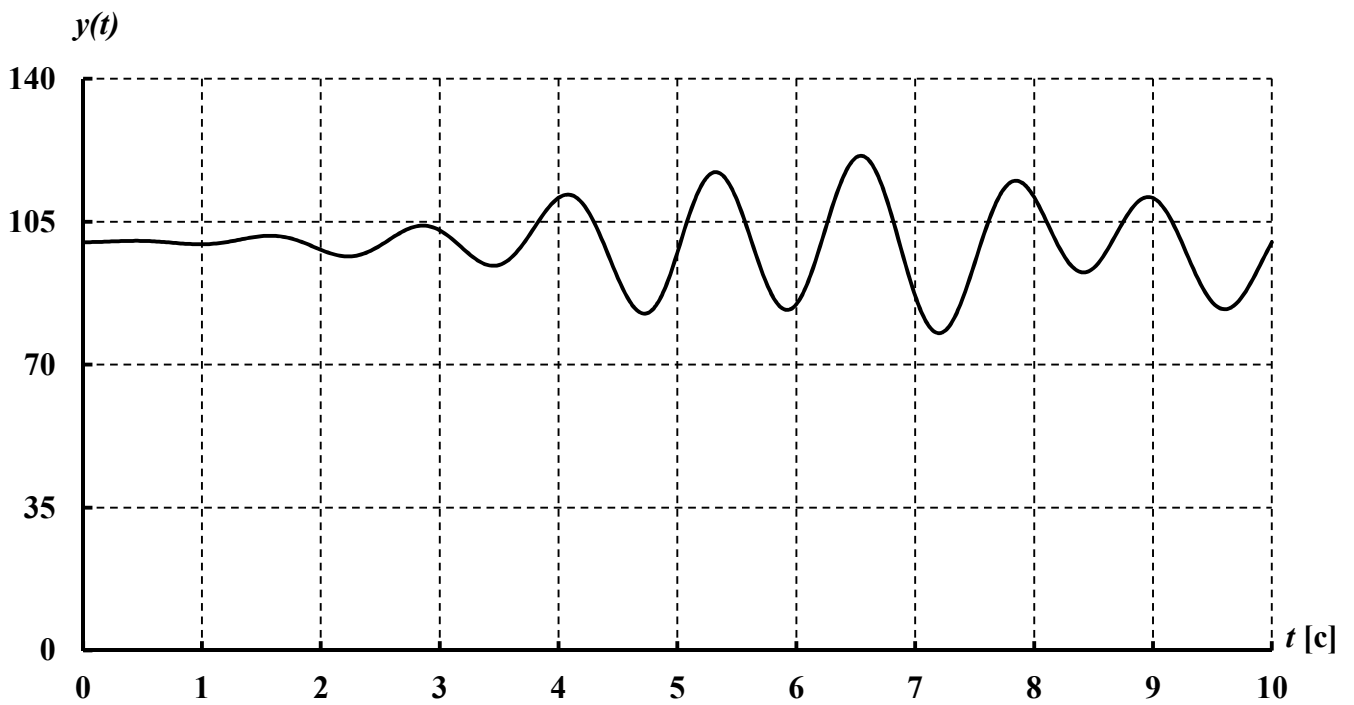


Рисунок Д.3 – Фрагменти графіків зміни з часом амплітуд компонентів ТСГ-2

Рисунок Д.4 – Графік ТСГ-3 $y(t)=100+A_1(t) \sin(2\pi t (0,30+0,01t))+A_2(t) \sin(2\pi 0,80t)$

$$A_1(t) = \exp(0,25t) - 1, \quad t = [0;10]c; \quad A_2(t) = \begin{cases} \exp(0,60t) - 1, & \text{якщо } t = [0;5]c; \\ \exp(0,60 \cdot 5) - 1, & \text{якщо } t = (5;6)c; \\ \exp(0,60 \cdot 5) - \exp(0,70t), & \text{якщо } t = [6;10]c. \end{cases}$$

