



осуществляться со скоростью передвижения базовой машины, максимальная величина которой не должна превышать 150 метров в час.

На основе выполненного расчета напряженного состояния гибких труб на барабане рекомендованы его параметры. Проведены расчеты напряженно – деформированного состояния гибких труб, проходящих через направляющую дугу установки гибких труб, в зависимости от конструктивных параметров (радиуса направляющей дуги R ; размеров поперечного сечения трубы d), от воздействия внешних нагрузок, а также влияния углов поворота сечений от растяжения.

Анализ результатов расчетов показывает, что для выбора наиболее оптимального размера радиуса направляющей дуги для различных диаметров труб необходимо руководствоваться двумя ограничениями: влиянием перерезывающей силы для малых диаметров труб и величиной радиуса кривизны направляющей дуги для всех диаметров труб.



ГЛАВА 8. DOI:10.30888/978-617-7414-51-2.0-004

МОДЕЛЮВАННЯ СИГНАЛІВ КОНТРОЛЮ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГАЗОТУРБІННИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Вступ

Енергетичні системи відносять до класу складних технологічних систем. Такому ж загальному визначенню відповідають і газотурбінні електростанції (ГТЕ). Сутність процесу функціонування ГТЕ полягає у перетворенні хімічної енергії газоподібного палива в електричну енергію, що видається споживачам. З технічної точки зору ГТЕ являє собою керований апаратно-програмний комплекс. Характеристиками процесу функціонування ГТЕ є потужність вироблення електроенергії, надійність роботи технічних підсистем, економічні показники експлуатації та ін. [1], [2], [3], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26].

Ряд складних технічних систем, до яких відносять ГТЕ, при дослідженні їх роботи розглядають як системи масового обслуговування (СМО). Спочатку розглянемо загальні властивості ГТЕ як СМО, базуючись на результатах аналізу наукових публікацій, у тому числі [1], [2], [3], [5], [8], [22], [23]. Структура СМО передбачає інформаційне забезпечення, до якого належать, у першу чергу, завдання потоку прийнятих вимог (заявок), кількість каналів обслуговування, інформаційна технологія обслуговування вимог. Потік вимог характеризується випадковими моментами їх надходження в систему то описується відповідними випадковими процесами. Таким чином, ГТЕ має на вході потік вимог, а на виході – потік обслуговування. Спрощену схему функціонування такої СМО проілюстровано на рис. 1.

Дослідження ГТЕ як об'єкта класу СМО можливе у двох варіантах процесів функціонування [1], [2], [3], [22], [23], які зазначимо як режими А і Б:

1. *Режим А.* Функціонування ГТЕ як одного з джерел електроенергії в єдиній енергосистемі. У такому режимі ГТЕ, як джерело малої потужності, працює з постійною в часі потужністю, при цьому потік вимог задовольняється без часової затримки. У цьому варіанті електростанція може містити декілька газотурбінних електростанцій, що паралельно працюють.

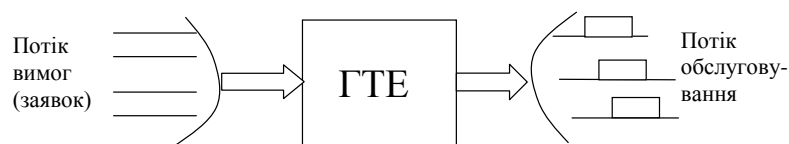


Рис. 1 – Процес функціонування газотурбінної електростанції як СМО

2. *Режим Б.* Функціонування ГТЕ як автономного джерела електроенергії. У такому режимі потужність роботи ГТЕ є змінною в часі відповідно до потоку заяв споживачів. У цьому варіанті ГТЕ є автономною установкою зі змінним режимом навантаження для забезпечення електроенергією підприємств та житлових комплексів невеликих міст і селищ. Актуальне використання ГТЕ в



агропромислового комплексу (АПК), особливо з використанням наявного та відновлюваного палива – сировини АПК.

Під аналізом динаміки сигналів розуміють сукупність процесів поточного, а іноді й довгострокового спостереження динаміки (виникнення, розвитку, змін) статистичних характеристик сигналів при дії перешкод на основі їх вимірювань, а саме при: аналізі процесів функціонування ГТЕ і визначенні сигналів контролю; розробці методу моделювання сигналів контролю параметрів функціонування ГТЕ; розробці математичних моделей сигналів і перешкод в інформаційних каналах ГТЕ, базуючись на фізичних процесах їх формування; імітаційному комп'ютерному моделюванні сигналів і перешкод та створенні відповідних баз даних; обробці результатів випробувань окремих вузлів та модулів ГТЕ; статистичній обробці даних вимірювань з метою оцінки ефективності управління роботою ГТЕ в різних режимах.

