DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2025.01.112

# СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ У КЕРУВАННІ ГТЕС: ШЛЯХ ДО ПІДВИЩЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ.

Сліпченко В.О.[1], Поляков М.О.[2]

*[1]НУ «Запорізька Політехніка», аспірант, Україна*

*[2]НУ «Запорізька Політехніка», , доктор технічних наук, професор Україна*

**Анотація.** *Запровадження спектрального аналізу миттєвої потужності навантаження у системах керування газотурбінними електростанціями відкриває нові можливості для підвищення динамічної стійкості, надійності та економічності. На основі розглянутих підходів (FFT, вейвлет-перетворення [5]) демонструється, що швидке виявлення й аналіз частотних компонент сигналу сприяє ефективному придушенню перехідних коливань і резонансних явищ. У результаті знижується час реакції на збурення, зменшується зношування вузлів турбіни, оптимізується процес спалювання палива і знижуються викиди шкідливих речовин. Крім того, спектральні методи легко інтегруються з сучасними технологіями (штучний інтелект, цифрові двійники) та підсилюють гнучкість ГТЕС у мережах із високою часткою відновлюваної енергетики. Описані прикладні результати й перспективи вказують на перспективність подальшого поширення цього підходу для вдосконалення глобальної енергетичної інфраструктури.*

**Ключові слова:** *спектральний аналіз, газотурбінна електростанція, динамічна стійкість, адаптивне керування, вейвлет-перетворення, оптимізація.*

Газотурбінні електростанції (ГТЕС) відіграють ключову роль у сучасній енергетиці завдяки своїй гнучкості, високій питомій потужності та здатності швидко реагувати на зміну навантаження. В умовах зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у загальній енергомережі на перший план виходить питання забезпечення динамічної стійкості та адаптивності генераторів, зокрема газотурбінних. Традиційні системи керування на основі PID-регуляторів забезпечують прийнятну якість [2] регулювання у стаціонарних режимах, проте в умовах різких і непередбачуваних збурень часто виявляються недостатньо ефективними. В таких умовах все більш актуальними стають підходи, що дозволяють глибше аналізувати сигнали в реальному часі та адаптувати стратегію керування до реальної динаміки навантаження.

Одним із таких інструментів є спектральний аналіз — метод, який дозволяє досліджувати сигнали в частотній області. На відміну від аналізу в часовій області, спектральний підхід дає змогу виявити [3], [4] домінуючі частотні компоненти, оцінити їх амплітуду, фазу і динаміку змін. Це особливо важливо для систем з високим рівнем коливань, вібрацій та короткочасних імпульсних процесів. Із практичної точки зору, такий аналіз дозволяє точно визначити характер збурення, його джерело, а отже — обрати найбільш ефективну реакцію на рівні регуляторів.

Серед основних методів спектрального аналізу найпоширенішим є швидке перетворення Фур'є [4] (FFT), що забезпечує високу швидкість обробки даних та є придатним для реалізації в реальному часі. Метод STFT (короткочасне перетворення Фур'є) дозволяє відстежувати зміну спектра з плином часу, а вейвлет-перетворення [5] забезпечує ще більшу гнучкість, дозволяючи зосередитись на імпульсних чи короткочасних компонентах сигналу. Усі ці методи вже застосовуються у сфері енергетики та, зокрема, в управлінні ГТЕС. Порівняння методів спектрального аналізу наведено у табл. 1.

Таблиця 1.

Порівняння методів спектрального аналізу.

| Параметр | FFT (Швидке перетворення Фур'є) | STFT (Короткочасне перетворення Фур'є) | Вейвлет-перетворення |
|---|---|---|---|
| Область застосування | Стаціонарні сигнали | Слабко нестаціонарні сигнали | Нестаціонарні та імпульсні сигнали |
| Часова локалізація | Низька | Середня | Висока |
| Частотна роздільна здатність | Висока | Середня | Висока (масштабована) |
| Обчислювальні витрати | Низькі | Середні | Високі |
| Придатність для реального часу | Так | Так | Залежить від реалізації |
| Гнучкість у виборі масштабу | Немає | Фіксоване вікно | Так |
| Основні переваги | Висока швидкість, простота реалізації | Дозволяє аналізувати зміну спектра в часі | Добра локалізація в часі та частоті, підходить для складних сигналів |
| Основні недоліки | Не підходить для нестаціонарних сигналів | Компроміс між часом і частотою | Складність реалізації та вибору функції |

Для реалізації спектрального аналізу в системах керування необхідно забезпечити якісний збір і обробку даних. Це включає використання високошвидкісних датчиків, які здатні фіксувати змінні параметри (тиск, температура, вібрації) із частотою дискретизації до десятків кілогерц [6]. Важливою умовою є також точна синхронізація сигналів, оскільки навіть незначні часові зсуви між каналами можуть викривити результати аналізу. Перед передачею сигналів на обчислювальні модулі вони проходять фільтрацію та нормалізацію, що дозволяє знизити рівень шумів та спростити подальше опрацювання.

На практиці спектральний аналіз інтегрується у систему керування у вигляді додаткового блоку, що працює паралельно з основним регулятором. Він аналізує сигнал навантаження, виділяє частотні компоненти, які перевищують допустимі пороги, і, за потреби, коригує параметри паливоподачі, положення направляючих лопаток чи інші налаштування.

Завдяки цьому система отримує можливість швидше реагувати на перехідні процеси, ефективніше пригнічувати коливання та уникати режимів, які можуть призвести до перегріву або резонансу [1]. В експериментальних умовах та у пілотних промислових упровадженнях вдалося досягти скорочення часу перехідних процесів на 10–15%, а також зменшення амплітуди коливань тиску.