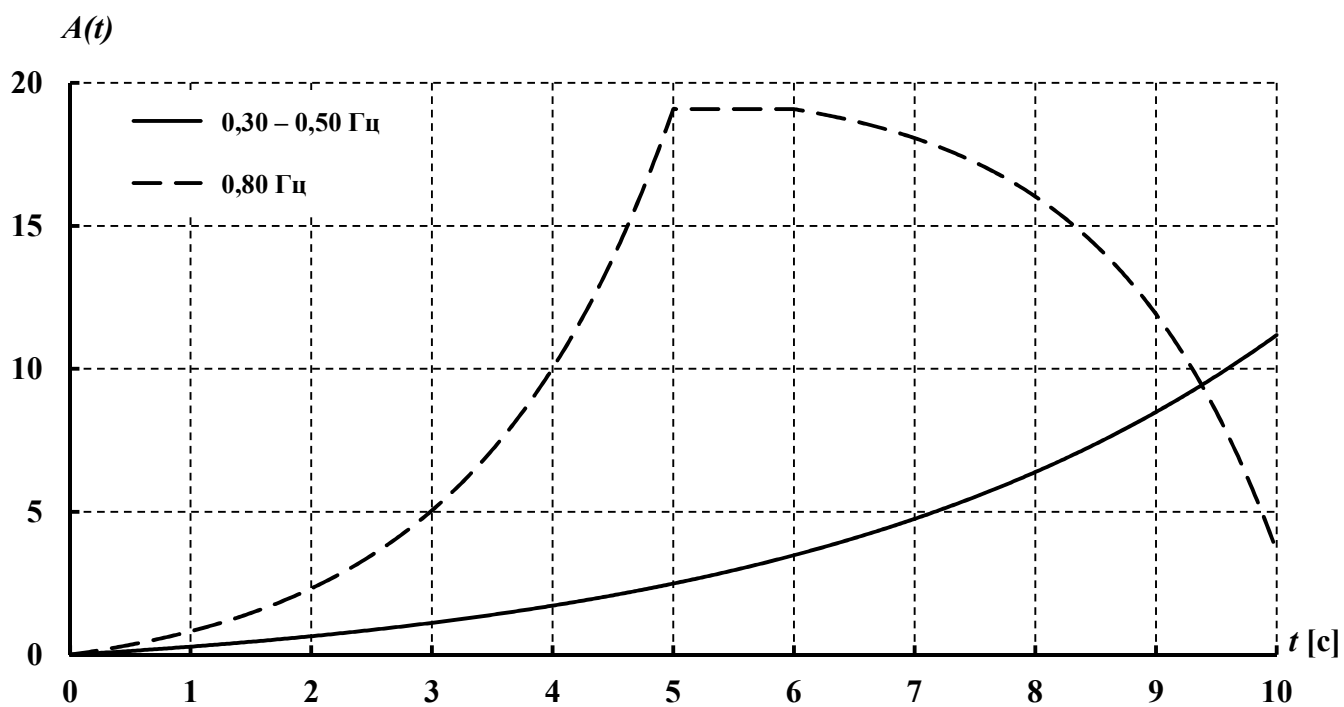


Рисунок Д.5 – Графік зміни з часом амплітуд компонентів ТСГ-3

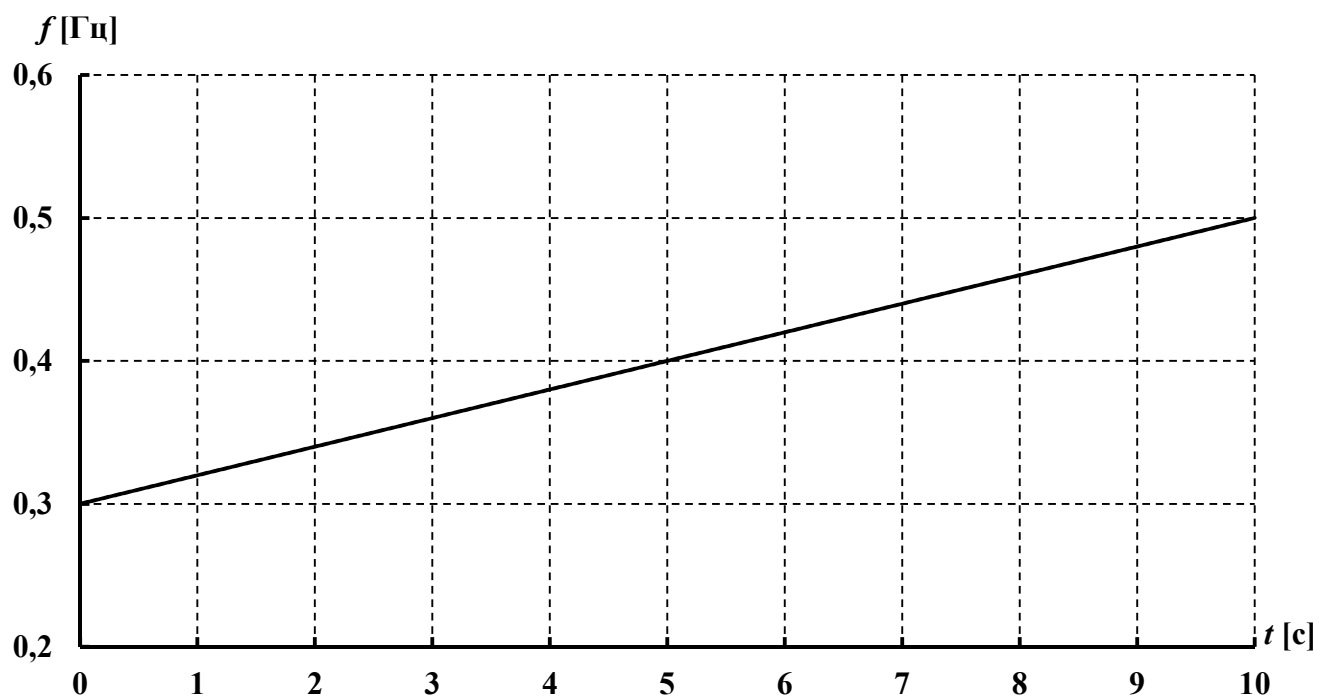


Рисунок Д.6 – Графік зміни з часом частоти першого компонента ТСГ-3

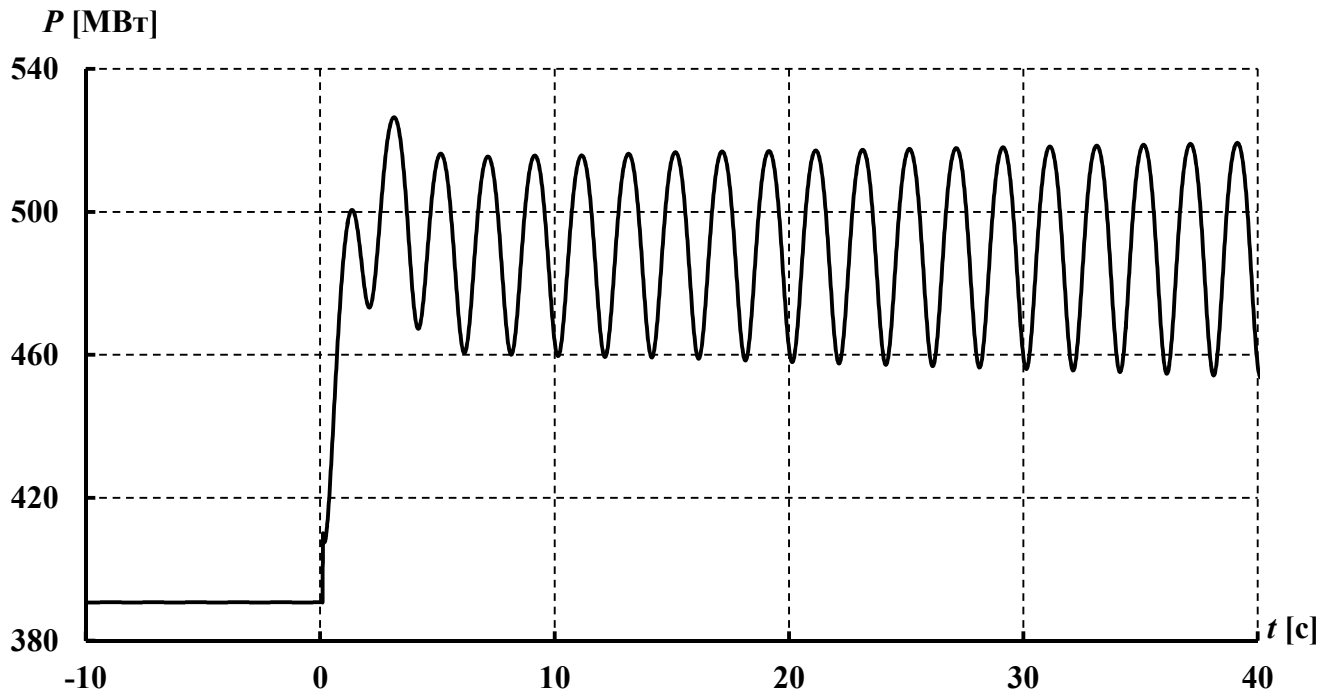


Рисунок Д.7 – Графік ТСГ-4

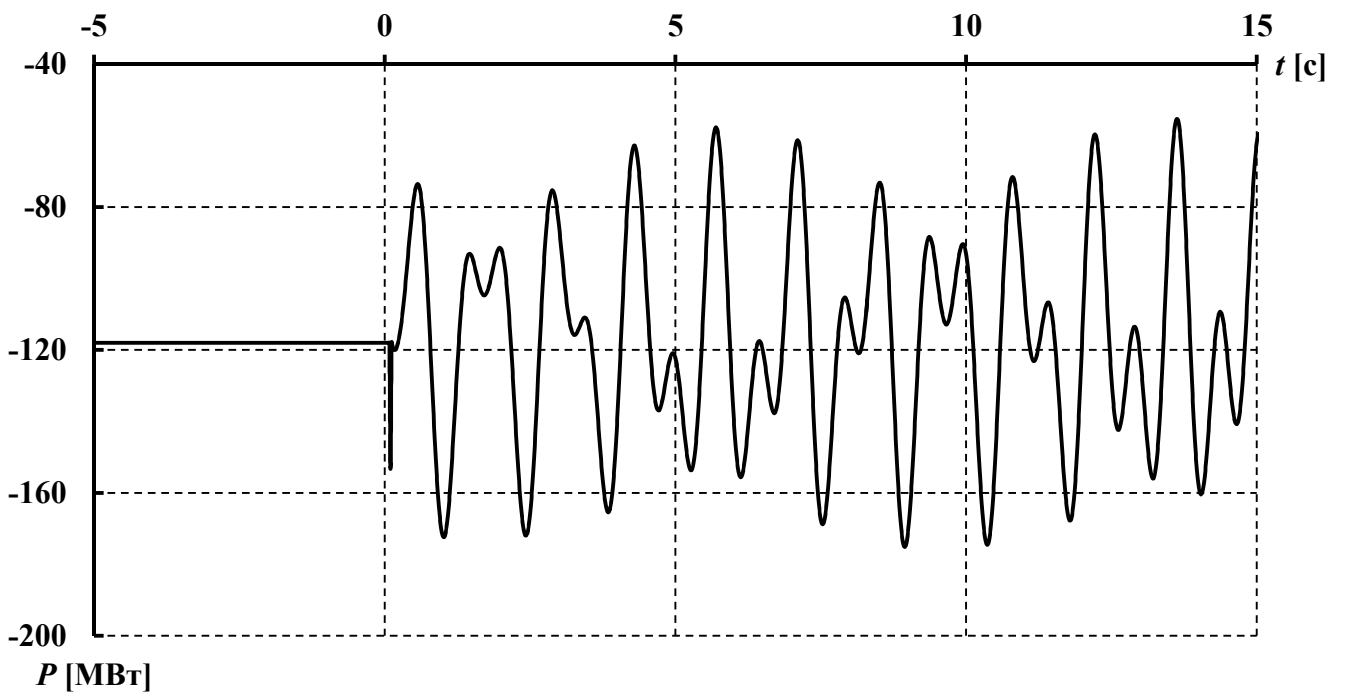


Рисунок Д.8 – Графік ТСГ-5

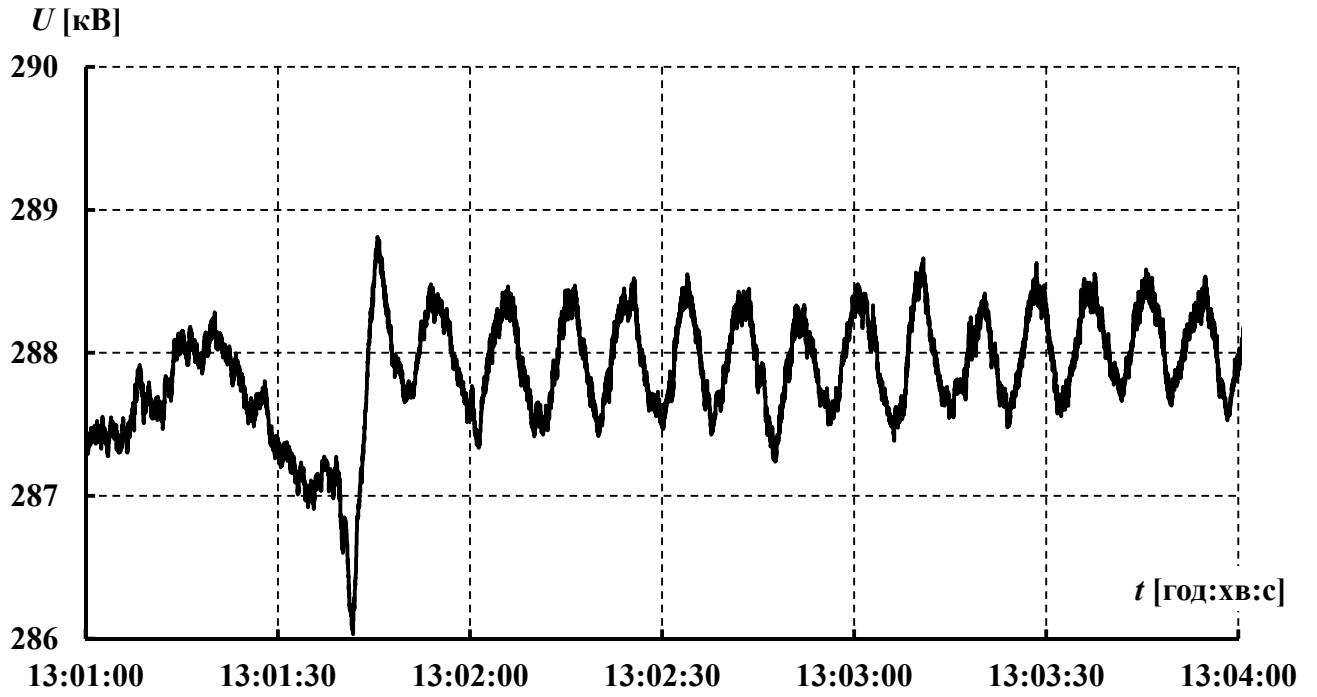


Рисунок Д.9 – Графік ЗСГ-1

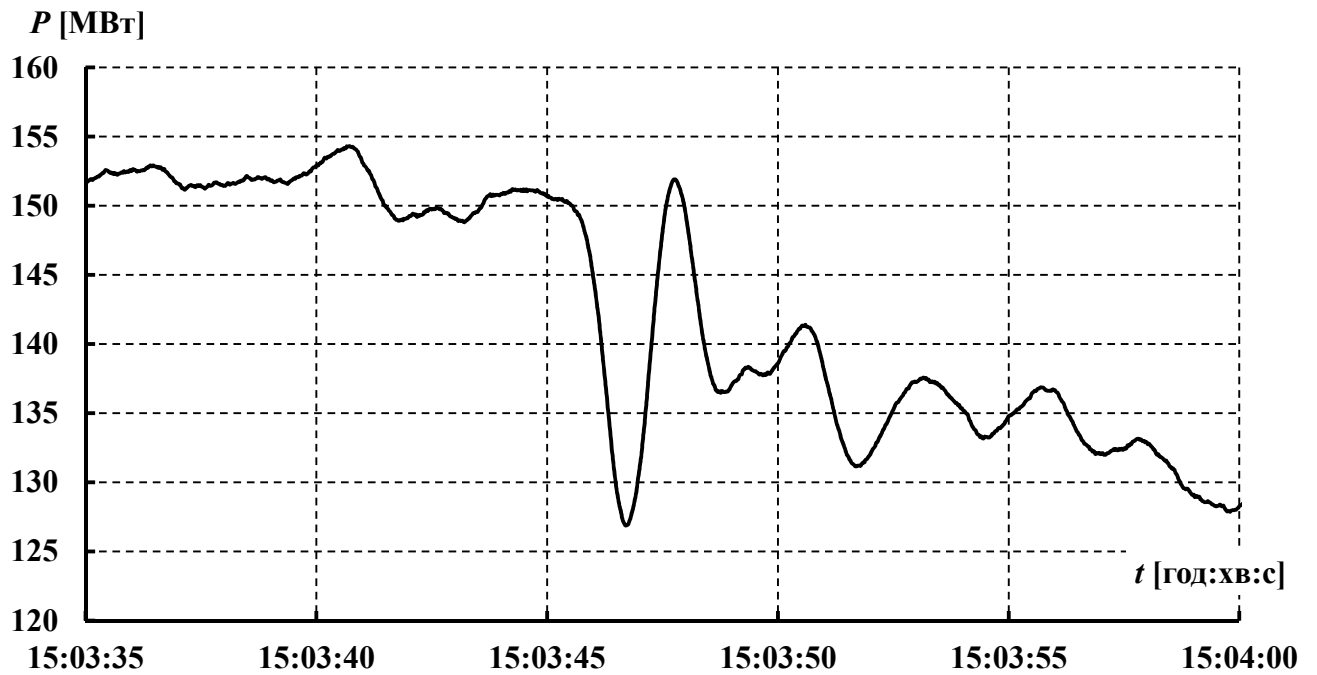


Рисунок Д.10 – Графік ЗСГ-2

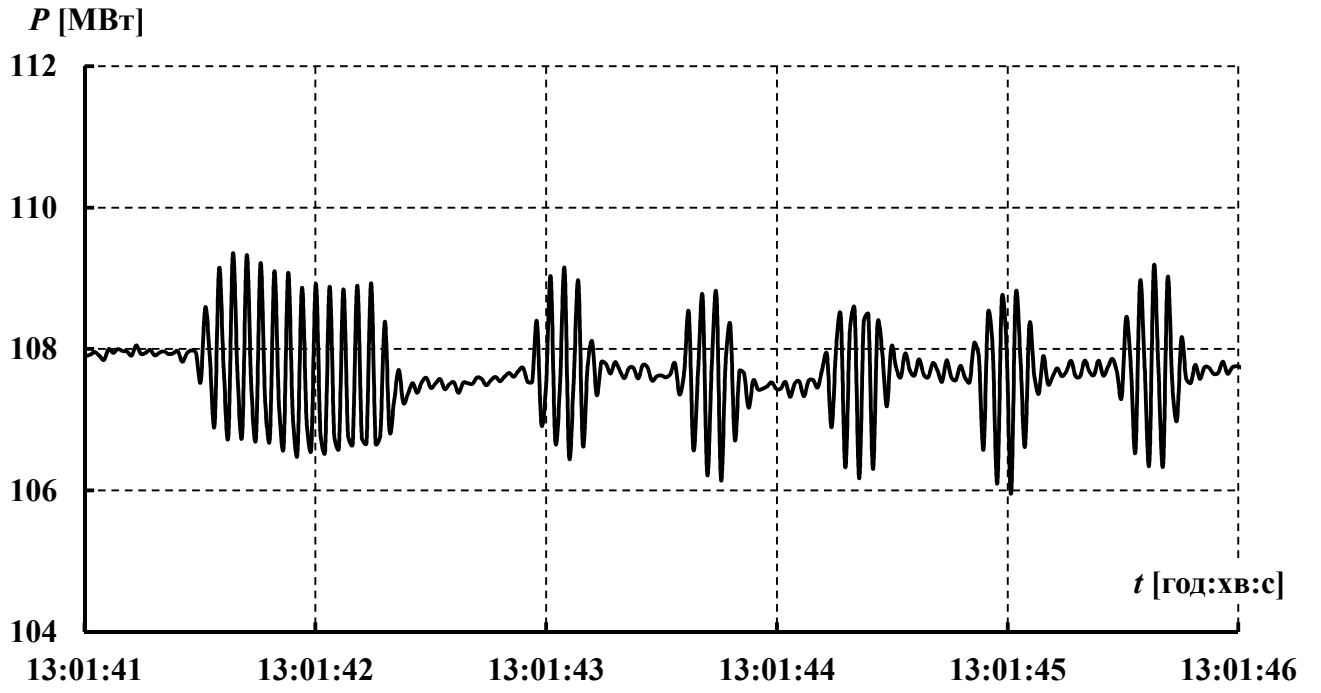


Рисунок Д.11 – Графік ЗСГ-3

Додаток Е

Результати аналізу вибірок даних тестових та зареєстрованих сигналів

Таблиця Е.1 – Результати аналізу вибірки даних ТСГ-1 із застосуванням методів MUSIC, EV, HTLS, MP та Проні за різного порядку моделі сигналу

№ з/п	Метод	Порядок експоненціальної моделі																	
		4			6			8			10 (MDL)			16			20		
		f , Гц	A	ξ_d	f , Гц	A	ξ_d	f , Гц	A	ξ_d	f , Гц	A	ξ_d	f , Гц	A	ξ_d	f , Гц	A	ξ_d
1	MUSIC	0,04	100,0	–	0,07	100,1	–	0,12	2,32	–	0,11	2,19	–	0,10	1,65	–	0,10	1,10	–
								0,21	1,24	–	0,20	1,45	–	0,20	1,56	–	0,20	1,61	–
2	EV	0,19	100,2	–	0,03	100	–	0,05	100,0	–	0,13	2,15	–	0,10	1,64	–	0,10	1,11	–
								0,22	1,05	–	0,20	1,57	–	0,20	1,57	–	0,20	1,61	–
3	HTLS	0,25	4,6	–0,216	0,10	2,0	0	0,10	2,00	0	0,10	2,00	0	0,10	2,00	0	0,10	2,00	0
					0,20	1,0	0	0,20	1,00	0	0,20	1,00	0	0,20	1,00	0	0,20	1,00	0
4	MP	0,25	4,5	–0,214	0,11	2,1	0	0,10	2,00	0	0,10	2,00	0	0,10	2,00	0	0,10	2,00	0
					0,21	1,0	0	0,20	1,00	0	0,20	1,00	0	0,20	1,00	0	0,20	1,00	0
5	Проні ("класичний")	0,18	1,59	0	0,10	2,0	0	0,10	2,00	0	0,10	2,00	0	0,10	2,00	0	0,10	2,00	0
	Проні (модифікований)	0,10	2,03	0,006	0,10	1,99	0	0,10	2,00	0	0,10	2,00	0	0,10	2,00	0	0,10	2,00	0
		0,20	1,21	0,032	0,20	0,97	0	0,20	1,00	0	0,20	1,00	0	0,20	1,00	0	0,20	1,00	0

Таблиця Е.2 – Результати визначення параметрів складових ТСг-1 для вікон спостереження різної довжини

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с														
		0-1			0-2			0-3			0-5			0-10		
		f , Гц	A	ξ	f , Гц	A	ξ	f , Гц	A	ξ	f , Гц	A	ξ	f , Гц	A	ξ
1	ДПФ	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2	HTLS	0,10	2,0	0,000	0,10	2,0	0,000	0,10	2,0	0,000	0,10	2,0	0,000	0,10	2,0	0,000
		0,20	1,0	0,000	0,20	1,0	0,000	0,20	1,0	0,000	0,20	1,0	0,000	0,20	1,0	0,000
3	MP	0,19	1,8	0,013	0,10	2,0	0,000	0,10	2,0	0,000	0,10	2,0	0,000	0,10	2,0	0,000
					0,20	1,0	0,000	0,20	1,0	0,000	0,20	1,0	0,000	0,20	1,0	0,000
4	Проні ("класичний")	0,10	1,9	-0,011	0,10	1,9	-0,013	0,10	2,0	0,000	0,10	2,0	0,000	0,10	2,0	0,000
		0,20	1,0	-0,001	0,20	1,0	-0,001	0,20	1,0	0,000	0,20	1,0	0,000	0,20	1,0	0,000
	Проні (модифікований)	0,18	1,9	-0,104	0,19	1,7	-0,065	0,19	1,9	-0,148	0,189	1,9	-0,147	0,10	2,0	0,000
		0,20	1,0	0,000	0,20	1,0	0,000	0,20	1,0	0,000	0,20	1,0	0,000	0,20	1,0	0,000
5	ВП (на базі ВТФ Морле)	0,34	7,8	–	0,36	5,5	–	0,33	4,5	–	0,35	3,5	–	0,30	2,4	–
		1,49	2,7	–	1,46	1,9	–	1,47	1,5	–	1,50	1,2	–	1,50	0,9	–
6	МННТ-1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,23	0,8	–
	МННТ-2	0,96	0,8	–	0,47	1,0	–	0,34	0,9	–	0,20	1,3	–	0,10	2,1	–

Таблиця Е.3 – Результати визначення параметрів складових ТСГ-2 для різних вікон спостереження

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с														
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5		
		$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ
1	ДПФ	–	–	–	–	–	–	2,00	6,0	–	–	–	–	2,00	7,3	–
		5-6			6-7			7-8			8-9			9-10		
		$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ
		2,00	9,1	–	–	–	–	2,00	14,6	–	–	–	–	2,00	15,9	–
		0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
		$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ
		2,00	1,5	–	1,50	5,6	–	1,50	9,8	–	1,50	10,3	–	1,50	11,4	–
		4,00	0,1	–												
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
		$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ
		1,33	2,7	–	1,67	6,6	–	1,67	10,2	–	1,40	3,5	–	1,40	8,5	–
		2,00	2,7	–							2,00	2,9	–	2,00	6,7	–
		0-10														
		$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ												
		1,50	7,5	–												
		1,90	6,5	–												

Продовження таблиці Е.3

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с																
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5				
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ		
2	HTLS	0,27	2,5	0,317	1,49	3,3	-0,040	0,08	18,6	0,759	0,69	2,4	-0,252	0,43	3,0	0,113		
		1,37	0,3	0,124	1,84	4,8	-0,008	1,48	6,1	-0,033	1,50	6,5	-0,025	1,50	7,8	-0,020		
		1,49	1,3	-0,058	1,93	3,7	-0,006	1,72	3,4	-0,146	1,90	3,1	-0,015	1,85	6,2	-0,007		
		1,90	0,9	-0,021	1,93	3,7	-0,006	1,82	2,1	0,002	1,96	3,8	0,017	1,92	4,0	-0,008		
		1,93	1,7	0,021				1,93	4,6	-0,009								
				5-6			6-7			7-8			8-9			9-10		
				<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ
				1,50	8,8	-0,017	0,51	3,4	-0,350	0,35	3,3	0,167	0,04	120,6	-0,266	0,40	3,6	-0,193
				1,89	2,3	0,037	1,50	10,7	-0,015	1,50	11,7	-0,013	1,50	12,5	-0,011	1,50	13,9	-0,010
				1,91	5,0	-0,009	1,89	6,2	-0,014	1,85	2,7	0,013	1,90	6,2	-0,008	1,86	10,3	-0,011
				1,91	5,0	-0,009	1,93	10,8	-0,009	1,91	8,0	-0,007	1,95	4,2	0,021	1,91	10,8	-0,007
				0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
				<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ
				0,01	148,9	0,745	0,16	5,4	-0,056	0,16	6,2	-0,047	0,16	5,7	-0,039	0,17	6,7	-0,075
				0,17	3,9	-0,046	1,50	3,3	0,001	1,50	5,5	0,000	1,50	5,0	0,001	1,50	5,0	0,001
				1,50	1,0	0,001	1,90	1,4	0,000	1,90	5,3	0,000	1,90	7,2	0,000	1,90	6,8	0,000
				1,90	0,25	0,000												
				0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
				<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ
				0,10	3,7	0,265	0,16	6,0	-0,043	0,05	10,1	-0,868	0,07	5,0	-0,227	0,09	10,8	-0,162
				0,16	4,3	-0,027	1,50	3,2	0,000	0,16	6,9	-0,046	0,15	1,7	0,062	0,16	13,9	0,012
				1,50	0,7	0,000	1,90	0,6	0,000	1,50	5,9	0,000	1,50	0,6	0,000	1,50	1,6	0,000
				1,90	0,4	0,000	1,90	0,6	0,000	1,90	5,3	0,000	1,90	0,7	0,000	1,90	0,2	0,000
				0-10														
				<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ												
				0,10	0,8	0,009												
				0,15	1,0	0,002												
				1,50	1,0	0,000												
		1,90	1,0	0,000														