Циклічність роботи електростанції з часовим циклом $T_0 = 24$ години обумовлена циклічним обертанням нашої планети і підтверджена значною кількістю спостережень та результатами практичних вимірювань характеристик роботи енергогенеруючих установок і енергетичних мереж [1], [2], [3], [4] [5].

Випадковість, або стохастичність, формування процесу роботи електростанції обумовлюється дією значної кількості випадкових факторів, зокрема, включенням та виключенням споживачів у різні моменти часу з різною тривалістю, інтенсивністю та різною кількістю.

Таким чином, під сигналом потужності роботи ГТЕ розуміють функціональну залежність за часом характеристики вироблення електроенергії (потужності), що обумовлена невідповідними і випадковими факторами. У цьому випадку електростанція, або енергомережа, розглядається як система масового обслуговування.

Сигнал потужності роботи ГТЕ досліджується для двох типових режимів роботи: А – забезпечення постійного значення потужності роботи на певному інтервалі часу (доба, тиждень, місяць) в мережі загального електропостачання міста, області або регіону; Б – забезпечення змінного значення потужності роботи за заданим графіком, що задається конкретними споживачами електроенергії на відповідному інтервалі часу.

Іншим найбільш вагомим фактором під час роботи ГТЕ є температура зовнішнього повітря $T^{\circ}C$, при цьому повітря, поряд із паливним газом, є одним з основних компонентів роботи газотурбінного двигуна. У більшості наукових праць залежність потужності роботи ГТЕ від температури повітря $T^{\circ}C$ визначають не на функціональному рівні, а на статистичному внаслідок випадкового характеру зміни зовнішніх метеорологічних умов.

На основі проведених досліджень щодо структури і задач функціонування ГТЕ в двох режимах роботи, можливостей застосування відомих методів аналізу динаміки сигналів контролю функціонування ГТЕ, ролі сигналу потужності роботи ГТЕ визначимо наступні вимоги, а також перелік задач, які необхідно вирішити для аналізу динаміки сигналу потужності роботи ГТЕ: розробку математичної моделі сигналу потужності проводити з урахуванням



відомих моделей і реальних даних вимірювань сигналу потужності, отриманих під час експлуатації ГТЕ у різних кліматичних зонах; розроблені моделі сигналів потужності для стаціонарного (режим А) та автономного (режим Б) режимів повинні враховувати дії усіх факторів, включаючи статистичну залежність від температури зовнішнього повітря; визначити на основі розроблених моделей алгоритм та програмне забезпечення для: а) статистичної обробки даних вимірювань сигналу потужності; б) формування бази реалізації сигналу потужності при комп'ютерному моделюванні; в) добового прогнозу сигналу потужності при формуванні сигналу управління програмним регулятором подачі газу; г) обчислення довірчого інтервалу із заданою ймовірністю значень сигналу потужності при вирішенні задачі контролю вироблення потужності ГТЕ.

Отже, метод моделювання сигналу потужності роботи ГТЕ, як й інших сигналів, повинен бути комплексним методом і використовувати ряд положень інших методів, наприклад використання методу статистичних випробувань (метод Монте-Карло) під час формування бази даних реалізацій сигналу потужності, а саме: 1) врахування всієї сукупності факторів формування і динаміки процесу роботи ГТЕ, в першу чергу врахування температури зовнішнього повітря, що відіграє істотну роль в забезпеченні ефективної роботи газотурбінних електростанцій на відміну від інших, наприклад теплових, атомних; 2) визначення алгоритмів та програмного забезпечення для отримання результатів статистичної обробки даних вимірювань сигналу потужності роботи ГТЕ, які відображають: параметричний простір і статистичні характеристики запропонованої моделі; 3) завдання необхідних початкових умов та апріорних даних, що використовуються для обґрунтування моделі; 4) визначення алгоритмів і відповідного програмного забезпечення комп'ютерного моделювання реалізацій сигналів і подальшого обчислення їх характеристик; 5) відповідність обраної моделі вимогам аналізу динаміки і побудови прогнозу добового графіка роботи ГТЕ; 6) відповідність моделі реальному процесу формування потужності роботи ГТЕ.

Умовна схема перевірки запропонованої моделі на відповідність вищенаведеним умовам подана на рис. 2.

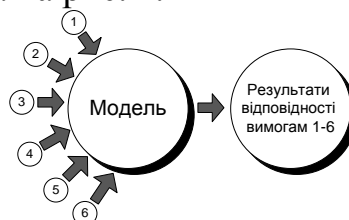


Рис. 2 – Схема перевірки моделі на відповідність вимогам

8.1. Моделювання сигналів контролю в окремих режимах ГТЕ.