Впровадження спектрального аналізу дає низку переваг. По-перше, це підвищення динамічної стійкості — система швидше реагує на зміну режиму, не допускаючи накопичення енергії коливань. По-друге, знижується рівень механічного зношування: зменшення вібрацій і екстремальних температурних навантажень продовжує ресурс [6] лопаток турбіни, підшипників, камери згоряння. По-третє, покращується якість електроенергії, оскільки знижується відхилення частоти генерації та напруги. Це критично для чутливого обладнання та стабільності всієї мережі.

Крім технічних, існують і суттєві економічні переваги. Оптимізоване регулювання паливоподачі дозволяє знизити питомі витрати палива, уникати перевитрат і неповного згоряння. Стабільні режими роботи зменшують частоту аварійних зупинок, що своєю чергою знижує витрати на ремонт і простої. Деякі пілотні впровадження показали скорочення витрат палива на 2–3% і зменшення аварійності на 20–30% за рік [2].

Особливу увагу варто приділити екологічним аспектам. Завдяки стабілізації температурного режиму вдається зменшити рівень утворення оксидів азоту [6], вуглецю та вуглекислого газу. Це дозволяє ГТЕС не лише відповідати чинним екологічним нормам, а й претендувати на “зелені” сертифікати, отримувати податкові пільги чи інші преференції.

Інтеграція спектрального аналізу з інтелектуальними системами відкриває нові перспективи. Сигнали можуть використовуватись як елементи для машинного навчання, що дозволяє створювати системи прогнозного обслуговування, виявляти тренди деградації обладнання, реалізовувати самонавчальні регулятори [3]. У поєднанні з концепцією “цифрового двійника” це формує основу для повноцінної цифрової трансформації ГТЕС.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що спектральний аналіз стає одним із ключових інструментів модернізації систем керування газотурбінних електростанцій. Його впровадження забезпечує підвищення стабільності, надійності, економічної доцільності та екологічності, що є критично важливим у сучасному енергетичному середовищі. Гнучкість, яку він надає, дозволяє ГТЕС ефективно виконувати роль балансуючої генерації в умовах зростаючої частки ВДЕ, сприяючи стабільності всієї енергетичної системи.

Висновки

Спектральний аналіз дозволяє істотно покращити динамічну стійкість, надійність та екологічну ефективність роботи газотурбінних електростанцій. Завдяки застосуванню FFT, STFT та вейвлет-перетворень можливе своєчасне виявлення критичних частотних компонентів, адаптивне регулювання процесів та оптимізація режимів згоряння. Це, у свою чергу, сприяє зниженню зношування вузлів, економії палива і дотриманню сучасних екологічних вимог. Спектральний підхід є важливою складовою цифрової трансформації ГТЕС, особливо у контексті їхньої інтеграції в енергосистеми з високою часткою ВДЕ.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Boyce, M. P. Gas Turbine Engineering Handbook, 4th ed. Gulf Professional Publishing, 2012.
2. Basu, R. “Load Frequency Control of Gas Turbine Generators.” Energy, 183, 2019, 813–825.
3. Li, G., Qiu, Z., & He, Y. “Spectral Analysis in Power Systems: A Review.” IEEE Transactions on Power Delivery, 31(4), 2016, 1783–1793.
4. Oppenheim, A. V., & Schafer, R. W. Discrete-Time Signal Processing, 3rd ed. Prentice Hall, 2009.
5. Mallat, S. A Wavelet Tour of Signal Processing, 3rd ed. Academic Press, 2008.
6. Rahman, M. M., Thong, N. D., & Kadir, M. Z. A. A. “An Overview of Gas Turbine Research and Developments.” Renewable and Sustainable Energy Reviews, 75, 2017, 183–197.

# SPECTRAL ANALYSIS IN GTPP CONTROL: A PATH TO ENHANCED DYNAMIC STABILITY AND EFFICIENCY.

Vitalii Slipchenko, Mykhailo Poliakov.

**Abstract.** *The implementation of spectral analysis of instantaneous load power in gas turbine power plant (GTPP) control systems opens up new opportunities for enhancing dynamic stability, reliability, and efficiency. Based on the considered approaches (FFT, wavelet transform [5]), it is demonstrated that rapid detection and analysis of the signal's frequency components contribute to effective suppression of transient oscillations and resonance phenomena. As a result, the response time to disturbances is reduced, turbine component wear is minimized, fuel combustion processes are optimized, and harmful emissions are decreased. Furthermore, spectral methods can be easily integrated with modern technologies (artificial intelligence, digital twins), enhancing the flexibility of GTPPs in grids with a high share of renewable energy sources. The described practical results and prospects indicate the feasibility of further extending this approach to improve the global energy infrastructure.*

**Keywords:** *spectral analysis, gas turbine power plant, dynamic stability, adaptive control, wavelet transform, optimization.*

## REFERENCE

1. Boyce, M. P. Gas Turbine Engineering Handbook, 4th ed. Gulf Professional Publishing, 2012.
2. Basu, R. “Load Frequency Control of Gas Turbine Generators.” Energy, 183, 2019, 813–825.
3. Li, G., Qiu, Z., & He, Y. “Spectral Analysis in Power Systems: A Review.” IEEE Transactions on Power Delivery, 31(4), 2016, 1783–1793.
4. Oppenheim, A. V., & Schafer, R. W. Discrete-Time Signal Processing, 3rd ed. Prentice Hall, 2009.
5. Mallat, S. A Wavelet Tour of Signal Processing, 3rd ed. Academic Press, 2008.
6. Rahman, M. M., Thong, N. D., & Kadir, M. Z. A. A. “An Overview of Gas Turbine Research and Developments.” Renewable and Sustainable Energy Reviews, 75, 2017, 183–197.