Продовження таблиці Е.3

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с														
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ
4	Проні ("класичний")	0,13	2,4	-0,783	0,29	0,8	-0,220	0,12	9,4	0,112	0,16	5,2	-0,270	0,19	3,5	-0,020
		1,45	1,0	-0,068	1,47	2,1	-0,045	1,49	3,5	-0,030	1,49	4,8	-0,025	1,50	6,1	-0,020
		1,93	1,2	-0,031	1,83	1,4	-0,034	1,83	1,1	0,034	1,90	4,2	-0,017	1,83	1,53	-0,012
		2,01	0,2	0,060	1,94	1,6	-0,010	1,92	3,5	-0,013	2,01	0,15	0,017	1,92	4,50	-0,011
		5-6			6-7			7-8			8-9			9-10		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ
		0,15	5,4	-0,254	0,15	7,3	-0,208	0,17	5,5	0,067	0,16	5,72	0,041	0,19	4,0	-0,058
		1,50	7,4	-0,016	1,50	8,7	-0,015	1,50	10,0	-0,013	1,50	11,3	-0,011	1,50	12,6	-0,010
		1,90	7,1	-0,010	1,90	8,2	-0,016	1,83	1,0	0,019	1,90	9,8	-0,008	1,83	1,1	-0,015
		1,94			1,94	1,1	-0,029	1,91	8,5	-0,008	1,90			1,91	9,9	-0,008
		0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ
		0,17	3,0	-0,123	0,16	4,8	-0,052	0,16	6,2	-0,045	0,15	7,0	-0,008	0,18	7,5	0,003
		1,50	0,8	-0,014	1,49	5,2	-0,011	1,47	1,2	0,031	1,50	8,7	-0,013	1,50	11,4	-0,011
		1,89	2,4	-0,003	1,53	2,8	0,010	1,50	7,4	-0,012	1,72	0,4	-0,027	1,90	9,7	-0,009
		1,91	2,2	0,001	1,88	5,0	-0,001	1,90	6,7	-0,007	1,90	7,4	-0,010			
		1,91			1,91	5,4	-0,002									
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ
		0,17	3,4	-0,127				0,17	5,5	0,022	0,16	4,1	-0,090	0,03	114,9	-0,451
		1,49	7,0	-0,007	0,16	5,3	-0,058	1,47	2,2	0,011	0,16	4,1	-0,090	0,17	8,3	-0,029
		1,51	6,3	0,009	1,50	13,2	-0,002	1,50	9,9	-0,009	1,50	13,9	-0,004	1,50	20,2	-0,005
		1,89	7,1	0,006	1,90	10,3	-0,002	1,89	4,1	0,007	1,90	9,7	-0,002	1,90	19,6	-0,003
		1,91	7,9	-0,005				1,90	10,2	-0,005						
		0-10														
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ												
		0,16	3,4	-0,055												
		1,50	1,0	-0,001												
		1,90	1,0	-0,001												

Продовження таблиці Е.3

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с															
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5			
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	
4	Проні (модифікований)	0,24	1,9	0,150	0,28	2,3	-0,059	1,51	3,8	0,029	0,17	5,1	0,202	0,17	6,6	-0,015	
		1,45	1,2	0,042	1,49	1,9	0,071	1,91	3,1	0,022	1,49	4,8	0,023	1,50	6,1	0,024	
		1,96	1,1	0,032	1,93	1,9	0,030				1,91	4,1	0,018	1,91	5,3	0,016	
		5-6			6-7			7-8			8-9			9-10			
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	
		1,51	7,7	0,013	0,19	3,5	0,229	0,16	5,7	0,160	1,50	11,4	0,010	1,50	12,4	0,016	
		1,91	6,3	0,014	1,50	8,6	0,017	1,50	10,2	0,013	1,90	9,7	0,009	1,90	10,6	0,009	
					1,90	7,5	0,011	1,90	8,7	0,010							
		0-2			2-4			4-6			6-8			8-10			
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	
		0,18	3,1	0,037	0,21	1,4	0,446	0,17	7,1	-0,371	0,18	3,8	0,024	0,11	12,1	-0,346	
		1,44	1,1	0,061	1,50	3,9	0,023	1,50	6,3	0,019	1,50	8,8	0,015	1,50	11,3	0,012	
		1,95	1,1	0,034	1,90	3,3	0,020	1,90	5,4	0,014	1,90	7,6	0,011	1,90	9,8	0,008	
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10			
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	
		0,20	4,0	-0,217	0,15	8,4	-0,125	0,16	6,6	-0,095	0,17	2,1	0,250	0,16	5,2	0,049	
		1,50	2,9	0,018	1,50	5,0	0,022	1,50	9,0	0,013	1,49	2,0	0,029	1,50	7,6	0,014	
		1,60	2,4	-0,022	1,90	4,4	0,016	1,90	7,7	0,010	1,79	2,2	-0,059	1,90	6,8	0,010	
		1,92	1,6	0,025							1,91	2,2	0,017				
		0-10															
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ													
0,14	6,5	-0,003															
1,50	3,1	0,017															
1,71	0,3	0,005															
1,91	2,9	0,012															
11,0	1,0	-0,076															

Продовження таблиці Е.3

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с														
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ
5	ВП (на базі ВТФ Морле)	0,36	7,7	–	0,38	7,9	–	0,38	8,1	–	0,38	7,8	–	0,36	7,4	–
		1,48	2,8	–	1,48	2,6	–	1,48	3,3	–	1,48	2,5	–	1,48	3,1	–
		5-6			6-7			7-8			8-9			9-10		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ
		0,36	7,9	–	0,36	7,2	–	0,37	7,4	–	0,37	7,9	–	0,37	7,7	–
		1,53	1,8	–	1,48	2,9	–	1,42	1,4	–	1,48	3,3	–	2,25	3,3	–
		2,32	1,8	–				2,46	2,0	–						
		0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ
		0,36	5,6	–	0,36	5,7	–	0,36	5,1	–	0,38	5,1	–	0,38	5,5	–
		1,48	2,0	–	1,46	1,9	–	1,48	1,8	–	1,48	1,8	–	1,48	1,7	–
					2,84	1,4	–	2,84	1,4	–	2,76	1,2	–	2,76	1,4	–
								4,16	0,9	–	4,92	0,9	–			
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ
		0,36	4,6	–	0,36	4,3	–	0,36	4,3	–	0,40	3,5	–	0,35	3,3	–
		1,47	1,6	–	1,47	1,6	–	1,44	1,5	–	1,50	1,1	–	1,50	1,2	–
		4,44	0,9	–	6,24	0,6	–	4,12	0,9	–	2,30	0,7	–	2,35	0,7	–
								7,38	0,6	–	7,95	0,5	–	8,35	0,4	–
														13,0	0,3	–
0-10																
<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ														
0,40	2,4	–														
1,50	1,0	–														

Продовження таблиці Е.3

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с															
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5			
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	
6	МННТ-1	1,52	2,4	–	2,03	1,5	–	1,74	7,2	–	0,03 2,01	102,1 2,6	–	1,43	10,1	–	
		5-6			6-7			7-8			8-9			9-10			
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	
		0,01	92,6	–	0,03	93,7	–	1,69	18,4	–	0,02	103,4	–	0,03	103,2	–	
		1,64	11,4	–	1,96	5,5	–				2,1	6,0	–	1,83	19,1	–	
		0-2			2-4			4-6			6-8			8-10			
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	
		0,01	102,8	–	0,01	104,3	–	0,57	1,0	–	0,01	95,6	–	1,48	3,0	–	
		1,04	1,0	–	1,36	0,9	–	1,60	11,6	–	1,07	1,4	–	2,01	11,0	–	
		1,98	1,8	–	1,75	5,7	–				1,67	12,7	–				
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10			
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	
		0,01	104,0	–	0,31	3,3	–	0,01	97,9	–	0,01	102,8	–	0,01	97,7	–	
		1,05	0,5	–	1,31	1,0	–	1,01	1,7	–	1,10	0,8	–	0,63	0,7	–	
		1,85	3,8	–	1,84	8,3	–	1,92	11,4	–	1,91	4,6	–	1,10	1,7	–	
														1,91	11,5	–	
		0-10															
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ													
		0,19	4,2	–													
		1,11	1,4	–													
1,92	7,9	–															

Продовження таблиці Е.3

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с																
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5				
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ		
6	МННТ-2	2,17	2,3	–	1,93	1,7	–	1,95	6,9	–	2,09	2,7	–	1,46	9,5	–		
		5-6			6-7			7-8			8-9			9-10				
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ		
		1,98	10,8	–	1,93	5,9	–	1,94	17,6	–	2,07	5,94	–	1,98	18,2	–		
		0-2			2-4			4-6			6-8			8-10				
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ		
		1,51	2,1	–	1,50	0,8	–	0,97	1,3	–	1,74	12,1	–	0,52	1,9	–		
		1,58	0,3	–	1,99	5,4	–	1,51	11,3	–				1,51	13,1	–		
														1,70	0,7	–		
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10				
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ		
		0,31	1,8	–	1,27	0,7	–	0,44	3,4	–	0,85	0,4	–	0,21	4,9	–		
		1,32	0,3	–	1,95	8,2	–	2,01	10,5	–	1,45	0,4	–	0,79	0,9	–		
		1,66	3,8	–							1,81	4,9	–	1,59	0,6	–		
														1,80	12,4	–		
		0-10																
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ														
0,21	4,4	–																
0,71	0,6	–																
1,39	0,6	–																
1,62	8,8	–																

Таблиця Е.4 – Результати визначення параметрів складових ТСГ-3 для різних вікон спостереження

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с															
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5			
		$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	
1	ДПФ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		5-6			6-7			7-8			8-9			9-10			
		$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		0-2			2-4			4-6			6-8			8-10			
		$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	
		1,00	0,7	-	1,00	4,5	-	1,00	13,8	-	13,8	1,00	-	1,00	9,0	-	
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10			
		$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	
		0,67	1,8	-	0,67	100,7	-	0,67	12,3	-	0,80	5,6	-	0,80	15,5	-	

Продовження таблиці Е.4

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с														
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5		
		f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ
2	HTLS	0,79	0,8	-0,172	0,69	3,7	-0,032	0,81	2,2	1,000	0,71	23,3	-0,219	0,55	17,7	0,066
		0,85	0,8	0,011	0,83	3,0	-0,102	0,98	1,2	0,094	0,82	177	-0,116	0,81	16,0	-0,120
		5-6			6-7			7-8			8-9			9-10		
		0,42	3,0	-0,172	0,50	6,1	-0,553	0,63	6,4	-0,058	0,43	3,7	0,213	0,48	13,1	-0,080
		0,80	19,0	0,000	0,81	18,3	0,002	0,82	15,2	-0,006	0,82	10,6	0,020	0,80	15,1	-0,156
											0,94	2,2	-0,170	0,81	9,0	0,001
		0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
		0,39	1,3	-0,264	0,38	7,0	-0,211	0,40	9,5	-0,108	0,45	9,5	-0,116	0,48	13,5	-0,091
		0,80	3,1	0,000	0,80	13,3	-0,002	0,82	16,7	-0,018	0,79	11,6	-0,134	0,80	6,3	0,000
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
		0,09	3,6	0,532	0,37	7,3	0,145	0,40	8,2	-0,049	0,22	2,3	0,189	0,41	6,0	-0,037
		0,38	4,3	-0,231	0,81	5,8	0,000	0,49	19,2	-0,174	0,36	27,3	-0,208	0,50	6,8	-0,163
		0,80	5,0	0,000				0,80	15,1	0,000	0,43	37,2	-0,305	0,80	11,6	0,00
											0,80	10,2	0,000			

Продовження таблиці Е.4

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с														
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5		
		f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ
3	MP	0,79	0,8	-0,174	0,69	3,7	-0,032	0,81	1,9	-0,132	0,70	22,2	-0,261	0,55	17,6	0,067
		0,85	0,8	0,011	0,83	3,0	-0,102	0,97	1,0	0,136	0,82	17,7	-0,120	0,081	16,0	-0,120
		5-6			6-7			7-8			8-9			9-10		
		f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ
		0,42	3,0	-0,172	0,50	5,9	-0,549	0,63	6,4	-0,058	0,43	3,7	0,23	0,47	12,7	-0,051
		0,80	19,00	0,000	0,81	18,3	0,002	0,82	15,2	-0,006	0,83	10,6	0,020	0,81	10,0	-0,003
		0,95									0,95	2,01	-0,165			
		0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
		f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ
		0,40	1,2	-0,261	0,38	7,0	-0,210	0,42	7,5	-0,089	0,45	8,7	-0,112	0,48	13,5	-0,090
		0,80	3,0	0,000	0,80	13,4	-0,002	0,83	16,8	-0,019	0,80	15,9	0,000	0,80	11,6	-0,001
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
		f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ
		0,10	3,4	0,510	0,66	158,1	-0,327	0,41	7,3	-0,027	0,22	2,23	0,192	0,41	6,0	-0,04
		0,38	4,3	-0,231	0,82	80,5	-0,123	0,50	16,8	-0,156	0,36	27,3	-0,209	0,50	6,8	-0,16
0,800	5,00	0,000				0,80	15,22	0,000	0,43	37,3	-0,305	0,80	11,6	0,000		
									0,80	10,2	0,000					

Продовження таблиці Е.4

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с														
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5		
		f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ
4	Проні ("класичний")	0,79	0,37	-0,189	0,65	0,9	-0,110	0,81	2,4	-0,132	0,57	0,21	-0,456	0,49	1,8	-0,005
		0,86	0,42	0,019	0,84	1,1	-0,057							0,81	9,9	-0,122
		5-6			6-7			7-8			8-9			9-10		
		f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ
		0,42	2,4	-0,142	0,41	2,0	-0,391	0,54	7,1	-0,024	0,85	11,7	0,011	0,70	0,6	-0,406
		0,80	19,1	0,000	0,81	18,5	0,004	0,82	15,7	0,005	0,89	0,3	0,501	0,85	11,4	-0,002
		0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
		f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ
		0,33	0,5	-0,161	0,36	1,3	0,574	0,40	3,5	0,022	0,44	5,0	-0,156	0,47	9,7	-0,055
		0,82	0,6	-0,049	0,81	4,5	-0,126	0,82	18,2	-0,018	0,81	17,8	0,008	0,82	13,2	-0,038
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
		f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ
		0,38	0,1	-0,290	0,66	0,3	-0,335	0,45	3,7	-0,084	0,38	0,12	-0,193	0,47	3,2	-0,077
		0,80	2,1	-0,006	0,82	4,6	0,124	0,80	2,8	-0,097	0,80	2,1	-0,007	0,82	0,24	-0,150