Конструктивна модель сигналу потужності вироблення електроенергії ГТЕ в режимі А

Для розробки такої моделі були використані результати статистичної обробки даних вимірювань сигналу потужності роботи ГТЕ в режимі А для ряду діючих ГТЕ в різних кліматичних зонах. Відмічалось, що в такому режимі



ГТЕ повинна забезпечувати постійний рівень сигналу потужності електроенергії як надійного постачальника електроенергії на заданому інтервалі часу, наприклад: доба, тиждень, місяць, сезон, рік. При цьому на значних інтервалах часу можуть бути і відключення ГТЕ для виконання планових регламентних або необхідних ремонтних робіт, що обумовлює втрату певного обсягу реальних даних вимірювань для їх статистичної обробки.

Наведемо основні результати розробки математичної моделі сигналу потужності роботи ГТЕ в режимі А, враховуючи такі факти [2]: модель сигналу потужності роботи ГТЕ розробляється вперше для нового об'єкта електроенергетики; необхідно визначити найбільш вагомі фактори, включаючи метрологічні, що впливають на динаміку сигналу потужності роботи; визначити основні етапи розробки моделі з використанням результатів статистичної обробки реальних даних вимірювань сигналу та її конкретизації для діючої ГТЕ; розробка моделі сигналу потужності роботи ГТЕ є першим етапом розробки методу аналізу динаміки сигналу потужності роботи ГТЕ як основного сигналу контролю функціонування ГТЕ.

Задані статистичні матеріали. Вимірювальними засобами ГТЕ, робота яких проводилась у різних кліматичних зонах, були отримані статистичні дані вимірювань сигналу потужності роботи ГТЕ в режимі А у вигляді такої матриці на часовому інтервалі спостереження $t \in [0, kT_0]$:

$$\mathbf{P}_n(t_k) = \begin{pmatrix} P_1(t_1) & \dots & P_1(t_{48}) \\ \vdots & & \vdots \\ P_n(t_1) & \dots & P_n(t_{48}) \end{pmatrix}, t_k \in [0, T_0] \tag{1}$$

де $T_0 = 1$ доба = 24 години = 1440 хв = 86400 с.

Залежно від значення k часовий інтервал спостереження $t \in [0, kT_0]$ визначає добу, тиждень, місяць, сезон або рік. Матриця даних вимірювань сигналу потужності роботи задана на часовій ґратці з рівномірним кроком $\Delta t = 30$ хв у більшості випадків на місячному інтервалі часу, вибірково посезонно: січень взимку, квітень навесні, липень влітку та жовтень восени.

Під час вимірювання даних потужності проводилася добова реєстрація (вимірювання) метеорологічних даних із рівномірним кроком $\Delta t = 30$ хв, у першу чергу температури $T^{\circ}C$ зовнішнього повітря під час роботи ГТЕ, також у вигляді такої матриці:

$$\mathbf{T}^{\circ}_n(t_k) = \begin{pmatrix} T^{\circ}_1(t_1) & \dots & T^{\circ}_1(t_{48}) \\ \vdots & & \vdots \\ T^{\circ}_n(t_1) & \dots & T^{\circ}_n(t_{48}) \end{pmatrix}, t_k \in [0, T_0] \tag{2}$$

Формування накопичення статистичних даних вимірювань базується на використанні загальної моделі сигналу потужності роботи у вигляді складового нестационарного періодичного з періодом T_0 випадкового процесу:

$$\xi(\omega, t) = \sum_{j=1}^n \zeta_j(\omega, t + (j-1)T_0), \omega \in \Omega, t \in [0, T_0] \tag{3}$$

а матриця (1) є матрицею добових реалізацій такого процесу, заданих на рівномірній ґратці часового інтервалу $[0, T_0]$ з кроком $\Delta t = 30$ хв.



Така загальна модель сформована складовими (добовими) компонентами векторного нестационарного періодичного з періодом $T_0=24$ години випадкового процесу

$$\Xi_n(\omega, t) = (\zeta_1(\omega, t), \zeta_2(\omega, t), \dots, \zeta_n(\omega, t)), \quad (4)$$

заданого на всій часовій осі $t \in (-\infty, \infty)$ або на півосі $t \in [0, \infty)$.

По суті, векторний процес є породжуючим процесом складової загальної моделі (3). Надалі така загальна модель буде конкретизована для кожної ГТЕ, але на початковому етапі побудови моделі необхідно врахувати всю множину можливих варіантів. У той самий час така загальна модель не виключає випадків, що реалізації матриці (1) належать не тільки одному, а ряду різних періодичних випадкових процесів як компонент вектора (4).

Подальша статистична обробка даних вимірювань сигналу потужності проводилася за умови гаусового закону розподілу досліджуваного сигналу. Статистична гіпотеза про гаусів закон розподілу сигналу була підтверджена після формування статистик однорідних реалізацій нестационарного періодичного випадкового процесу.

Методика статистичної обробки даних вимірювань матриці (1) полягає в проведенні таких етапів [1] [2]; [3]; [7]; [8]; [9]; [10]; [11], [13], [14], [16], [22].

