

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ СИНХРОНІЗОВАНИХ ВИМІРІВ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІД ЧАС ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ

**О.С.Яндульський**, докт.техн.наук, **А.Б.Нестерко**  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.  
e-mail: nesterko@fea.kpi.ua

*Використання системи моніторингу перехідних режимів (СМПР) для реєстрації режимних параметрів електроенергетичної системи (ЕЕС) та подальшої ідентифікації її динамічних характеристик дозволяє значно підвищити ефективність заходів по збереженню стійкості ЕЕС. Ефективним засобом отримання математичної моделі системи є ідентифікація за даними зареєстрованих перехідних режимів. Складність проведення активних експериментів та стохастична природа ЕЕС обумовлюють актуальність використання методів ідентифікації систем, що здатні швидко визначити детерміновану модель ЕЕС шляхом пасивного експеримента. В роботі досліджено особливості ідентифікації та аналізу моделі електроенергетичної системи для задач оптимального керування перехідним процесом зміни частоти обертання роторів синхронних генераторів. Бібл. 8, рис. 2.*

**Ключові слова:** система моніторингу перехідних режимів, Ганкелева інформаційна матриця, електроенергетична система, підпросторова ідентифікація.

Однією з важливих задач керування ЕЕС є визначення місця виникнення аварійної події, оцінка її наслідків та формування керуючих впливів для стабілізації системи. Аналіз даних, отриманих за допомогою системи моніторингу перехідних режимів (СМПР), дозволяє визначити характер та ступінь взаємної залежності режимних параметрів електрично з'єднаних об'єктів ЕЕС, передумови виникнення та розвитку аварійних ситуацій.

Електроенергетична система – це динамічна система, що постійно перебуває під дією збурень різної природи. Характер процесів, що відбуваються в ЕЕС, має детерміновано-стохастичний характер. При незначних відхиленнях режимних параметрів детермінована частина ЕЕС може бути описана лінійною моделлю, а стохастична – моделлю нестационарного випадкового процесу [7]. Для задач ідентифікації перехідних процесів (ПП) зміни частоти ЕЕС прийняті наступні твердження:

- при визначених типах збурень процеси зміни частоти в ЕЕС можуть бути описані лінійною моделлю [5];
- ЕЕС є спостережуваною через точки встановлення СМПР та керованою через точки прикладання керуючих впливів (при керуванні перехідними процесами зміни частоти) [5];
- похибки вимірювань та шуми процесів – центровані, стаціонарні білі шуми, некорельовані з входами системи.

Розмір електроенергетичної мережі та характер процесів, що в ній відбуваються, вимагають використання комплексних заходів захисту від порушень у роботі, що виникають через перевантаження ліній електропередачі, втрату статичної стійкості, значні відхилення системної частоти від номінальних значень тощо. Розробка та налаштування системних засобів керування передбачає знання математичної моделі об'єкта керування. Модель ЕЕС складається з математичних моделей її елементів та моделей зв'язків між ними. Зміни у моделях зв'язків або елементів, наприклад, при зміні складу основного генеруючого обладнання, призводять до зміни моделі ЕЕС. Тому актуальним є дослідження процесу ідентифікації моделі ЕЕС на основі використання синхронізованих вимірів зареєстрованих перехідних режимів.

**Аналіз відомих методів ідентифікації.** Математичне моделювання великих ЕЕС супроводжується труднощами, пов'язаними з відсутністю повної інформації про структуру і параметри системи та складністю опису нестационарних нелінійних систем. За відсутності всіх необхідних (для синтезу моделі) відомостей про об'єкт невідомі характеристики можна опосередковано отримати, проаналізувавши перехідні процеси системи. Для визначення полюсів характеристичного поліному динамічної системи широкого розповсюдження набув метод Проні, заснований на теорії статистичного аналізу сигналів, що використовує метод найменших квадратів для мінімізації критерію адекватності

моделі [4]. Метод пучка матриць (Matrix Pencil) дозволяє провести пряму ідентифікацію полюсів характеристичного поліному нелінійної системи [1]. Проте для формування моделі системи необхідно також ідентифікувати нулі характеристичного поліному. Використання методу ERA (Eigensystem realization algorithm) дозволяє отримати математичну модель ЕЕС у формі змінних стану, але потребує імпульсної характеристики системи, отримання якої для ЕЕС утруднене. Перспективними методами ідентифікації нестационарних, нелінійних систем є методи, що базуються на перетворенні Гільберта-Хуанга і використовують розкладання сигналу на емпіричні моди (EMD). Проте побудова лінійних моделей за результатами аналізу емпіричних мод утруднена інтерпретацією результатів [3].