Продовження таблиці Е.4

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с															
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5			
		$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A	ξ	
4	Проні (модифікований)	0,80	0,4	0,187	0,53	0,2	0,538	0,41	0,8	-0,114	0,31	0,6	0,579	0,30	3,6	-0,115	
		0,86	0,4	-0,026	0,86	0,7	0,153	0,82	2,3	0,135	0,81	4,9	0,130	0,80	10,1	0,124	
		5-6			6-7			7-8			8-9			9-10			
		0,29	5,1	-0,443	0,31	4,0	0,207	0,34	4,5	0,007	0,35	5,6	0,019	0,52	5,7	-0,661	
		0,80	18,4	0,003	0,80	19,2	0,000	0,80	21,7	-0,070	0,84	12,8	-0,019	0,85	11,9	-0,058	
		0-2			2-4			4-6			6-8			8-10			
		0,32	0,5	-0,021	0,36	0,3	0,608	0,37	2,4	-0,001	0,40	2,3	0,235	0,49	7,3	-0,073	
		0,84	0,3	0,086	0,81	2,4	0,133	0,84	7,7	-0,019	0,81	18,0	-0,005	0,85	12,6	-0,024	
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10			
		0,23	0,9	-0,263	0,36	1,0	0,308	0,52	5,4	0,051	0,28	0,32	0,252	0,46	3,7	0,060	
		0,62	1,5	-0,105	0,81	4,9	0,131	0,82	17,5	-0,013	0,80	0,62	0,136	0,80	20,8	-0,016	
		0,83	0,6	0,129													

Продовження таблиці Е.4

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с														
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ
5	ВП (на базі ВТФ Морле)	0,37	7,6	–	0,37	7,7	–	0,37	7,6	–	0,36	7,5	–	0,37	7,3	–
		1,49	2,6	–	1,49	2,6	–	1,49	2,7	–	1,49	2,9	–	1,44	3,1	–
		5-6			6-7			7-8			8-9			9-10		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ
		0,38	8,0	–	0,38	8,3	–	0,37	7,4	–	0,36	7,6	–	0,37	7,1	–
		1,49	2,5	–	1,49	2,07	–	1,39	3,1	–	1,44	3,2	–	1,44	3,1	–
		0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ
		0,36	5,4	–	0,36	5,4	–	0,38	5,4	–	0,36	5,4	–	0,36	5,3	–
		1,46	1,9	–	1,50	1,8	–	1,58	2,2	–	1,46	2,6	–	1,46	1,4	–
					2,36	1,4	–							2,44	1,3	–
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ
		0,36	4,4	–	0,36	4,4	–	0,33	4,4	–	0,35	3,4	–	0,35	3,4	–
		1,47	1,5	–	1,53	1,7	–	1,53	1,9	–	1,50	1,2	–	1,50	1,2	–
2,43	1,0	–	3,03	0,9	–	3,09	1,1	–	1,50	1,2	–	4,00	1,0	–		

Продовження таблиці Е.4

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с														
		0–1			1–2			2–3			3–4			4–5		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ
6	МННТ-1	0,65	0,8	–	0,60	3,1	–	0,71	4,5	–	0,02	101,4	–	0,01	98,4	–
											0,66	11,7	–	0,73	16,7	–
		5–6			6–7			7–8			8–9			9–10		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ
		0,79	17,7	–	0,01	98,4	–	0,02	99,8	–	0,01	100,1	–	0,01	99,0	–
					0,86	19,4	–	0,72	15,7	–	0,92	11,1	–	0,77	12,0	–
		0–2			2–4			4–6			6–8			8–10		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ
		0,71	0,6	–	0,01	100,1	–	0,01	99,1	–	0,01	98,3	–	0,01	99,6	–
		0,91	0,6	–	0,83	5,2	–	0,89	15,7	–	0,84	19,6	–	0,86	11,0	–
		0–3			3–6			6–9			0–5			5–10		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i>	ξ
		0,38	0,5	–	0,01	100,4	–	0,01	99,8	–	0,33	0,5	–	0,24	0,2	–
		0,67	1,9	–	0,77	13,8	–	0,81	16,7	–	0,40	1,7	–	0,41	3,3	–
											0,75	5,2	–	0,81	15,7	–

Продовження таблиці Е.4

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с														
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5		
		f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ
6	МННТ-2	0,91	0,4	–	1,14	1,2	–	0,92	3,9	–	0,98	6,4	–	0,96	14,9	–
		5-6			6-7			7-8			8-9			9-10		
		f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ
		0,93	16,6	–	1,00	16,6	–	0,93	19,7	–	1,01	9,2	–	0,98	12,1	–
		0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
		f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ
		1,33	0,8	–	0,94	5,1	–	0,96	16,5	–	0,97	19,7	–	0,99	10,9	–
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
		f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ	f, Γ_{Π}	A	ξ
		0,46	0,3	–	0,88	13,7	–	0,34	1,6	–	0,38	1,5	–	0,41	3,3	–
0,68	2,0	–			–	0,98	16,1	–	0,64	5,6	–	0,83	15,4	–		

Таблиця Е.5 – Результати визначення параметрів складових ТСГ-4 для різних вікон спостереження

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с																	
		0–1			1–2			2–3			3–4			4–5					
		$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ			
1	ДПФ	12,00	3,2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–		
		21,00	2,2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
		5–6			6–7			7–8			8–9			9–10					
		$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ
		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
		0–2			2–4			4–6			6–8			8–10					
		$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ
		12,00	1,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
		21,00	1,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
		0–3			3–6			6–9			0–5			5–10					
		$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ
		0,67	29,6	–	–	–	–	–	–	–	0,60	23,2	–	–	–	–	–	–	–
		11,67	1,4	–	0,67	20,7	–	0,67	19,1	–	11,80	0,8	–	0,60	18,6	–	–	–	–
		21,00	1,0	–	–	–	–	–	–	–	21,00	0,5	–	–	–	–	–	–	–

Продовження таблиці Е.5

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с														
		0–1			1–2			2–3			3–4			4–5		
		f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ
2	HTLS	0,48	19,2	0,586	1,31 5,23	16,9 3,8	-0,445 -0,293	0,69 3,45	19,5 1,1	0,192 -0,004	0,48 0,97	27,5 3,9	0,164 -0,143	0,61 1,19	21,0 3,3	0,123 -0,122
		5–6			6–7			7–8			8–9			9–10		
		f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ
		0,43	28,4	-0,071	0,58	25,9	0,100	0,25	79,2	-0,360	0,56	27,5	0,058	0,43	27,1	-0,013
		1,04	2,0	-0,066	1,14	2,80	-0,049	1,07	5,4	-0,168	1,08	2,3	-0,031	1,01	2,4	-0,098
		6,59	0,2	-0,119							6,59	0,2	-0,119			
		0–2			2–4			4–6			6–8			8–10		
		f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ
		0,32	7,3	0,619	0,47	17,6	0,099	0,51	23,9	0,002	0,50	28,4	-0,009	0,50	28,6	-0,007
					0,98	2,9	-0,128	1,00	1,1	-0,005	0,99	2,7	0,002	0,99	2,7	0,004
					4,16	0,2	-0,035	1,97	0,4	0,076						
		0–3			3–6			6–9			0–5			5–10		
		f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ
		0,54	39,8	-0,056	0,42	63,5	-0,623	0,50	27,9	-0,002	0,51	33,5	-0,020	0,50	28,0	-0,002
		1,56	0,9	0,069	0,50	23,3	-0,006	1,00	1,29	0,001	1,00	2,8	-0,003	0,87	0,4	-0,055
			1,00	1,29	0,001	1,00	2,8	-0,003	0,94	6,7	-0,046	1,00	2,8	-0,003		
			1,97	0,2	0,081											

Продовження таблиці Е.5

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с														
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5		
		$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ
3	MP	1,64	6,7	0,266	0,10 1,31 5,13	70,9 16,0 3,3	-1,000 -0,435 -0,262	0,69 3,40	19,4 1,5	-0,192 -0,017	0,49 0,96	25,7 4,5	0,209 -0,148	0,61 1,16	21,3 3,2	0,111 -0,124
		5-6			6-7			7-8			8-9			9-10		
		0,44 1,04	28,4 2,0	-0,065 -0,064	0,58 1,14	25,9 2,75	-0,099 -0,048	0,25 1,07	75,0 5,4	-0,357 -0,168	0,56 1,08 6,55	27,4 2,25 0,12	0,062 -0,028 -0,085	0,42 1,02	27,1 2,5	-0,035 -0,102
		0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
		0,37	24,9	0,286	0,47 0,99 4,11	18,1 2,8 0,2	0,093 -0,126 -0,028	0,51 1,00 1,97	23,9 1,1 0,4	0,002 -0,005 0,077	0,50 0,99	28,4 2,7	-0,009 0,002	0,50 0,99	28,5 2,7	-0,007 0,004
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
		0,55 1,49	35,4 0,4	-0,024 0,150	0,40 0,50 1,00 1,97	59,8 23,4 1,4 0,2	-0,677 -0,006 0,001 0,080	0,50 1,00	27,9 2,8	-0,002 -0,003	0,51 0,94	33,5 6,6	-0,020 -0,045	0,50 1,00	28,1 2,8	-0,002 -0,003

Продовження таблиці Е.5

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с														
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5		
		$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ
4	Проні ("класичний")	-	-	-	0,77	1,0	-0,460	0,69	17,4	0,202	0,84	1,1	-0,376	0,69	22,5	0,202
		5-6			6-7			7-8			8-9			9-10		
		$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ
		0,81	1,8	-0,340	0,66	25,0	0,222	0,78	2,7	-0,300	0,67	25,8	0,255	0,81	1,91	-0,328
		0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
		$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ
		0,35	208,4	0,648	0,47	21,8	-0,058	0,56	32,3	0,057	0,54	34,8	0,070	0,58	36,0	0,050
					1,01	2,6	0,016	1,02	1,53	0,919	1,01	1,4	0,535	1,02	0,9	0,418
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
		$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ
		0,51	49,2	0,129	0,51	24,9	-0,003	0,50	29,1	0,035	0,51	25,2	0,853	0,50	26,9	-0,002
		0,93	4,3	0,094	1,00	2,3	-0,004	1,01	2,8	0,081	0,98	3,2	0,090	1,00	2,5	-0,004

Продовження таблиці Е.5

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с														
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5		
		$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ
4	Проні (модифікований)	0,21	255,8	-0,526	0,61	10,9	0,121	0,37	18,5	0,191	0,49	15,1	0,281	0,46	19,4	-0,061
		2,35	2,51	-0,807	1,32	0,3	0,069	0,79	8,7	-0,159	1,41	0,4	-0,021	0,71	0,3	0,813
		5-6			6-7			7-8			8-9			9-10		
		0,52	14,9	0,257	0,60	18,5	0,032	0,53	14,3	0,264	0,57	15,9	0,028	0,52	14,5	0,263
		1,35	0,9	-0,221	0,74	3,6	0,473	1,36	1,0	-0,246	0,77	6,2	0,419	1,36	0,9	-0,229
		0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
		0,35	18,1	-0,572	0,50	23,7	0,042	0,51	21,9	0,048	0,50	27,5	0,001	0,50	27,8	0,001
		0,82	0,4	0,293	0,91	3,0	0,020	0,99	3,6	-0,042	1,00	2,6	0,006	1,00	2,7	0,005
		2,64	0,3	-0,461	3-6			6-9			0-5			5-10		
		0,50	105,6	-0,441	0,08	20,8	-0,585	0,51	27,3	0,003	0,14	32,1	-0,107	0,50	27,5	0,002
		0,71	6,5	0,056	0,51	25,7	0,002	1,00	2,8	-0,004	0,52	25,4	-0,004	1,00	2,6	0,003
					1,01	2,8	-0,004				0,65	29,7	-0,431			
											1,17	0,5	-0,007			

Продовження таблиці Е.5

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с														
		0–1			1–2			2–3			3–4			4–5		
		$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ
5	ВП (на базі ВТФ Морле)	0,37	30,5	–	0,37	34,4	–	0,36	34,5	–	0,37	35,8	–	0,37	34,0	–
		1,48	11,3	–	1,48	11,5	–	1,48	12,4	–	1,48	12,2	–	1,48	12,2	–
		5–6			6–7			7–8			8–9			9–10		
		$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ
		0,36	35,0	–	0,37	33,6	–	0,37	35,1	–	0,37	33,8	–	0,37	35,1	–
		1,48	12,0	–	1,48	12,1	–	1,48	12,0	–	1,48	12,1	–	1,48	12,0	–
		0–2			2–4			4–6			6–8			8–10		
		$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ
		0,36	23,2	–	0,36	25,1	–	0,38	24,6	–	0,36	24,5	–	0,38	24,4	–
		1,50	7,5	–	1,48	7,8	–	1,50	7,7	–	1,50	7,6	–	1,50	7,6	–
					2,32	5,0	–	2,38	4,9	–	2,38	4,9	–	2,38	4,8	–
		0–3			3–6			6–9			0–5			5–10		
		$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ
		0,38	19,3	–	0,35	20,1	–	0,35	19,8	–	0,38	15,3	–	0,37	15,4	–
		1,53	6,3	–	1,50	7,6	–	1,50	6,4	–	1,49	4,9	–	1,49	5,4	–
						2,36	4,8	–	3,05	3,1	–	2,28	3,8	–		

Продовження таблиці Е.5

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с														
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ
6	МННТ-1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
		5-6			6-7			7-8			8-9			9-10		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ
		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
		0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ
		0,04	469,1	–	0,45	29,5	–	0,46	28,3	–	0,45	29,8	–	0,53	26,9	–
		1,06	23,8	–												
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ
		0,02	483,1	–	0,55	25,7	–	26,7	26,7	–	0,01	479,3	–	0,20	0,2	–
		0,45	38,0	–							0,36	21,2	–	0,50	27,7	–
											0,49	27,4	–			

Продовження таблиці Е.5

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с														
		0–1			1–2			2–3			3–4			4–5		
		$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ
6	МННТ-2	1,14	36,9	–	0,92	10,7	–	0,92	23,3	–	0,91	21,6	–	0,92	21,7	–
		5–6			6–7			7–8			8–9			9–10		
		$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ
		0,91	21,4	–	0,92	24,3	–	0,91	21,2	–	0,92	24,7	–	0,91	21,4	–
		0–2			2–4			4–6			6–8			8–10		
		$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ
		0,36	131,3	–	0,50	26,8	–	0,55	25,3	–	0,50	27,6	–	0,50	28,0	–
		0–3			3–6			6–9			0–5			5–10		
		$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ
		0,97	17,3	–	0,64	26,4	–	0,64	27,4	–	0,27	26,3	–	0,23	0,3	–
									0,80	22,6	–	0,59	27,5	–		

Таблиця Е.6 – Результати визначення параметрів складових ТСГ-5 для різних вікон спостереження

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с																
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5				
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ		
1	ДПФ	16,00	2,7	–	–	–	–	17,00	0,2	–	–	–	–	22,00	0,4	–		
									19,00	0,2	–							
									23,00	0,2	–							
				5-6			6-7			7-8			8-9			9-10		
				<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ
				–	–	–	2,00	19,4	–	–	–	–	–	–	–	2,00	20,8	–
				0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
				<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ
				1,00	28,4	–	1,50	24,4	–				1,50	25,6	–	1,00	25,7	–
				11,00	1,1	–	19,00	0,6	–	1,50	28,1	–	18,50	0,3	–	13,00	0,2	–
				20,50	1,0	–	20,50	0,5	–				20,00	0,3	–	16,50	0,2	–
							24,00	0,5	–				21,50	0,3	–	17,50	0,2	–
													22,50	0,3	–	20,00	0,2	–
													23,50	0,2	–	21,50	0,2	–
															–	22,50	0,2	–
																23,50	0,2	–
				0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ		
		0,67	27,4	–	0,67	29,7	–	0,67	29,3	–	0,80	31,6	–	0,80	23,9	–		
		1,33	26,6	–	1,33	22,7	–	1,33	25,8	–	1,40	20,	–	1,40	23,6	–		
		2,00	2,4	–	17,33	0,4	–	15,67	0,30	–	2,20	0,5	–	2,30	0,6	–		
		11,0	0,8	–	18,33	0,4	–	17,67	0,28	–	15,60	0,3	–	11,00	0,2	–		
		20,67	0,7	–	19,33	0,4	–	19,00	0,27	–	16,00	0,3	–	11,30	0,2	–		