1. *Формування ансамблю однорідних реалізацій досліджуваного сигналу.* На базі використання методу перевірки статистичних гіпотез формуються такі статистичні гіпотези: H_0 – основна гіпотеза, що реалізації $\{P_j(t_k), j = \overline{1, n}, k = \overline{1, 48}\}$ періодичного з періодом T_0 випадкового процесу належать одному і тому самому випадковому періодичному процесу; H_1 – альтернативна гіпотеза.

По суті, результати такої статистичної обробки даних вимірювань дають можливість при підтвердженні гіпотези H_0 з відповідною ймовірністю стверджувати, що добові реалізації $P_j(t_k)$ належать одному періодичному випадковому процесу. Така перевірка статистичних гіпотез має назву перевірки досліджуваних статистик на однорідність.

Послідовність операцій формування ансамблю однорідних реалізацій є такою.

1.1. Обираємо перші дві послідовні реалізації матриці (1) даних вимірювань сигналу потужності та обчислюють послідовність значень їх різниці:

$$B_{i,(i+1)}(t_k) = P_i(t_k) - P_{(i+1)}(t_k), i = \overline{1, n-1}, k = \overline{1, 48}. \quad (5)$$

1.2. Розраховуємо середні значення отриманих різниць:

$$\bar{B}_{i,(i+1)} = \frac{\sum_{k=1}^{48} B_{i,(i+1)}(t_k)}{48}. \quad (6)$$

1.3. Обчислюємо статистична оцінка дисперсії (5):



$$s_{i,(i+1)}^2 = \frac{\sum_{k=1}^{48} [B_{i,(i+1)}(t_k) - \bar{B}_{i,(i+1)}]^2}{47}. \quad (7)$$

1.4. Обчислюємо t -статистику:

$$t_{i,(i+1)} = \frac{\bar{B}_{i,(i+1)}(\sqrt{47})}{s_{i,(i+1)}}. \quad (8)$$

1.5. Задавшись рівнем значущості, в більшості практичних випадків $\alpha = 0,05$, перевіряємо для закону розподілу Стьюдента статистичні гіпотези про однорідність реалізацій $P_i(t_k)$ і $P_{i+1}(t_k)$.

1.6. На основі проведення операцій 1.4 і 1.5 перевіряємо статистичні гіпотези про однорідність усіх можливих комбінацій попарних реалізацій матриці (1), число яких визначається числом комбінацій C_n^2 , тобто перевіряємо статистичні гіпотези про однорідність усіх пар реалізацій $P_i(t_k)$ і $P_{i+1}(t_k)$ при $i = \overline{1, n-1}$.

1.7. Таким чином, шляхом перевірки статистичних гіпотез про однорідність реалізацій матриці (1) даних вимірювань сигналу потужності роботи ГТЕ на поточному часовому інтервалі спостереження формуються ансамблі однорідних реалізацій, кожний з яких описується нестационарним періодичним випадковим процесом.

Для підвищення достовірності формування ансамблів однорідних реалізацій, отриманих із використанням t -статистик, наведемо додаткову перевірку сформованих ансамблів із використанням статистичного F -критерію Фішера. При цьому подальші операції перевірки на однорідність є такими.

1.8. Обчислюємо $W_{i,(i+1),(i+2)}$ – статистику з використанням F -критерію Фішера при перевірці рівності дисперсії різниць (5):

$$W_{i,(i+1),(i+2)} = \frac{s_{i,(i+1)}^2}{s_{i,(i+2)}^2}, \quad (9)$$

при цьому будемо вважати, що $s_{i,(i+2)}^2 > s_{i,(i+1)}^2$, що не обмежує загального випадку, оскільки в протилежному разі необхідно просто змінити нумерацію різниць (5) у зворотному порядку.

1.9. Задавшись рівнем значущості, як і раніше, наприклад, $\alpha = 0,05$, перевіряємо сформульовані раніше статистичні гіпотези на однорідність трьох реалізацій $P_i(t_k)$, $P_{i+1}(t_k)$ і $P_{i+2}(t_k)$.

Таким чином, у загальному випадку на основі підтвердження статистичної гіпотези про однорідність реалізації $P_i(t_k)$ формуються ансамблі однорідних реалізацій. Виконання наведених операцій першого етапу статистичної обробки даних вимірювань сигналу потужності роботи (1) за умови підтвердження статистичної гіпотези H_0 на основі використання двох статистичних критеріїв – t -Стьюдента та F -критерію – дають можливість сформувати m ансамблів однорідних реалізацій досліджуваного сигналу, при цьому $m \ll n$.