Підпросторові методи (N4SID [7], CVA [8], MOESP [6]) дозволяють провести ідентифікацію лінійної моделі ЕЕС у формі (1), при пасивному експерименті – у темпі, близькому до реального часу за наявності шумів у даних СМПП. При ідентифікації моделі ЕЕС дані пасивного експеримента повинні відображати реакцію системи на можливі збурення. При цьому «величина» реакції повинна бути більшою за «величину» шуму процесу

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k, \quad y_k = Cx_k + Du_k + v_k, \quad (1)$$

$$E \begin{bmatrix} w_p & (w_q^T & v_q^T) \\ v_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{bmatrix} \delta_{pq} \geq 0,$$

де  $A, B, C, D$  – матриці лінійної моделі системи у формі змінних стану;  $w_k, v_k$  – шуми вимірювань та шуми процесу відповідно (центровані, стаціонарні білі шуми, некорельовані з входами);  $Q, S, R$  – коваріаційні матриці шумів;  $E$  – математичне очікування;  $\delta_{pq}$  – дельта Кронекера.

**Метою** даної роботи є дослідження ефективності підходу до визначення лінійної моделі ЕЕС по даних, отриманих за допомогою СМПП на основі використання підпросторових методів (N4SID) ідентифікації систем.

Використаний у роботі підхід до ідентифікації моделі ЕЕС включає наступні етапи:

- побудова Ганкелевих інформаційних матриць з вимірів входів-виходів системи;
- QR факторизація Ганкелевих матриць;
- сингулярний розклад проєкції порядкового простору Ганкелевої матриці вимірювань виходу на Ганкелеву матрицю входу для визначення розширеної матриці спостережуваності або Калмановських оцінок змінних стану  $\hat{X}$ .
- розв'язок системи (2), отримання детермінованої частини моделі (матриці  $A, B, C, D$ ) та стохастичної ( $\varepsilon$ , матриці  $Q, S, R$ )

$$\begin{pmatrix} \hat{X}_{i+1} \\ Y_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{X}_i \\ U_i \end{pmatrix} + \varepsilon. \quad (2)$$

Перевагою такого підходу є можливість явного задання порядку моделі, що ідентифікується. Оцінка порядку моделі може бути виконана на основі відомої інформації про структуру системи або опосередковано з використанням сингулярного розкладу. Використання методу головних компонент дозволяє сформувати представлення простору даних коваріаційної матриці зареєстрованих процесів у вигляді ортогональних власних підпросторів [2]. Аналогічне визначення має сингулярний розклад Ганкелевої інформаційної матриці. Для моделей систем, заданих у формі змінних стану, сингулярні числа Ганкелевої інформаційної матриці опосередковано вказують на розмірність моделі динамічної системи, перехідний процес якої досліджується.

#### **Ідентифікація моделі тестової системи на основі використання підпросторових методів.**

Для дослідження ефективності запропонованого підходу на основі підпросторових методів ідентифікації було використано модель тримашинної системи (рис. 1, а), яка досліджувалася у програмному забезпеченні (ПЗ) PowerFactory. Результати розрахунку перехідних процесів у ПЗ PowerFactory на основі методів Ейлера та Рунге-Кутта для чисельного розв'язування диференціальних рівнянь та точних математичних моделей елементів ЕЕС використовуються для перевірки якості ідентифікації. Вихідні для ідентифікації дані отримані в результаті розрахунку перехідного процесу зміни частоти обертання роторів синхронних генераторів (СГ) та входять у перелік режимних параметрів, що реєструються СМПП.

Використана у дослідженнях модель тримашинної системи містить три синхронні генератори потужністю 255 МВА кожний, що описуються математичною моделлю 6-го порядку. Синхронні ге-

нератори обладнані автоматичними регуляторами збудження типу IEEEХ1 (5-й порядок моделі). На СГ1 встановлено автоматичний регулятор швидкості обертання турбіни типу IEEEГ1 (7-й порядок моделі). У використаній моделі (рис. 1, а) опір прямої послідовності всіх ЛЕП, що з'єднують шини, до яких приєднані СГ, складає  $6.81+10.24j$  Ом. Вихідні дані для ідентифікації включають перехідний процес зміни частоти обертання роторів синхронних генераторів СГ1, СГ2, СГ3 (рис. 1, в) та ПП зміни електричної потужності СГ (рис. 1, б) при стрибкоподібному збільшенні активної потужності навантаження Н1 на 20% (10 МВт) на 2-й секунді.