Продовження таблиці Е.6

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с																	
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5					
		$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ			
2	HTLS	1,16	47,0	-0,261	1,42	2,7	0,144	1,29	29,1	0,012	1,54	40,4	-0,068	0,99	22,4	0,109	1,40	30,5	-0,113
		5-6			6-7			7-8			8-9			9-10					
		$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ			
		1,27	18,8	-0,181	1,51	23,1	0,002	1,34	23,5	0,024	1,34	23,3	-0,072	1,41	7,65	0,093			
		1,60	9,6	-0,101															
		0-2			2-4			4-6			6-8			8-10					
		$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ			
		0,78	35,1	-0,007	0,75	33,0	0,002	0,75	30,8	0,011	0,76	30,3	0,006	0,76	31,4	-0,024			
		1,37	22,8	-0,005	1,38	23,9	-0,006	1,39	29,2	-0,012	1,39	28,2	0,001	1,37	28,4	-0,005			
					2,12	0,4	-0,063	2,12	0,8	-0,017	2,29	0,3	0,018	2,00	1,0	-0,072			
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10					
		$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	A, MBT	ξ			
		0,76	34,2	-0,005	0,76	31,4	0,005	0,76	30,8	0,002	0,76	33,1	0,001	0,69	2,1	-0,009			
		1,36	21,0	0,006	1,40	23,3	-0,005	1,39	28,0	0,002	1,38	25,8	-0,006	0,76	30,9	0,003			
					1,44	2,33	0,060	2,07	0,3	-0,026				1,39	28,9	-0,002			
												1,52	1,0	0,007					
												2,17	0,2	-0,001					

Продовження таблиці Е.6

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с																	
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5					
		$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ			
3	МР	1,17	43,2	-0,224	1,42	2,7	0,144	1,29	29,1	0,014	1,54	40,0	-0,067	0,99	14,6	0,250	1,47	30,6	-0,062
		5-6			6-7			7-8			8-9			9-10					
		$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ			
		1,30	17,8	-0,170	1,51	23,1	0,002	1,34	23,6	0,024	1,33	22,7	-0,071	1,41	7,7	0,093			
		1,60	40,7	-0,142															
		0-2			2-4			4-6			6-8			8-10					
		$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ			
		0,77	28,4	0,038	0,76	33,3	0,000	0,76	31,2	0,008	0,76	30,4	0,006	0,76	33,3	-0,016			
		1,39	20,7	0,010	1,37	23,9	-0,006	1,39	28,9	-0,011	1,39	28,2	0,001	1,38	27,8	-0,002			
					2,14	0,5	-0,057	2,12	0,6	-0,007	2,29	0,3	0,020	2,03	0,7	-0,052			
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10					
		$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ			
		0,76	34,4	-0,006	0,76	31,5	0,006	0,76	30,8	0,002	0,76	33,1	0,002	0,69	2,1	-0,007			
		1,37	20,8	0,007	1,40	24,6	-0,008	1,39	28,0	0,002	1,38	25,5	-0,006	0,76	30,9	0,003			
					1,46	0,6	0,103	2,07	0,3	-0,028				1,39	28,9	-0,002			
			2,11	0,7	-0,020							1,53	1,0	0,007					
												2,17	0,2	0,001					

Продовження таблиці Е.6

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с															
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5			
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	
4	Проні ("класичний")	1,19	19,7	-0,096	1,33	37,7	0,185	1,13	36,7	0,026	1,39	14,23	-0,180	1,26	56,7	0,154	
		20,22	0,4	0,084													
		5-6			6-7			7-8			8-9			9-10			
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	
		1,25	26,5	-0,086	1,46	34,1	0,042	1,23	44,8	0,070	1,26	9,2	-0,079	1,37	39,9	0,120	
		0-2			2-4			4-6			6-8			8-10			
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	
		1,28	29,7	0,051													
		17,45	2,2	0,129	1,25	37,6	0,037	1,29	41,6	0,032	1,35	28,3	0,048	1,31	29,7	0,031	
		25,00	0,8	0,092													
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10			
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	
		1,27	19,9	0,010							0,75	66,0	0,252				
		14,3	0,9	0,133	1,32	16,5	-0,011				1,37	30,5	0,026	0,64	57,4	0,661	
		20,5	10,5	0,141	19,26	0,11	0,089	1,36	29,9	0,002	18,22	0,35	0,074	1,36	36,1	0,029	
25,0	20,3	0,145							21,86	2,62	0,078						

Продовження таблиці Е.6

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с														
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ
4	Проні (модифікований)	1,18	22,4	0,103	1,17	51,5	-0,325	1,09	43,6	0,006	1,74	1,0	0,325	1,42	57,2	-0,183
		5-6			6-7			7-8			8-9			9-10		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ
		1,29	22,5	0,120	1,55	12,4	0,084	1,19	56,4	-0,074	1,18	21,1	0,134	1,32	59,4	-0,367
		0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ
		1,30	40,1	-0,029	1,26	14,6	0,029	0,13	130,4	-0,074	1,38	40,9	-0,048	0,09	288,3	-0,702
		4,42	182,4	-0,631	5,95	10,4	-0,196	1,25	14,4	-0,019	4,60	8,11	-0,214	1,38	24,2	0,014
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ
		0,69	88,2	-0,314	0,76	70,7	-0,193	0,76	62,3	-0,151	0,76	33,5	-0,001	0,76	35,7	-0,012
		1,32	59,1	-0,081	1,39	42,9	-0,028	1,40	38,9	-0,018	1,38	19,6	0,007	1,39	29,9	-0,004
		7,69	27,0	-0,190	4,01	27,4	-0,427	3,18	0,1	-0,303	2,64	4,9	-0,435	2,21	5,9	-0,798
					8,52	38,7	-0,290	11,3	0,6	-0,121	9,31	3,4	-0,124	4,28	3,6	-0,498
											9,45	1,5	-0,073	10,0	0,9	-0,147
												10,2	0,8	0,133		

Продовження таблиці Е.6

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с														
		0–1			1–2			2–3			3–4			4–5		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ
5	ВП (на базі ВТФ Морле)	0,62	1,2	–	0,70	2,8	–	0,81	4,5	–	0,70	3,5	–	0,70	2,7	–
		1,45	5,4	–	1,50	4,6	–	2,38	1,2	–	1,50	4,3	–	1,45	4,1	–
		2,38	2,3	–	2,24	2,20	–							2,38	2,1	–
		5–6			6–7			7–8			8–9			9–10		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ
		0,70	3,5	–	0,75	3,0	–	0,81	4,7	–	0,62	2,0	–	0,70	2,2	–
		1,45	4,3	–	1,56	4,2	–	2,38	1,4	–	1,45	6,0	–	1,45	4,0	–
		2,25	2,1	–							2,38	2,1	–			
		0–2			2–4			4–6			6–8			8–10		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ
		0,80	2,0	–	0,68	1,2	–	0,82	2,2	–	0,72	1,3	–	0,80	2,0	–
		2,46	2,7	–	1,50	4,2	–	1,66	0,6	–	1,50	4,2	–	1,44	0,5	–
		5,78	0,6	–	3,01	1,8	–	3,34	1,7	–	2,46	1,9	–	2,54	2,7	–
											3,12	1,9	–	5,78	0,5	–
		0–3			3–6			6–9			0–5			5–10		
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ
		0,75	1,4	–	0,75	1,6	–	0,72	1,3	–	0,75	1,0	–	0,75	1,1	–
		1,65	2,1	–	1,68	2,3	–	1,41	1,7	–	1,55	1,4	–	1,50	1,4	–
		2,19	1,9	–	4,05	1,3	–	2,34	2,1	–	4,00	1,3	–	4,25	1,5	–
		3,66	1,8	–	5,37	1,1	–	4,50	1,6	–	4,75	1,2	–	6,15	1,1	–
6,09	0,4	–														
8,67	0,4	–														

Продовження таблиці Е.6

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с														
		0–1			1–2			2–3			3–4			4–5		
		$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ
6	МННТ-1	0,23	110,5	–	0,18	110,8	–	–	–	–	0,14	125,6	–	0,08	110,0	–
		3,02	18,2	–	1,10	21,5	–	–	–	–	1,75	13,0	–	1,65	27,2	–
		5–6			6–7			7–8			8–9			9–10		
		$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ
		–	–	–	0,09	128,1	–	0,09	125,0	–	0,14	108,8	–	0,11	109,9	–
					1,75	17,4	–	1,08	45,2	–	1,06	39,3	–	1,71	19,1	–
		0–2			2–4			4–6			6–8			8–10		
		$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ
		0,01	113,4	–	0,01	119,4	–	0,00	116,4	–	0,00	122,0	–	0,01	114,8	–
		0,91	33,4	–	0,54	28,2	–	0,58	27,9	–	0,51	23,6	–	0,53	25,5	–
		1,94	23,4	–	1,44	24,0	–	1,43	26,0	–	1,46	31,1	–	1,44	30,7	–
		0–3			3–6			6–9			0–5			5–10		
		$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВт}$	ξ
		0,36	5,3	–	0,71	29,3	–	0,69	25,3	–	0,24	2,2	–	0,01	118,8	–
		0,77	28,6	–	1,39	25,2	–	1,39	27,7	–	0,76	30,0	–	0,23	7,2	–
		1,46	23,9	–							1,38	23,5	–	0,79	22,6	–
														1,33	30,5	–

Продовження таблиці Е.6

№ з/п	Метод аналізу	Часовий відрізок, с														
		0-1			1-2			2-3			3-4			4-5		
		$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ
6	МННТ-2	3,19	18,3	–	1,32	21,0	–	0,00 0,98	121,4 47,3	–	2,00	12,9	–	2,02	27,6	–
		5-6			6-7			7-8			8-9			9-10		
		$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ
		0,00 1,04	100,5 45,8	–	1,89	17,2	–	1,05	46,0	–	1,26	38,2	–	2,02	21,7	–
		0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
		$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ
		0,97 2,01	32,7 23,4	–	0,64 1,48	27,6 24,9	–	0,64 1,50	26,8 26,4	–	0,52 1,46	24,5 31,8	–	0,52 1,47	22,9 30,4	–
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
		$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ
		0,45 0,76 1,70	5,8 27,0 25,1	–	0,70 1,71	26,3 24,9	–	0,67 1,46	23,5 27,8	–	0,44 0,69 1,68	20,2 33,8 23,1	–	0,24 0,60 1,21	2,02 20,6 32,2	–

Таблиця Е.7 – Результати визначення параметрів складових ТСГ-4 із шумом для різних вікон спостереження

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с																	
			0-2			2-4			4-6			6-8			8-10					
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ			
1	ДПФ	120	12,00	1,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10					
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ
			0,67	29,6	-	0,67	20,7	-	0,67	19,1	-	0,60	23,2	-	0,60	18,6	-			
			11,67	1,4	-															
		100	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10					
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ
			12,00	1,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10					
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ
			0,67	29,6	-	0,67	20,7	-	0,67	19,1	-	0,60	23,2	-	0,60	18,6	-			
			11,67	1,4	-															

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с																
			0–2			2–4			4–6			6–8			8–10				
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ		
		80	12,00	1,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
			0–3			3–6			6–9			0–5			5–10				
			0,67	29,6	–	0,67	20,7	–	0,67	19,1	–	0,60	23,2	–	0,60	18,6	–	–	–
			11,67	1,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
		60	0–2			2–4			4–6			6–8			8–10				
			12,00	1,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
			0–3			3–6			6–9			0–5			5–10				
			0,67	29,6	–	0,67	20,7	–	0,67	19,1	–	0,60	23,2	–	0,60	18,6	–	–	–
			11,67	1,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с															
			0-2			2-4			4-6			6-8			8-10			
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	
1	ДПФ	40	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10			
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	
			12,00	1,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10			
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	
			0,67	29,6	-	0,67	20,7	-	0,67	19,1	-	0,60	23,2	-	0,60	18,6	-	
		11,67	1,4	-														
		20	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10			
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	
			12,00	1,4	-	-	-	-	12,00	1,4	-	-	-	-	12,00	1,4	-	
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10			
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	
			0,67	29,6	-				0,67	29,6	-				0,67	29,6	-	
			9,67	1,4	-				9,67	1,4	-				9,67	1,4	-	
			11,33	1,4	-	0,67	20,7	-	11,33	1,4	-	0,67	20,7	-	11,33	1,4	-	
			12,00	1,4	-				12,00	1,4	-				12,00	1,4	-	
			12,67	1,4	-				12,67	1,4	-				12,67	1,4	-	
			10	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
		$f, \text{Гц}$		$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	
		11,50		1,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		12,50		1,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		15,00		1,4	-													
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10				
		$f, \text{Гц}$		$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	
		0,67		29,5	-													
		10,00		1,4	-													
		10,67		1,4	-	0,67	20,7	-	0,67	19,1	-	0,60	23,2	-	0,60	18,6	-	
11,67	1,4	-																
12,67	1,4	-																
15,00	1,1	-																

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с																	
			0–2			2–4			4–6			6–8			8–10					
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ			
1	ДПФ	5	12,00	1,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–		
			0–3			3–6			6–9			0–5			5–10					
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ			
			0,67	29,6	–															
			9,67	1,4	–															
			11,33	1,4	–	0,67	20,7	–	0,67	19,1	–	0,60	23,1	–	0,60	18,6	–			
			12,00	1,4	–							6,40	1,4	–	1,2	3,3	–			
			12,67	1,4	–															
			15,00	1,1	–															

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с														
			0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВТ}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВТ}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВТ}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВТ}$	ξ	$f, \Gamma_{\text{ц}}$	$A, \text{МВТ}$	ξ
2	HTLS	120	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			0,32	7,3	0,619	0,47	17,6	0,099	0,51	23,9	0,002	0,50	28,4	-0,009	0,50	28,5	-0,007
						0,98	2,9	-0,128	1,00	1,1	-0,005	0,99	2,7	0,002	0,99	2,7	0,004
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
			0,54	39,8	-0,056	0,42	63,4	-0,621	0,50	27,9	-0,002	0,51	33,5	-0,020	0,50	28,0	-0,002
						0,50	23,2	-0,006	1,00	2,8	-0,003	0,94	6,7	-0,046	1,00	2,8	-0,003
					1,00	1,3	0,001										
		100	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			0,32	7,3	0,619	0,47	17,6	0,099	0,51	23,9	0,002	0,50	28,4	-0,009	0,50	28,6	-0,007
						0,98	2,9	-0,128	1,00	1,1	-0,005	0,99	2,7	0,002	0,99	2,7	0,004
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
			0,54	39,8	-0,056	0,42	63,0	-0,617	0,50	27,9	-0,002	0,51	33,5	-0,020	0,50	28,0	-0,002
						0,50	23,3	-0,006	1,00	2,8	-0,003	0,94	6,7	-0,046	1,00	2,8	-0,003
					1,00	1,3	0,001										
		80	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			0,32	7,3	0,619	0,47	18,2	0,093	0,51	24,0	0,001	0,50	28,3	-0,008	0,50	28,7	-0,008
						0,99	2,7	-0,126	1,00	1,0	-0,004	0,99	2,7	0,002	0,99	2,7	0,005
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
0,54	39,8		-0,056	0,51	26,0	-0,005	0,50	27,9	-0,005	0,51	33,5	-0,020	0,50	28,1	-0,002		
				1,00	2,6	0,001	1,00	2,8	-0,003	0,94	6,7	-0,046	1,00	2,9	-0,004		