Таким чином, матриця даних вимірювань потужності (1) розбиваємо на m прямокутних матриць однорідних реалізацій:

$$P_n(t_k) = P_{n1}(t_k) + P_{n2}(t_k) + \dots + P_n(t_k), \quad (10)$$

при цьому $m \ll n$ і відповідно

$$n = \sum_{i=1}^m n_i, \quad t_k \in [0, 1440 \text{ хв}] = \{0, 30, 60, \dots, 1410 \text{ хв}\}. \quad (11)$$

Кожна i -та матриця $P_{ni}(t_k)$ ансамблів однорідних реалізацій одного i -го нестационарного періодичного з періодом $T_0 = 24$ години = 1440 хв випадкового процесу має такий вигляд:

$$P_{ni}(t_k) = \begin{pmatrix} P_{li}(t_1) & \dots & P_{li}(t_{48}) \\ \vdots & & \vdots \\ P_{li}(t_1) & \dots & P_{li}(t_{48}) \end{pmatrix}, \quad (12)$$

де $P_{li}(t_k)$ – є загальне позначення даних вимірювань реалізації потужності як елемента матриці (1), що одночасно належить і матриці $P_{ni}(t_k)$ - i -му ансамблю однорідних реалізацій, тому індекс li формує i -ту підмножину цілих чисел із множини $\{1, \dots, n\}$. Ансамблі однорідних реалізацій сигналу прийнято іменувати φ -серіями як синхронізовані за часом реалізації. Ансамбль таких реалізацій сигналу дає можливість використання одного з основних методів статистичної обробки нестационарних випадкових процесів – обчислення статистичних оцінок характеристик нестационарного процесу шляхом усереднення за ансамблем при фіксованих моментах часу.

2. *Перевірка статистичних гіпотез про закон розподілу досліджуваних статистик:* 1. Формуємо ансамбль однорідних добових реалізацій матриці (1) випадкового процесу. Така послідовність (ансамбль) однорідних реалізацій має назву φ -серій нестационарного періодичного з періодом $T_0=24$ години випадкового процесу; 2. На заданій часовій ґратці значень однорідних реалізацій задаємо послідовність фіксованих моментів часу, наприклад, на добовому інтервалі часу $t \in \{3, 7, 10, 13, 16, 19, 22 \text{ години}\}$; 3. Будуємо гістограму для кожного фіксованого моменту часу t ; 4. Формулюємо дві гіпотези про закон розподілу значень добових однорідних реалізацій потужності електроспоживання конкретної організації; 5. Задавшись рівнем значущості, як правило, $\alpha = 0,05$, перевіряємо підтвердження гіпотези про закон розподілу досліджуваних статистик, як правило, для більшості практичних випадків на базі використання статичного критерію χ^2 ; 6. У більшості практичних випадків проведений статистичний аналіз реальних даних вимірювань досліджуваного сигналу конкретної ГТЕ [2], [8], [9], [22], [23] підтверджує нормальний закон розподілу значень добових реалізацій для фіксованих моментів часу.

Підтвердження статистичної гіпотези про нормальний закон розподілу даних вимірювань сигналу базується на виконанні умов центральної граничної теореми [1], [2], [3], [8], [11], [13], [22], а саме – процес роботи ГТЕ формується дією значної кількості незалежних споживачів електроенергії.

За результатами двох етапів статистичної обробки даних вимірювань



матриці (1) конкретизуємо загальну модель (3) потужності процесу роботи ГТЕ в режимі А на часовому інтервалі спостереження $t \in [0, jT_0]$, тобто на інтервалах доба, тиждень, місяць, сезон та рік у вигляді складового нестационарного періодичного з періодом $T_0=24$ години випадкового процесу:

$$\xi_A(\omega, t) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \zeta_{ji}(\omega, t) I(\Delta t_i, t), \quad (13)$$

де $\sum_{j=1}^{n_i} \zeta_{ji}(\omega, t) I(\Delta t_i, t)$ - модель послідовності в кількості n_i складових одного i -го

нестационарного періодичного випадкового процесу як компоненти векторного процесу (4), об'єднання $\Delta t_i = \bigcup_{j=1}^{n_i} [(j-1)T_0; jT_0]$ n_i добових інтервалів $t \in [0, T_0]$ складових i -го періодичного процесу, реалізації якого за індексом j задовольняють статистичну гіпотезу H_0 однорідності, тобто належність сукупності реалізацій одному i -му процесу, а індикаторна функція $I(\Delta t_i, t)$ визначена формулою:

$$I(\Delta t_i, t) = \begin{cases} 1, & t \in \Delta t_i \\ 0, & t \notin \Delta t_i \end{cases}. \quad (14)$$

Далі модель складового нестационарного періодичного випадкового процесу (12) будемо подавати виразом

$$\xi_A(\omega, t) = \sum_{i=1}^m \eta_i(\omega, \Delta t_i, t), \quad (15)$$

де, як відмічалось вище, $\Delta t_i = \bigcup_{j=1}^{n_i} [(j-1)T_0; jT_0]$ - об'єднання добових часових

інтервалів $[(j-1)T_0, T_0]$ складових одного періодичного процесу $\zeta_i(\omega, t)$ - i -ї компоненти вектора (4).

Таким чином, за результатами перших двох етапів статистичної обробки реальних даних вимірювань сигналу потужності загальна модель сигналу конкретизована до умов та особливостей діючої ГТЕ.

Породжуючий векторний нестационарний періодичний випадковий процес вигляду (4) також має конкретизовану структуру, при цьому сукупність компонент вектора істотно зменшилась, оскільки $m \ll n$, тобто

$$\Xi_m(\omega, t) = (\zeta_1(\omega, t), \zeta_2(\omega, t), \dots, \zeta_m(\omega, t)). \quad (16)$$

Продовжимо далі методику статистичної обробки даних вимірювань сигналу потужності роботи ГТЕ.

3. *Визначення статистичних оцінок характеристик досліджуваного сигналу.* На цьому етапі наведемо алгоритми визначення статистичних оцінок: математичного сподівання; дисперсії; одновимірної щільності розподілу (емпіричної щільності) як функцій часу досліджуваного сигналу потужності, модель якого описується виразом (15). Добові реалізації цього сигналу як дані вимірювань його потужності задані загальною матрицею (1), яку на основі використання статистичного методу перевірки на однорідність реалізацій розбиваємо на m матриць вигляду (12) - ансамблів однорідних реалізацій.

Алгоритми визначення статистичної оцінки математичного сподівання i -



го ансамблю даних вимірювань однорідних реалізацій потужності роботи:

$$\hat{a}_i(t_k) = \frac{\sum_{l=1}^{n_i} P_{il}(t_k)}{n_i}, k = \overline{1,48}, i = \overline{1,m}. \quad (17)$$

Послідовність таких статистичних оцінок описується m -вимірним вектором статистичних оцінок математичних сподівань як функцій часу у вигляді

$$\hat{\mathbf{a}}_1(t_k) = (\hat{a}_1(t_k), \hat{a}_2(t_k), \dots, \hat{a}_m(t_k)). \quad (18)$$

Алгоритм визначення статистичних оцінок дисперсії i -го ансамблю однорідних реалізацій даних вимірювань потужності роботи описується:

$$s_i^2 = \frac{\sum_{l=1}^{n_i} [P_{il}(t_k) - \hat{a}_i(t_k)]^2}{n_i - 1}. \quad (19)$$

Відповідний m -вимірний вектор статистичних оцінок дисперсій як функцій часу описується у вигляді $s_m^2(t_k) = (s_1^2(t_k), s_2^2(t_k), \dots, s_m^2(t_k))$.

Для аналізу статистичних оцінок одновимірної щільності розподілу i -ї компоненти моделі досліджуваного сигналу (15) використовуємо послідовність операцій з i -м ансамблем однорідних реалізацій, які були описані раніше на другому етапі статистичної обробки даних вимірювань. При цьому основні операції такі: визначаємо множину фіксованих моментів часу однорідних реалізацій; формуємо відповідні варіаційні ряди значень реалізацій; будуємо послідовність гістограм у задані моменти часу; обираємо теоретичну щільність розподілу ймовірностей; формуємо дві статистичні гіпотези; адавшись, як правило, рівнем значущості $\alpha = 0,05$, на основі використання статистичного критерію χ^2 виконуємо перевірку статистичних гіпотез, що дає змогу визначити теоретичний закон розподілу досліджуваного нестационарного процесу у фіксований момент часу.

Проведений аналіз наукових праць із функціонування електростанцій [2], [9], [10], [17], [22], [23] підтвердив той факт, що порівняно з роботою теплових, атомних установок потужність газотурбінних електростанцій істотно залежить від температури зовнішнього повітря $T^{\circ}C$.

Для підтвердження цього факту в дослідженні був проведений попередній порівняльний аналіз статистичних даних вимірювань потужності роботи ГТЕ вигляду матриці (1) і матриці синхронізованих за часом даних вимірювань температури $T^{\circ}C$ зовнішнього повітря вигляду (2). Коротко зупинимося на результатах такого порівняльного аналізу як відповідного етапу досліджень.

4. *Оцінка впливу температури $T^{\circ}C$ зовнішнього повітря на динаміку сигналу потужності роботи.* За основу порівняльного аналізу матриць даних вимірювань (1) і (2) під час роботи ГТЕ у різних кліматичних зонах були взяті ансамблі однорідних реалізацій сигналу потужності роботи ГТЕ в режимі А вигляду матриці (12). Таким ансамблям ставились у відповідність ансамблі залежностей $T^{\circ}C$, тобто відповідні рядки матриць (2).