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с														
			0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ
2	HTLS	60	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			0,32	7,3	0,619	0,47	22,9	0,037	0,50	30,4	0,001	0,50	26,6	0,009	0,50	29,2	-0,013
						0,98	1,7	-0,101	1,01	1,6	0,021	1,01	2,4	-0,003	0,99	2,7	0,008
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
			0,54	39,8	-0,056	0,51	25,4	-0,005	0,50	27,8	-0,002	0,51	33,5	-0,020	0,50	28,1	-0,002
						1,00	2,7	0,001	1,00	2,9	-0,006	0,94	6,7	-0,046	1,00	2,8	-0,003
		40	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			0,32	7,3	0,621	0,47	27,7	-0,010	0,51	24,4	-0,002	0,51	32,3	-0,044	0,51	33,9	-0,054
						0,98	2,0	-0,067	1,00	1,4	-0,003	0,97	2,8	0,022	0,96	2,8	0,031
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
			0,54	39,8	-0,056	0,50	23,2	-0,001	0,50	27,5	0,003	0,51	33,5	-0,020	0,50	28,1	-0,002
						1,01	3,1	0,005	1,00	3,0	-0,009	0,94	6,7	-0,046	1,00	2,8	-0,003
		20	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			0,32	7,4	0,614	0,44	22,3	0,074	0,52	29,2	-0,053	0,50	25,4	0,022	0,53	52,3	-0,177
						1,08	1,1	-0,090	0,97	2,0	0,028	1,01	2,6	-0,017	0,89	3,0	0,093
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
			0,54	39,7	-0,056	0,50	26,6	0,007	0,50	27,8	-0,002	0,50	33,5	-0,020	0,50	28,1	-0,002
						1,01	1,0	0,017	1,00	2,8	-0,003	0,94	6,7	-0,046	1,00	2,8	-0,003
		10	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			0,33	7,9	0,597	0,43	118,7	-0,547	0,57	57,9	-0,265	0,48	126,4	-0,522	0,45	17,5	0,145
									0,83	3,5	0,121	0,82	1,1	0,233	1,15	3,8	-0,082
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
			0,54	38,9	-0,048	0,50	26,4	0,009	0,50	28,3	-0,005	0,51	33,6	-0,020	0,50	28,2	-0,002
						1,54	1,9	0,044	1,02	1,0	0,008	1,01	3,2	-0,017	0,94	6,5	-0,044

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с														
			0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ
2	HTLS	5	0,31	6,9	0,642	0,21	33,7	0,637	0,32	13,1	0,474	0,31	13,2	0,496	0,26	16,2	0,588
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ
			0,54	39,6	-0,073	0,50	26,7	0,004	0,50	27,0	0,004	0,50	33,6	-0,020	0,50	27,9	-0,001
						0,98	1,0	0,035	0,98	2,6	0,000	0,95	6,8	-0,044	1,00	2,9	-0,006

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с														
			0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ
3	MP	120	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			0,37	24,9	0,286	0,47	18,1	0,093	0,51	23,9	0,002	0,50	28,4	-0,009	0,50	28,5	-0,007
						0,99	2,8	-0,126	1,00	1,1	-0,005	0,99	2,7	0,002	0,99	2,7	0,003
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
			0,55	35,4	-0,024	0,40	69,7	-0,676	0,50	27,9	-0,002	0,51	33,5	-0,020	0,50	28,0	-0,002
						0,50	23,4	-0,006	1,00	2,8	-0,003	0,94	6,6	-0,045	1,00	2,5	-0,001
					1,00	1,4	0,001										
		100	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			0,37	24,9	0,286	0,47	18,1	0,093	0,51	23,9	0,002	0,50	28,4	-0,009	0,50	28,5	-0,007
						0,99	2,8	-0,126	1,00	1,1	-0,005	0,99	2,7	0,002	0,99	2,7	0,003
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
			0,55	35,4	-0,024	0,40	68,8	-0,670	0,50	27,9	-0,002	0,51	33,5	-0,020	0,50	28,0	-0,002
						0,50	23,4	-0,006	1,00	2,8	-0,003	0,94	6,6	-0,045	1,00	2,5	-0,001
					1,00	1,4	0,001										
		80	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			0,37	24,9	0,286	0,47	18,5	0,090	0,51	24,0	0,001	0,50	28,3	-0,008	0,50	28,7	-0,008
						0,99	2,6	-0,125	1,00	1,0	-0,004	0,99	2,7	0,001	0,99	2,7	0,004
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
0,55	35,4		-0,024	0,51	26,1	-0,005	0,50	27,9	-0,002	0,51	33,5	-0,020	0,50	28,1	-0,002		
				1,00	2,6	0,001	1,00	2,8	-0,003	0,94	6,6	-0,045	1,00	2,9	-0,004		

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с														
			0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			$f, \Gamma\text{ц}$	$A, \text{МВТ}$	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	$A, \text{МВТ}$	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	$A, \text{МВТ}$	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	$A, \text{МВТ}$	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	$A, \text{МВТ}$	ξ
3	MP	60	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			0,37	24,9	0,286	0,47	23,2	0,034	0,50	29,3	-0,049	0,50	27,2	0,002	0,50	29,5	-0,016
						0,98	1,6	-0,099	1,01	1,5	0,021	1,00	2,6	-0,002	0,98	2,8	0,009
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
			0,55	35,4	-0,024	0,51	25,3	-0,005	0,50	27,2	0,002	0,51	33,5	-0,020	0,50	28,1	-0,002
						1,00	2,7	0,001	1,00	2,6	-0,002	0,94	6,6	-0,045	1,00	2,8	-0,003
		40	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			0,37	24,8	0,287	0,47	27,3	-0,006	0,51	24,4	-0,001	0,51	32,3	-0,043	0,51	34,1	-0,055
						0,98	1,9	-0,069	1,00	1,4	-0,003	0,97	2,8	0,022	0,96	2,8	0,032
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
			0,55	35,3	-0,024	0,50	23,4	-0,001	0,50	27,5	0,002	0,51	33,5	-0,020	0,50	28,1	-0,002
						1,00	3,1	0,005	1,00	3,0	-0,009	0,94	6,6	-0,045	1,00	2,8	-0,003
		20	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			0,37	25,1	0,284	0,45	24,0	0,042	0,53	32,2	-0,083	0,49	25,5	0,021	0,53	51,3	-0,173
									0,96	2,1	0,049	1,01	2,5	-0,013	0,90	2,8	0,095
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
			0,55	35,2	-0,023	0,50	26,6	0,006	0,50	27,8	-0,002	0,50	33,5	-0,020	0,50	28,1	-0,002
						1,01	1,0	0,017	1,00	2,8	-0,003	0,94	6,6	-0,046	1,00	2,8	-0,003

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с																
			0–2			2–4			4–6			6–8			8–10				
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ		
		10	0,38	28,4	0,248	0,27	20,1	0,502	0,52	66,2	-0,338	0,48	113,9	-0,478	0,45	19,9	0,139		
			0,85	1,3	0,205	0,85	1,3	0,205	0,85	1,3	0,205	0,85	1,3	0,205	0,85	1,3	0,205		
			0,55	32,4	-0,011	0,50	26,3	0,010	0,50	28,3	-0,005	0,51	33,6	-0,020	0,50	28,2	-0,002		
			1,01	3,1	-0,016	1,01	3,1	-0,016	1,01	3,1	-0,016	1,01	3,1	-0,016	1,01	3,1	-0,016		
			0,36	21,1	0,337	0,20	34,5	0,647	0,31	13,2	0,486	0,31	13,1	0,496	0,27	15,7	0,570		
			0,55	38,0	-0,038	0,50	26,8	0,002	0,50	27,2	0,003	0,50	33,6	-0,021	0,50	27,9	-0,001		
		5			0,99	2,6	-0,001	0,99	2,6	-0,001	0,99	2,6	-0,001	0,99	2,6	-0,001	0,99	2,6	-0,001
					0,95	6,7	-0,044	0,95	6,7	-0,044	0,95	6,7	-0,044	0,95	6,7	-0,044	0,95	6,7	-0,044
					1,00	2,9	-0,006	1,00	2,9	-0,006	1,00	2,9	-0,006	1,00	2,9	-0,006	1,00	2,9	-0,006
					1,00	2,9	-0,006	1,00	2,9	-0,006	1,00	2,9	-0,006	1,00	2,9	-0,006	1,00	2,9	-0,006

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с																
			0-2			2-4			4-6			6-8			8-10				
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ		
4	Проні ("класичний")	120	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10				
			0,32	208,5	0,648	0,47	21,8	-0,058	0,56	32,3	0,057	0,54	34,9	0,071	0,58	35,0	0,050		
			3,81	841,7	0,895	1,00	2,6	0,016	1,05	2,5	0,928	1,00	2,4	0,542	1,03	1,6	0,131		
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10				
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ		
			0,51	49,2	0,129	0,51	24,9	-0,002	0,50	29,3	0,036	0,49	47,7	0,097	0,51	25,1	0,853	0,50	26,9
		0,93	4,3	0,094	1,00	2,5	-0,004	1,01	2,4	0,081	0,98	3,2	0,0990	1,00	2,5	-0,004			
		3,13	957,3	0,633							4,71	1982	0,883						
		100	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10				
			0,32	214,5	0,656	0,47	21,8	-0,058	0,56	32,8	0,063	0,54	34,1	0,062	0,58	35,0	0,049		
			3,49	1070	0,919	1,00	2,6	0,015	0,99	2,5	0,862	0,97	2,3	0,582	1,00	1,6	0,131		
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10				
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ		
			0,51	48,0	0,125	0,51	24,9	-0,002	0,50	29,3	0,035	0,46	27,5	0,883	0,49	48,2	0,099	0,50	26,9
		0,93	4,2	0,091	1,00	2,5	-0,004	1,01	2,4	0,079	0,98	3,3	0,090	1,00	2,5	-0,004			
		5,49	1231	0,838							5,31	3028,6	0,871						
		80	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10				
			0,36	170,6	0,628	0,48	20,2	-0,055	0,59	29,3	0,022	0,58	29,9	0,010	0,58	29,9	0,021		
			4,88	2003,2	0,875	1,00	3,3	0,151											
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10				
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ		
			0,56	62,5	0,168	0,51	24,7	0,014	0,50	33,4	0,120	0,47	57,9	0,107	0,93	3,3	0,057	0,50	26,4
		0,83	20,0	0,200	0,99	2,7	0,095	0,94	1,7	0,321	4,09	1540,7	0,657	1,00	2,4	-0,001			
		2,18	1042,2	0,957															

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с															
			0–2			2–4			4–6			6–8			8–10			
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	
4	Проні ("класичний")	60	0–2			2–4			4–6			6–8			8–10			
			0,42	54,5	1,000	0,50	30,6	-0,014	0,54	31,8	0,031	0,55	31,8	0,061	0,54	36,6	0,063	
			9,15	2572,5	0,703													
			0–3			3–6			6–9			0–5			5–10			
			0,48	48,6	0,133	0,57	8,9	-0,039	0,61	29,9	0,125	0,56	54,0	0,180	0,57	14,7	0,024	
			6,08	5354,2	0,855							0,68	53,2	0,482	8,38	3931,7	0,749	
		40	0–2			2–4			4–6			6–8			8–10			
			0,46	94,0	0,400	0,48	33,9	0,152	0,53	29,0	0,138	0,52	29,9	0,087	0,52	31,2	0,107	
			6,63	2626,7	0,797													
			0–3			3–6			6–9			0–5			5–10			
			0,53	62,8	62,8	0,53	16,4	-0,004	0,53	33,9	0,096	0,50	46,2	0,106	0,53	16,7	-0,014	
			6,49	1487,8	0,772													
		20	0–2			2–4			4–6			6–8			8–10			
			0,05	406,7	-0,082	0,05	482,2	-0,210	0,02	477,6	0,625	0,03	475,6	0,492	0,03	504,3	0,553	
			6,36	760,7	0,698													
			7,52	1699,2	0,782													
			0–3			3–6			6–9			0–5			5–10			
			9,05	415,0	0,567	0,04	718,7	0,618	-	-	-	0,45	84,2	0,539	5,87	1035,6	0,785	-
		10	0–2			2–4			4–6			6–8			8–10			
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,02	549,9	0,818	
			0–3			3–6			6–9			0–5			5–10			
			9,54	46,5	0,319	-	-	-	-	-	-	6,75	907,9	0,750	-	-	-	

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с																
			0-2			2-4			4-6			6-8			8-10				
4	Проні ("класичний")	5	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ		
			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10				
			f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ		
-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,98	30,1	0,272	-	-	-					

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с																	
			0-2			2-4			4-6			6-8			8-10					
			<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ			
4	Проні (модиф.)	120	0,33	197,4	-0,564	0,49	22,6	0,054	0,51	22,3	0,044	0,50	27,5	0,001	0,50	27,8	0,001			
			3,57	413,7	-0,906	0,96	2,6	0,001	0,98	3,5	-0,032	1,00	2,60	0,005	1,00	2,7	0,004			
			4,73	1776,6	-0,877	0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
						<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ
			0,48	122,4	-0,662										0,49	21,1	0,022			
			0,62	13,9	0,018										1,04	2,4	0,000			
			1,08	5,8	-0,273	0,51	26,2	-0,006	0,50	27,3	0,003	1,07	219,3	-0,948	0,50	27,5	0,001			
			3,55	319,9	-0,906	1,02	2,9	-0,007	1,00	2,8	-0,004	3,56	2122,9	-0,907	1,00	2,7	0,002			
			3,61	15210	-0,930							4,68	7908,8	-0,881						
			5,46	6852,2	-0,823							5,32	80,8	-0,367						
											9,98	6,3	-0,081							
					0-2			2-4			4-6			6-8			8-10			
					<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	
					0,33	118,5	-0,380	0,47	24,8	0,035	0,51	22,0	0,047	0,50	27,5	0,001	0,50	27,8	0,001	
					3,51	393,1	-0,908	0,99	2,0	0,021	0,99	3,5	-0,038	1,00	2,6	0,005	1,00	2,7	0,004	
					4,33	3260,3	-0,919													
					6,93	10,1	-0,594	0-3			3-6			0-5			5-10			
								<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	
					0,50	110,3	-0,540	0,50	28,1	-0,009	0,50	27,3	0,003	0,15	37,8	-0,167	0,50	27,3	0,002	
					0,65	11,3	0,026	1,00	2,2	-0,014	1,00	2,8	-0,003	0,51	26,4	-0,007	1,00	2,6	0,003	
			3,54	312,3	-0,907	3,04	16,3	-0,582	1,00	2,8	-0,003	0,70	21,8	-0,432						
			4,73	2244,5	-0,882							3,58	278,9	-0,906						
			5,74	2,0	-0,339							4,74	2106,1	-0,875						

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с																	
			0-2			2-4			4-6			6-8			8-10					
			<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ			
4	Проні (модиф.)	80	0,35	183,6	-0,583	0,50	22,6	0,052	0,51	21,0	0,057	0,50	27,5	0,001	0,50	27,8	0,001			
			3,70	602,5	-0,911	0,93	4,4	-1,000	0,99	4,3	-0,076	1,00	2,6	0,005	1,00	2,7	0,005			
			4,53	1466,7	-0,879															
						3-6			6-9			0-5			5-10					
			<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ
			0,14	13,2	0,284							0,49	21,3	0,021						
			0,56	86,5	-0,424							1,01	1,3	-0,424						
			0,64	20,5	-0,016	0,50	28,4	-0,009	0,50	27,3	0,003	1,04	2,8	-0,010	0,50	27,5	0,001			
			3,42	3601,1	-0,913	0,99	1,9	-0,021	1,00	2,8	-0,003	3,53	576,8	-0,906	1,00	2,6	0,002			
			4,31	7,4	-0,333							4,73	4601,6	-0,882						
		4,74	1358,0	-0,873							9,34	3,1	-0,085							
											9,84	3,7	-0,065							
					0-2			2-4			4-6			6-8			8-10			
					<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	
					0,28	55,1	-0,989													
					0,37	68,8	-0,192				0,51	20,4	0,064	0,50	27,4	0,001	0,50	27,7	0,002	
					3,73	2226,2	-0,937	0,50	29,2	-0,024	0,96	5,0	-0,097	1,00	2,6	0,005	0,99	2,9	0,000	
					6,15	5,3	-0,462													
					9,17	1305,2	-0,660													
					0-3			3-6			6-9			0-5			5-10			
			<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВТ	ξ			
			0,47	122,0	-0,649				0,50	33,0	-0,029	0,38	178,4	-0,616						
			0,62	12,1	0,033	0,51	30,3	-0,025	0,50	33,0	-0,029	0,51	24,1	0,002	0,50	27,4	0,002			
			3,74	44,9	-0,776	1,03	2,6	-0,175	0,81	5,7	-0,054	3,66	17021	-0,946	1,00	2,7	-0,002			
			9,14	2993,1	-0,714				9,41	1,5	-0,203	6,24	35,1	-0,226						
												8,85	8787,6	-0,708						