Основна увага під час проведення досліджень була приділена виявленню



статистичного взаємозв'язку між інтенсивністю сигналу потужності та температурою [2], [17], [22], [23]. При фіксованих моментах часу $t \in [0, T_0]$ розраховували коефіцієнт кореляції за формулою

$$\hat{r}_i = \frac{\sum_{l=1}^{n_i} [P_{li}(t_k) - \hat{a}_i(t_k)] [T_{li}^o(t_k) - \hat{T}_i^o(t_k)]}{S_{P_i}(t_k) \cdot S_{T_i}(t_k)}, k = \overline{1,48}, \quad (20)$$

де відповідно були обчислені такі статистичні характеристики: середнє значення сигналу потужності роботи при фіксованих значеннях часу $t_k, k = \overline{1,48}$ шляхом усереднення за ансамблем однорідних реалізацій за формулою (2.46), тобто $\hat{a}_i(t_k) = \frac{1}{n_i} \sum_{l=1}^{n_i} P_{li}(t_k)$; середнє значення температури T^oC при фіксованих значеннях часу $t_k, k = \overline{1,48}$

$$\hat{T}_i^o(t_k) = \frac{1}{n_i} \sum_{l=1}^{n_i} T_{li}^o(t_k); \quad (21)$$

– дисперсія даних вимірювань сигналу потужності за формою(19), тобто

$$s_i^2 = \frac{\sum_{l=1}^{n_i} [P_{li}(t_k) - a_i(t_k)]^2}{n_i - 1};$$

– дисперсія даних вимірювань температури T^oC

$$s_{T_i}^2(t_k) = \frac{\sum_{l=1}^{n_i} [T_{li}^o(t_k) - \hat{T}_i^o(t_k)]^2}{n_i - 1}.$$

за результатами статистичної обробки даних вимірювань для діючих ГТЕ у різних кліматичних зонах мінімальне значення \hat{r}_i задовольняє нерівність $\tilde{r}_i > -0,65$ або $\tilde{r}_i > |-0,65|$, при цьому

$$\max_{t_k} |T_{j,i}(t_k) - T_{(j+1),i}(t_k)| \leq 3^oC, k = \overline{1,48}. \quad (22)$$

Результати статистичного порівняльного аналізу показали істотний вплив температури на динаміку потужності роботи ГТЕ. При цьому всі контрольовані фактори, за винятком природно випадкових, не змінювалися.

Таким чином, модель сигналу потужності роботи (15) в режимі А залежить від температури T^oC як від аргументу:

$$\xi_A(\omega, T^o, t) = \sum_{i=1}^m \eta_i(\omega, T^o, \Delta t_i, t), \quad (23)$$

тобто є випадковою функцією трьох аргументів (змінних), а саме: ω – випадкової події з простору випадкових подій $\omega \in \Omega$; часу t , заданого на інтервалі спостереження $t \in [0, nT_0]$; температури $T^oC \in [T_{\min}^o, T_{\max}^o]$, де, враховуючи кліматичні зони України та СНД, $T^oC \in [-40^oC, 40^oC]$.

Наведена модель (23) враховує всі можливі варіанти роботи ГТЕ в режимі А і в подальших матеріалах будуть наведені конкретні результати її використання. Для практичного використання моделі сигналу потужності (23) виконаємо спочатку статистичні дослідження взаємозв'язку матриці даних вимірювань потужності (1) і матриці даних вимірювань температури (2) з



метою визначення динаміки зміни потужності тільки від температури, за умови, що температура $T^{\circ}C$ є незалежним від часу t аргументом.

Для реалізації цієї мети сформуємо ансамблі елементів матриці (1), які відповідають фіксованим значенням температури, взявши за основу відповідність i -го ансамблю однорідних реалізацій потужності i -му діапазону температур, і сформуємо матрицю

$$P_i(T^{\circ}_q) = \begin{pmatrix} P_{1,j}(T^{\circ}_1) & \dots & P_{1,j}(T^{\circ}_q) \\ P_{2,j}(T^{\circ}_1) & \dots & P_{2,j}(T^{\circ}_q) \\ \vdots & & \vdots \\ P_{n_i,j}(T^{\circ}_1) & & P_{n_i,j}(T^{\circ}_q) \end{pmatrix}, \quad (24)$$

де послідовність температур є упорядкованою: $T_1^{\circ} < T_2^{\circ} < \dots < T_q^{\circ}$.

Матрицю (24) можна побудувати, використовуючи первинні матриці даних вимірювань (1) і (2). Кожному фіксованому значенню температури T_q° відповідає фіксоване значення часу $t = t_q$, але матриця (24) при цьому є неупорядкованою за часом. Для подальших досліджень використаємо результати статистичної обробки матриці (24) у вигляді довірчого інтервалу потужності роботи ГТЕ в режимі А залежно від температури T_p° :

$$\bar{P}_A(T_p^{\circ}) - 2s_A(T_p^{\circ}) \leq v_A(\omega, T_p^{\circ}) \leq \bar{P}_A(T_p^{\circ}) + 2s_A(T_p^{\circ}). \quad (25)$$

Для цього довірчого інтервалу беремо такі позначення: $v_A(\omega, T_p^{\circ})$ – випадкова величина потужності роботи ГТЕ в режимі А залежно від температури T_p° з гаусовим законом розподілу; $\bar{P}_A(T_p^{\circ})$ – статистична оцінка математичного сподівання випадкової величини $v_A(\omega, T_p^{\circ})$; $s_A^2(T_p^{\circ})$ – статистична оцінка дисперсії випадкової величини $v_A(\omega, T_p^{\circ})$; заданий рівень значущості $\alpha = 0,05$ при побудові довірчого інтервалу (25), тобто довірчий інтервал (25) визначений з імовірністю 0,95 для гаусового закону розподілу.

8.2. Модель сигналу потужності роботи ГТЕ в режимі Б

Робота ГТЕ в режимі Б істотно відрізняється від її роботи в режимі А. Це пов'язано з тим фактом, що, по суті, функцію управління визначає споживач електроенергії (підприємство, населений пункт тощо). При цьому система управління – як автоматизована, так і з використанням операторів-диспетчерів – повинна забезпечити стабільне функціонування ГТЕ. Детальні дослідження функціонування ГТЕ підтвердили, що основну вагову функцію $g(t)$ управління ГТЕ в режимі Б виконує програмний регулятор подачі палива (газу).

У загальному випадку вагову функцію управління динамікою зміни потужності роботи в режимі Б $g(t)$ подають як графік енергонавантаження на заданий часовий інтервал, наприклад, добу, тиждень, місяць.

Загальна модель сигналу потужності роботи ГТЕ в режимі Б:

$$G_B(t) = g(t)P_A(t), t \in T, \quad (26)$$



де $g(t) \in [0,1]$ – вагова функція управління потужністю ГТЕ, а $P_A(t)$ – потужність роботи ГТЕ в режимі А.

Основну увагу було приділено обґрунтуванню моделі сигналу потужності роботи ГТЕ в режимі А. Тому, враховуючи результати досліджень, модель (27) режиму Б з урахуванням дії всіх факторів має більш конкретний вигляд:

$$\xi_B(\omega, T_p^o, t) = \xi_A(\omega, T_p^o, t) g(t). \quad (27)$$

Для сигналу потужності роботи ГТЕ під час розв'язання задачі контролю застосовуємо такий вираз довірчого інтервалу за аналогією до (2.43):

$$\bar{P}_B(T_p^o) - 2s_B(T_p^o) \leq v_B(\omega, T_p^o) \leq \bar{P}_B(T_p^o) + 2s_B(T_p^o), \quad (27)$$

де $v_B(\omega, T_p^o)$ – випадкова величина потужності роботи ГТЕ в режимі Б залежно від температури T_p^o з гаусовим законом розподілу; $\bar{P}_B(T_p^o)$ – статистична оцінка математичного сподівання $v_B(\omega, T_p^o)$; $s_B^2(T_p^o)$ – статистична оцінка дисперсії $v_B(\omega, T_p^o)$; заданий рівень значущості $\alpha = 0,05$ при побудові довірчого інтервалу (27), тобто довірчий інтервал (27) визначений з імовірністю 0,95 для гаусового закону розподілу. Отже, послідовність задач досліджень функціонування ГТЕ в режимі Б в основному базується на використанні результатів розв'язку задач дослідження режиму А. Що стосується вагової функції управління $g(t)$, то в більшості випадків $g(t)$ є періодичною з періодом $T_0 = 24$ години детермінованою функцією на тижневому часовому інтервалі спостереження.

Висновки.

1. Аналіз відповідності відомих моделей випадкових сигналів вимогам, що ставляться до моделі сигналу потужності, показав необхідність розробки нової моделі сигналу потужності роботи ГТЕ на базі концепції моделі нестационарного періодичного випадкового процесу.

2. Розроблені моделі сигналу потужності роботи ГТЕ в режимах А і Б з урахуванням найбільш вагомих факторів формування такого сигналу, а саме: випадковість у часі, добова періодичність, функціональна залежність від температури зовнішнього повітря. Вплив цих факторів визначений за результатами статистичної обробки експериментальних даних вимірювань сигналу потужності роботи ГТЕ.

3. Запропонована модель сигналу потужності роботи ГТЕ дає можливість врахувати основні особливості процесів функціонування ГТЕ для підвищення ефективності роботи в заданих режимах і різних кліматичних зонах.

4. Визначені основні положення математичного моделювання процесів функціонування ГТЕ, які передбачають побудову моделей сигналів вимірювального контролю та управління, для яких характерні нестационарність і періодичність у часі та випадковий характер впливу багатьох факторів.