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с														
			0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ
4	Проні (модиф.)	40	0,38	101,8	-0,329	0,42	30,2	-0,008	0,46	23,7	0,021	0,45	24,7	0,018	0,45	26,8	-0,001
			9,47	1641,5	-0,677							0,69	31,6	-0,738			
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
			<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ
			0,37	144,4	-0,278				0,51	30,8	-0,012	0,18	58,4	-0,344			
			0,38	44,2	0,008	0,52	33,2	-0,044	0,71	11,7	-0,299	0,49	30,7	-0,028	0,50	27,1	0,002
		5,66	1317,8	-0,797	0,55	11,7	-0,673	6,07	4,1	-0,406	3,47	901,2	-0,881	0,93	2,4	-0,008	
		8,74	3537,9	-0,681							3,96	345,2	-0,772				
											7,08	36,7	-0,319				
		0-2			2-4			4-6			6-8			8-10			
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	
		0,37	68,6	-0,194				0,45	25,8	-0,005	0,44	31,4	-0,059	0,44	32,9	-0,072	
		2,75	72,0	-0,674	0,41	30,6	-0,039	7,90	5,8	-0,387	7,29	9,3	-0,486	7,04	11,3	-0,549	
		5,92	36,5	-0,556	9,64	5,7	-0,243										
		8,96	106,1	-0,438													
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10			
		<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	<i>f</i> , Гц	<i>A</i> , МВт	ξ	
		0,46	69,8	-0,230	0,53	31,2	-0,036	0,50	25,1	0,024	0,48	32,7	-0,035				
8,28	646,8	-0,573	8,55	3,8	-0,337	7,46	3,8	-0,508	1,07	1034,9	-0,968	0,50	25,5	0,010			
8,48	212,1	-0,425							2,67	1472,9	-0,852						
									9,38	619,8	-0,458						
									9,91	617,0	-0,366						

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с															
			0-2			2-4			4-6			6-8			8-10			
			f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	
4	Проні (модиф.)	10	0,34	70,9	-0,219	0,46	27,3	0,001	0,48	24,6	0,019	0,47	29,6	-0,020	0,47	30,2	-0,021	
			8,44	8,7	-0,360													
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10			
			f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	
			0,34	67,8	-0,349	0,52	32,2	-0,047	0,50	26,7	0,008	0,47	26,6	-0,022	0,50	25,8	0,008	
			8,82	29,2	-0,461	7,93	1,0	-0,437				7,68	61,9	-0,497	7,71	1,30	-0,380	
											8,40	34,0	-0,321					
		5	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10			
			f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	
			0,34	71,5	-0,223	0,46	27,1	0,004	0,49	24,7	0,009	0,48	29,7	-0,024	0,48	30,1	-0,025	
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10			
			f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	
			0,34	67,7	-0,326	0,52	32,3	-0,049	0,49	27,7	0,000	0,43	40,1	-0,223	0,50	26,2	0,005	
											7,47	1,20	-0,556	9,35	13,6	-0,323	7,71	3,8

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с														
			0–2			2–4			4–6			6–8			8–10		
			f , Гц	A , МВТ	ξ	f , Гц	A , МВТ	ξ	f , Гц	A , МВТ	ξ	f , Гц	A , МВТ	ξ	f , Гц	A , МВТ	ξ
5	ВП	120	0–2			2–4			4–6			6–8			8–10		
			0,36	23,1	–	0,34	25,0	–	0,39	24,5	–	0,36	24,4	–	0,38	24,5	–
			1,48	7,5	–	1,50	7,8	–	1,50	7,7	–	1,50	7,6	–	1,50	7,6	–
			0–3			3–6			6–9			0–5			5–10		
			0,37	19,2	–	0,37	20,1	–	0,34	19,8	–	0,38	15,2	–	0,38	15,3	–
			1,54	6,3	–	1,48	7,5	–	1,51	6,4	–	1,51	4,9	–	1,48	5,4	–
		0–3			3–6			6–9			0–5			5–10			
		2,33	4,9	–	2,33	4,9	–	3,05	3,1	–	2,32	3,8	–	2,32	3,8	–	
		0–2			2–4			4–6			6–8			8–10			
		0,38	23,2	–	0,37	25,0	–	0,38	24,6	–	0,38	24,5	–	0,37	24,5	–	
		1,48	7,5	–	1,50	7,8	–	1,46	7,6	–	1,50	7,6	–	1,50	7,6	–	
		0–3			3–6			6–9			0–5			5–10			
0,41	19,2	–	0,37	20,1	–	0,34	19,8	–	0,37	15,3	–	0,37	15,4	–			
1,51	6,3	–	1,49	7,6	–	1,51	6,4	–	1,51	4,9	–	1,48	5,4	–			
0–3			3–6			6–9			0–5			5–10					
2,33	4,8	–	2,33	4,8	–	3,01	3,1	–	2,28	3,8	–	2,28	3,8	–			

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с														
			0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ
5	ВП	80	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			0,37	23,2	-	0,38	25,0	-	0,38	24,6	-	0,35	24,4	-	0,38	24,5	-
			1,50	7,5	-	1,50	7,8	-	1,50	7,7	-	1,50	7,6	-	1,50	7,6	-
						2,39	4,9	-	2,39	4,9	-	2,33	4,8	-	2,39	4,8	-
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
			0,36	19,3	-	0,34	20,1	-	0,34	19,8	-	0,38	15,3	-	0,37	15,4	-
		1,49	6,3	-	1,49	7,6	-	1,51	6,4	-	1,49	4,9	-	1,48	5,4	-	
					2,36	4,8	-	3,13	3,1	-	2,28	3,8	-				
		60	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			0,39	23,1	-	0,34	25,1	-	0,37	25,1	-	0,38	24,4	-	0,38	24,5	-
			1,48	7,5	-	1,53	7,8	-	1,50	7,8	-	1,50	7,6	-	1,50	7,6	-
						2,39	4,9	-	2,39	4,9	-	2,36	4,8	-	2,39	4,8	-
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
			0,38	19,3	-	0,34	20,1	-	0,37	19,8	-	0,37	15,3	-	0,34	15,4	-
		1,49	6,3	-	1,53	7,5	-	1,51	6,4	-	1,53	4,8	-	1,48	5,4	-	
					2,36	4,8	-	3,05	3,1	-	2,26	3,8	-				
		40	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			0,38	23,2	-	0,37	25,1	-	0,37	24,6	-	0,38	24,5	-	0,37	24,5	-
			1,50	7,5	-	1,50	7,8	-	1,50	7,7	-	1,50	7,6	-	1,50	7,6	-
						2,39	4,9	-	2,39	4,9	-	2,39	4,8	-	2,39	4,8	-
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
			0,36	19,3	-	0,34	20,1	-	0,34	19,8	-	0,37	15,3	-	0,37	15,4	-
		1,51	6,3	-	1,49	7,6	-	1,51	6,4	-	1,49	4,9	-	1,48	5,4	-	
					2,36	4,8	-	3,05	3,1	-	2,30	3,8	-				

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с														
			0–2			2–4			4–6			6–8			8–10		
			f , Гц	A , МВТ	ξ	f , Гц	A , МВТ	ξ	f , Гц	A , МВТ	ξ	f , Гц	A , МВТ	ξ	f , Гц	A , МВТ	ξ
5	ВП	20	0–2			2–4			4–6			6–8			8–10		
			0,40	23,1	–	0,37	25,1	–	0,37	24,6	–	0,38	24,5	–	0,37	24,5	–
			1,50	7,5	–	1,50	7,8	–	1,50	7,7	–	1,50	7,6	–	1,50	7,6	–
						2,32	5,0	–	2,39	4,9	–	2,33	4,8	–	2,39	4,8	–
			0–3			3–6			6–9			0–5			5–10		
			0,38	19,3	–	0,39	20,0	–	0,37	19,8	–	0,38	15,3	–	0,37	15,4	–
		1,53	6,3	–	1,49	7,6	–	1,46	6,4	–	1,49	4,9	–	1,48	5,4	–	
								2,29	4,8	–	3,05	3,1	–	2,32	3,8	–	
		10	0–2			2–4			4–6			6–8			8–10		
			0,38	23,2	–	0,36	24,9	–	0,36	24,4	–	0,34	24,5	–	0,37	24,5	–
			1,50	7,5	–	1,47	7,8	–	1,47	7,6	–	1,50	7,6	–	1,50	7,6	–
						2,41	4,9	–	2,41	4,9	–	2,33	4,8	–	2,39	4,8	–
			0–3			3–6			6–9			0–5			5–10		
			0,36	19,3	–	0,34	20,1	–	0,34	19,8	–	0,38	15,3	–	0,37	15,4	–
		1,49	6,3	–	1,49	7,6	–	1,51	6,4	–	1,49	4,9	–	1,48	5,4	–	
								2,36	4,8	–	3,05	3,1	–	2,28	3,8	–	
		5	0–2			2–4			4–6			6–8			8–10		
			0,38	23,2	–	0,37	25,1	–	0,38	24,5	–	0,37	24,5	–	0,37	24,5	–
			1,50	7,5	–	1,50	7,8	–	1,50	7,7	–	1,50	7,6	–	1,50	7,6	–
						2,32	5,0	–	2,39	4,9	–	2,39	4,8	–	2,39	4,8	–
			0–3			3–6			6–9			0–5			5–10		
			0,38	19,3	–	0,34	20,1	–	0,34	19,8	–	0,38	15,3	–	0,37	15,4	–
		1,54	6,3	–	1,54	7,5	–	1,51	6,4	–	1,49	4,9	–	1,48	5,4	–	
											3,05	3,1	–	2,32	3,8	–	

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с															
			0-2			2-4			4-6			6-8			8-10			
			$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	
6	МННТ-1	120	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10			
			$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	
			0,04	469,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			1,06	23,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10			
			$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	
		0,02	483,1	-	0,55	25,7	-	0,56	26,7	-	0,01	479,3	-	0,50	27,7	-		
		0,45	38,0	-	-	-	-	-	-	-	0,36	21,2	-	-	-	-		
											0,49	27,4	-					
		100	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10			
			$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	
			0,04	469,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			1,06	23,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10			
			$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	
		0,02	483,1	-	0,55	25,7	-	0,56	26,7	-	0,01	479,3	-	0,50	27,7	-		
		0,45	38,0	-	-	-	-	-	-	-	0,36	21,2	-	-	-	-		
											0,49	27,4	-					
		80	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10			
			$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	
			0,04	469,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			1,06	23,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10			
			$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	$f, \Gamma\text{ц}$	A, MBT	ξ	
0,02	483,1	-	0,55	25,7	-	0,56	26,7	-	0,01	479,3	-	0,50	27,7	-				
0,45	38,0	-	-	-	-	-	-	-	0,36	21,2	-	-	-	-				
									0,49	27,4	-							

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с																	
			0–2			2–4			4–6			6–8			8–10					
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ			
6	МННТ-1	60	0–2			2–4			4–6			6–8			8–10					
			0,04	477,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–		
			0,74	16,9	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
			1,02	14,1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
			0–3			3–6			6–9			0–5			5–10					
			0,03	497,0	–	0,55	25,7	–	0,56	26,7	–	0,01	486,3	–	0,41	14,4	–	0,50	27,7	–
		0,50	26,0	–	–	–	–	–	–	–	0,69	12,1	–	–	–	–	–	–	–	
		0,54	41,0	–	–	–	–	–	–	–	0,72	16,3	–	–	–	–	–	–	–	
		40	0–2			2–4			4–6			6–8			8–10					
			0,06	448,3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
			0,56	64,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
			1,00	7,8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
			0–3			3–6			6–9			0–5			5–10					
			0,04	482,4	–	0,55	25,7	–	0,56	26,7	–	0,02	496,5	–	0,24	89,6	–	0,50	27,7	–
		0,35	107,6	–	–	–	–	–	–	–	0,32	19,0	–	–	–	–	–	–	–	
		0,43	43,6	–	–	–	–	–	–	–	0,47	58,5	–	–	–	–	–	–	–	
		0,98	5,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
		20	0–2			2–4			4–6			6–8			8–10					
			0,03	468,6	–	0,02	505,9	–	0,02	495,7	–	0,02	493,8	–	0,02	493,9	–	–	–	–
			6,18	1,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
			0–3			3–6			6–9			0–5			5–10					
			0,03	476,9	–	0,55	25,7	–	0,56	26,7	–	0,01	485,2	–	0,36	21,0	–	–	–	–
			–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,51	25,7	–	0,43	28,5	–	–	–	–

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с															
			0–2			2–4			4–6			6–8			8–10			
			f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	
6	МННТ-1	10	0,03	468,2	–	0,02	505,9	–	0,02	495,7	–	0,02	493,8	–	0,02	493,9	–	
			4,84	1,5	–													
			0–3			3–6			6–9			0–5			5–10			
			f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	
			0,02	476,9	–	0,54	25,9	–	0,56	26,8	–	0,01	484,7	–	0,50	27,8	–	
			0,48	28,3	–							0,51	26,5	–				
		5	0–2			2–4			4–6			6–8			8–10			
			f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	
			0,03	468,8	–	0,02	505,9	–	0,02	495,5	–	0,02	493,9	–	0,02	494,0	–	
			2,33	2,4	–													
			0–3			3–6			6–9			0–5			5–10			
			f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	f , Гц	A , МВт	ξ	
		0,02	477,0	–	0,55	25,6	–	0,57	26,4	–	0,01	484,9	–	0,50	27,6	–		
			0,49	–							0,50	26,6	–					
	2,56	–																

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с														
			0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ
6	МННТ-2	120	0,36	131,3	–	0,50	26,8	–	0,55	25,3	–	0,50	27,6	–	0,50	28,0	–
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
			0,97	17,3	–	0,64	26,4	–	0,64	27,4	–	0,27	26,3	–	0,59	27,5	–
			0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			0,36	131,3	–	0,50	26,8	–	0,55	25,3	–	0,50	27,6	–	0,50	28,0	–
		100	0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
			0,97	17,3	–	0,64	26,4	–	0,64	27,4	–	0,27	26,3	–	0,59	27,5	–
			0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			0,36	131,3	–	0,50	26,8	–	0,55	25,3	–	0,50	27,6	–	0,50	28,0	–
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с														
			0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ
6	МННТ-2	80	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ
			0,36	131,3	-	0,50	26,8	-	0,55	25,3	-	0,50	27,6	-	0,50	28,0	-
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ
			0,97	17,3	-	0,64	26,4	-	0,64	27,4	-	0,27	26,3	-	0,59	27,5	-
											0,80	22,6	-				
		60	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ
			0,98	20,8	-	0,50	26,8	-	0,55	25,3	-	0,50	27,6	-	0,50	28,0	-
			1,47	24,2	-												
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ
		0,87	14,3	-	0,64	26,4	-	0,64	27,4	-	0,42	36,7	-	0,59	27,5	-	
		0,98	17,0	-							0,53	39,0	-				
		40	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ
			0,32	10,4	-	0,50	26,8	-	0,55	25,3	-	0,50	27,6	-	0,50	28,0	-
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10		
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ
			0,91	24,5	-	0,64	26,4	-	0,50	27,6	-	0,40	24,2	-	0,59	27,5	-
		0,97	13,6	-							0,41	62,9	-				
											0,67	40,8	-				
		20	0-2			2-4			4-6			6-8			8-10		
$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$		ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ		
0,36	91,8		-	-	-	-	3,98	1,10	-	-	-	-	-	-	-		
0-3			3-6			6-9			0-5			5-10					
$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$		ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ		
0,81	17,5		-	0,64	25,9	-	0,64	27,4	-	0,79	21,5	-	0,33	15,0	-		
									0,71	26,1	-						

Продовження таблиці Е.7

№ з/п	Метод аналізу	SNR, дБ	Часовий відрізок, с																
			0-2			2-4			4-6			6-8			8-10				
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ		
6	МННТ-2	10	1,01	6,9	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,12	3,3	–		
			0-3			3-6			6-9			0-5			5-10				
			0,75	18,0	–	0,64	26,5	–	0,64	27,5	–	0,78	21,3	–	0,40	15,8	–		
																0,49	23,7	–	
			0-2			2-4			4-6			6-8			8-10				
			$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$
		7,64	1,0	–	0,53	20,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
		0-3			3-6			6-9			0-5			5-10					
		$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ	$f, \text{Гц}$	$A, \text{МВт}$	ξ
		–	–	–	0,64	26,4	–	0,64	27,4	–	0,28	29,1	–	0,59	27,5	–	–	–	–
											0,78	22,5	–						

Додаток Ж

Програмна реалізація обчислювальних засобів для online-оцінювання загрози коливного порушення стійкості ЕО

Лістинг Ж.1 – Програмна реалізація функції для визначення порядку моделі аналізованого сигналу за принципом MDL згідно з (3.5)

```
function [ModelOrder] = MDL(X)
    SignalLength = length(X);
    L = floor(0.5*SignalLength);
    H = hankel(X(1:L),X(L:SignalLength));
    [~,SingularMatrix,~] = svd(H);
    SingularValues = diag(SingularMatrix);
    MinimumDescriptionLength = [];
    for k = 0:1:(L-1)
        Buffer = -SignalLength*sum(log(SingularValues(k+1:L))) +
                SignalLength*(L-k)*log((sum(SingularValues(k+1:L))/(L-k))) + k*(2*L-k)*log(SignalLength)/2;
        MinimumDescriptionLength = [MinimumDescriptionLength; Buffer];
    end
    [~, ModelOrder] = min(MinimumDescriptionLength);
    ModelOrder = ModelOrder - 1;
end
```

Лістинг Ж.2 – Програмна реалізація функції для розрахунку параметрів сигналів методом ДПФ

```
function [Frequencies, Amplitudes] = DFTFunction(X, Fs, Accuracy, DFTPoints)
    DFTPoints = length(X);
    Amplitudes = abs(fft(X, DFTPoints));
    Amplitudes = 2*Amplitudes/DFTPoints;
    Amplitudes(1) = Amplitudes(1)/2;
    Frequencies = 0:(Fs/DFTPoints):(Fs/2-1/DFTPoints);
    Amplitudes = Amplitudes(1:length(Frequencies));
end
```

Лістинг Ж.3 – Програмна реалізація функції для розрахунку параметрів сигналів методом HTLS

```

function [Frequencies, Amplitudes, DampingRatios] =
    HTLSFunction(X, Fs, Accuracy, ModelOrder)
function [DiscardedMatrix] = RowDiscardFunction(K, Y)
    if size(Y,1) == 1
        DiscardedMatrix = [];
        return;
    end
    if K > size(Y,1)
        DiscardedMatrix = [];
        return;
    end
    if K == 1
        DiscardedMatrix = Y(K+1:size(Y,1), :);
    elseif K == size(Y,1)
        DiscardedMatrix = Y(1:K-1, :);
    else
        DiscardedMatrix = [Y(1:K-1, :); Y(K+1:size(Y,1), :)];
    end
end
SignalLength = length(X);
L = floor(0.5*SignalLength);
H = hankel(X(1:L), X(L:SignalLength));
[UnitaryMatrixU, SingularMatrix, ~] = svd(H);
Uk = UnitaryMatrixU(:, 1:ModelOrder);
UkTop = RowDiscardFunction(1, Uk);
UkBottom = RowDiscardFunction(size(Uk,1), Uk);
[~, ~, UnitaryMatrixV] = svd([UkBottom UkTop]);
V1 = UnitaryMatrixV(1:ModelOrder, ModelOrder + 1:2*ModelOrder);
V2 = UnitaryMatrixV(ModelOrder + 1:2*ModelOrder, ModelOrder +
    1:2*ModelOrder);
ResultMatrix = -V1*inv(V2);
PPoles = log(eig(ResultMatrix))*Fs;
AbsoluteDampings = -real(PPoles);

```



```

DampingRatios = AbsoluteDampings./abs(PPoles);
Frequencies = imag(PPoles)/(2*pi);
TimeRow = (0:(1/Fs):(SignalLength -1)/Fs);
Basis = exp(TimeRow.'*(AbsoluteDampings.' + 1i*2*pi*Frequencies.));
    if size(Basis(1:SignalLength)) ~= size(X)
        X = X';
    end
Amplitudes = pinv(Basis(1:SignalLength,:))*X';
BufferMatrix = [Frequencies Amplitudes DampingRatios];
end

```

Лістинг Ж.4 – Програмна реалізація функції для розрахунку параметрів сигналів методом МР

```

function [Frequencies, Amplitudes, DampingRatios] =
    MatrixPencilFunction(X, Fs, Accuracy, ModelOrder)
SignalLength = length(X);
L = floor(0.5*SignalLength);
H = hankel(X(1:L), X(L:SignalLength));
[~, SingularMatrix, UnitaryMatrixV] = svd(H);
AbsoluteRealOfSingularMatrix = abs(real(SingularMatrix));
[~, Indexes] = sort(diag(-AbsoluteRealOfSingularMatrix));
V = UnitaryMatrixV(:, Indexes);
V = V(:, 1:ModelOrder);
Eigenvalues = eig(pinv(V(1:length(V)-1, :))* (V(2:length(V), :)));
PPoles = log(Eigenvalues)*Fs;
AbsoluteDampings = -real(PPoles);
DampingRatios = AbsoluteDampings./abs(PPoles);
Frequencies = imag(PPoles)/(2*pi);
TimeRow = (0:(1/Fs):(SignalLength -1)/Fs);
Basis = exp(TimeRow.'*(AbsoluteDampings.' + 1i*2*pi*Frequencies.));
    if size(Basis(1:SignalLength,:)) ~= size(X)
        X = X';
    end
Amplitudes = pinv(Basis(1:SignalLength,:))*X;
end

```

Лістинг Ж.5 – Програмна реалізація функції для розрахунку параметрів сигналів модифікованим методом Гільберта-Хуанга

```
function [FilteredFrequencies,FilteredAmplitudes] =
    МННТ2(X,Fs,Accuracy,TrimRatio)
IMF = emd(X); {реалізацію функції emd взято за посиланнями з [38]}
Indexes = 1:size(IMF,1);
HilbertTransform = hilbert(IMF);
HilbertTransform = HilbertTransform(Indexes,:);
InstantaneousAmplitudes = abs(HilbertTransform);
InstantaneousPhases = unwrap(angle(HilbertTransform));
InstantaneousFrequencies = abs(diff(InstantaneousPhases))/
    (2*pi*((length(X)-1)/Fs)/(size(IMF,1)-1));
InstantaneousFrequencies = [InstantaneousFrequencies(1,:);
    InstantaneousFrequencies];
[D1,D2] = size(InstantaneousFrequencies);
for i = 1:D2
    Frequencies(i) = mean(InstantaneousFrequencies((1 + floor(TrimRatio*D1*0.01)):
        (D1 - floor(TrimRatio*D1*0.01)),i));
    Amplitudes(i) = mean(InstantaneousAmplitudes((1 + floor(TrimRatio*D1*0.01)):
        (D1 - floor(TrimRatio*D1*0.01)),i));
end
end
```

Лістинг Ж.6 – Програмна реалізація функції для розрахунку параметрів сигналів “класичним” методом Проні

```
function [Frequencies, Amplitudes, DampingRatios] =
    PronyAnalysisFunction(X,Fs,Accuracy,ModelOrder)
[Numerator,Denominator] = prony(X,ModelOrder,ModelOrder);
[Residues,ResultPoles,~] = residuez(Numerator,Denominator);
PPoles = log(ResultPoles(:))*Fs;
Amplitudes = Residues(:);
AbsoluteDampings = -real(PPoles);
DampingRatios = AbsoluteDampings./abs(PPoles);
Frequencies = imag(PPoles)/(2*pi);
end
```

Лістинг Ж.7 – Програмна реалізація функції для розрахунку параметрів сигналів модифікованим методом Проні

```
function [Frequencies, Amplitudes, DampingRatios] =
    PronyAnalysisFunction2(X, Fs, Accuracy, ModelOrder, CutOffLevel, fL)
SignalLength = length(X);
L = floor(SignalLength/2);
SignalSum = 0;
    for i=1:SignalLength
        SignalSum = SignalSum + X(i);
    end
SignalAverage = SignalSum / SignalLength;
    if SignalAverage > CutOffLevel
        for i = 1:SignalLength
            X(i) = X(i) - SignalAverage;
        end
    end
    if fL > 1
        for i = (fL+1):SignalLength
            X(i-fL) = 0;
            for j = 1:fL
                X(i-fL) = X(i-fL) + (1/fL)*X(i-j+1);
            end
        end
    end
SignalLength = SignalLength - fL;
    if mod(L,2) ~= 0
        L = L - 1;
    end
P1 = L;
    if mod(L, 2) == 0
        for i = 1:P1
            for j = 1:P1+1
                ss = 0;
                for k = P1:(SignalLength-1)
                    ss = ss + X(k+2-j,1)*X(k+1-i,1);
                end
            end
        end
    end
end
```

```

        R(i,j) = ss;
    end
end
for i = 1:L
    for j = 1:L
        R1(i,j) = R(i,j+1);
    end
end
for i = 1:L
    R2(i) = R(i,1);
end
[~,SingularMatrix,VUnitaryMatrix] = svd(R1);
Spectrum = zeros(ModelOrder+1,ModelOrder+1);
for j = 1:ModelOrder
    for i = 1:((L-1)-(ModelOrder-1))
        Spectrum = Spectrum + SingularMatrix(j,j)^2*
            VUnitaryMatrix(i:i+ModelOrder,j)*
            VUnitaryMatrix(i:i+ModelOrder,j)';
    end
end
InvertedSpectrum = inv(Spectrum);
if isinf(InvertedSpectrum(1,1)) == 1
    InvertedSpectrum = pinv(Spectrum);
end
SVDMatrix = InvertedSpectrum(1+1:ModelOrder+1,1)/
    InvertedSpectrum(1,1);
L = ModelOrder;
SVDCoefficients(1) = 1;
for i=1:ModelOrder
    SVDCoefficients(i+1) = SVDMatrix(i);
end
Z = roots(SVDCoefficients);
for i = 1:L
    y(i) = X(i);
end
for i = L+1:SignalLength

```

```

    y(i) = 0;
end
for i = (L+1):SignalLength
    for j = 1:L
        y(i) = y(i) - SVDMatrix(j)*X(i-j);
    end
end
for i = 1:SignalLength
    for j = 1:L
        ExpFunction(i,j) = Z(j)^(i-1);
    end
end
Residues = inv(ExpFunction'*ExpFunction)*ExpFunction'*y';
for i = 1:L
    Amplitudes(i) = abs(Residues(i));
    Frequencies(i) = Fs*atan(imag(Z(i))/real(Z(i)))/(2*pi);
    Dampings(i) = log(abs(Z(i)))*Fs;
    DampingRatios(i) = -Dampings(i)/sqrt(Dampings(i)^2+
        (Frequencies(i)*2*pi)^2);
end
end
end
end
end

```

Додаток И

Цифровий фільтр Чебишева другого роду

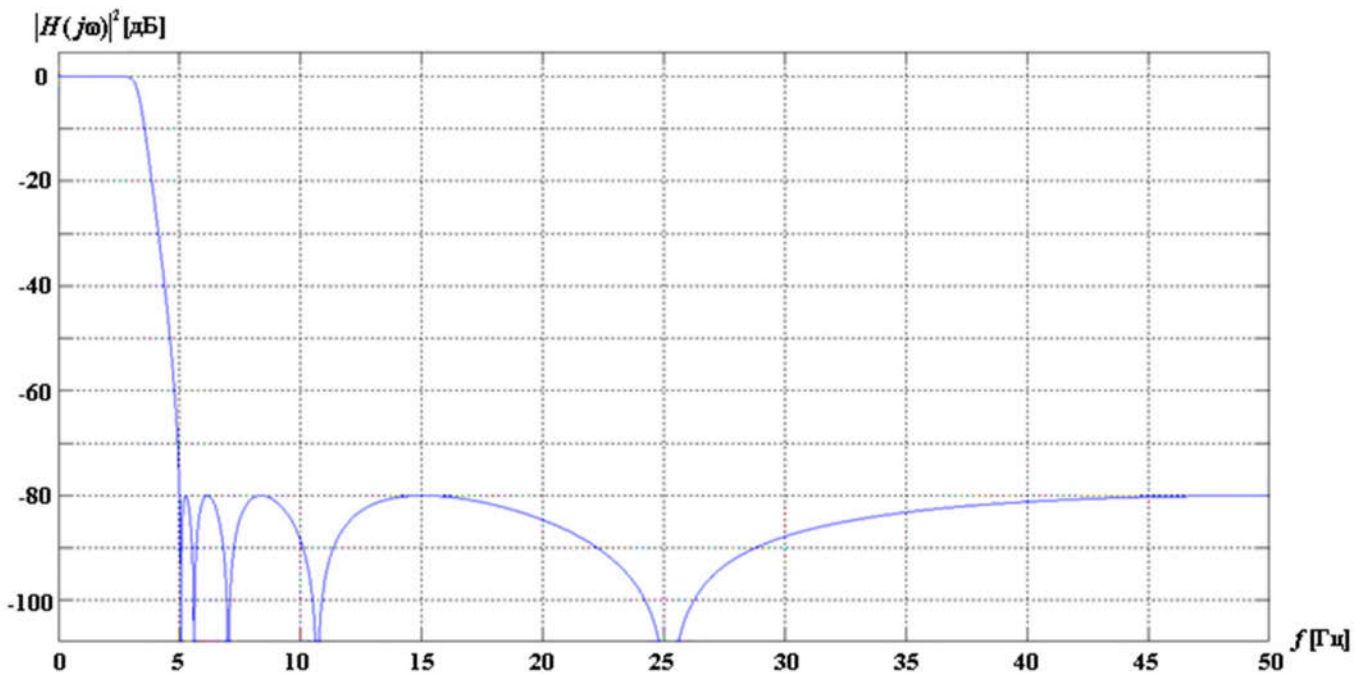


Рисунок И.1 – Графік амплітудно-частотної характеристики п'ятисекційного фільтра Чебишева другого роду

Таблиця И.1 – Коефіцієнти цифрового фільтра Чебишева другого роду

Коефіцієнти передавальної функції секції фільтра		Номер секції фільтра				
		1	2	3	4	5
чисельника	s^2	1,000000000	1,000000000	1,000000000	1,000000000	1,000000000
	s^1	-1,899719037	-1,877478403	-1,808902552	-1,565979412	0,024774884
	s^0	1,000000000	1,000000000	1,000000000	1,000000000	1,000000000
знаменника	s^2	1,000000000	1,000000000	1,000000000	1,000000000	1,000000000
	s^1	-1,910443862	-1,813880000	-1,709041083	-1,603519124	-1,530184081
	s^0	0,952174021	0,856903129	0,756118487	0,656188497	0,587227951
підсилення		0,416132423	0,351147313	0,246352865	0,121352245	0,028172944

ДОДАТОК К**Копія акта впровадження результатів дисертаційної роботи у виробництво**



А К Т

впровадження результатів науково-технічних робіт у виробництво

Даним актом засвідчується, що розроблені в Інституті електродинаміки (ІЕД) НАН України під керівництвом головного наукового співробітника д.т.н., проф. Буткевича О.Ф. програмні засоби, призначені для ідентифікації та визначення в реальному часі параметрів домінуючих мод низькочастотних електромеханічних коливань з метою виявлення та оцінювання загрози коливного порушення стійкості енергооб'єднання, використано МПП «Анігер» для розширення функцій комплексу програм верхнього об'єктного рівня електровимірювальних реєструючих приладів (ЕВРП) «Регіна-Ч», які впроваджено на електроенергетичних об'єктах Об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України.

При подальшому впровадженні ЕВРП «Регіна-Ч» на об'єктах ОЕС України також передбачено використання вищезазначених програмних засобів.


Від ІЕД НАН України:

Головний науковий співробітник
д.т.н., проф.


_____ О.Ф. Буткевич

Від МПП «Анігер»:

Завідувач сектору виробництва


_____ О.С. Михайлевський