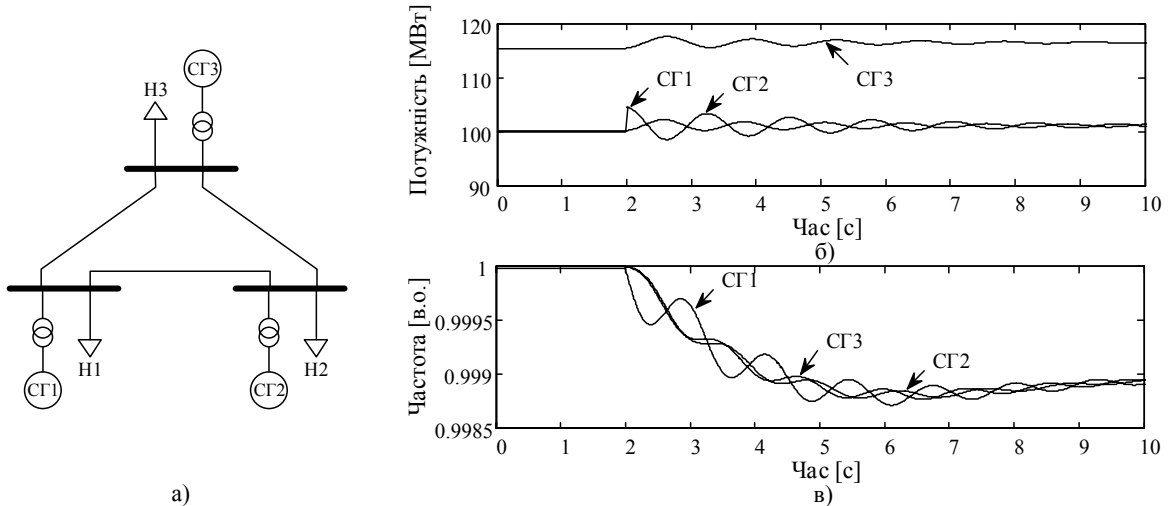


Рис. 1

Сингулярний розклад Ганкелевої інформаційної матриці показав, що оптимальною для опису перехідного процесу зміни частоти одного синхронного генератора (рис. 1, а) є модель, порядок якої більший третього (рис. 2, а). Для аналізу перехідного процесу зміни частоти системи (рис. 2) було використано модель 4-го порядку, що відповідає СГ з урахуванням перехідних процесів в обмотці статора [5]. При дослідження взаємного руху траєкторій зміни частоти обертання роторів СГ1, СГ2, СГ3 необхідно враховувати динаміку кожного агрегата, тому при ідентифікації тримашинної ЕЕС (рис. 1, а) модель системи повинна бути 12-го порядку.

Розрахунок перехідного процесу зміни частоти обертання роторів СГ, ідентифікованої підпросторовими методами (N4SID) лінійної моделі тримашинної системи, показано на рис. 2, б.

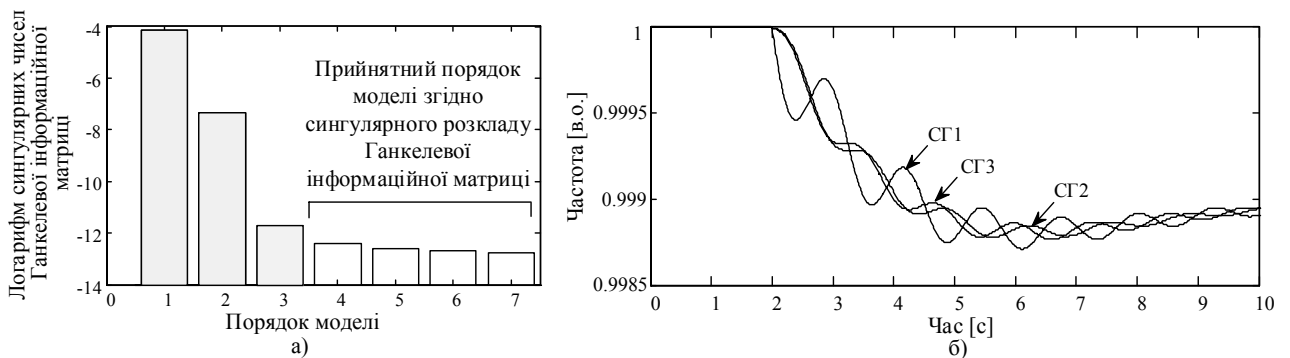


Рис. 2

Середнє квадратичне відхилення реакції (ПП зміни частоти обертання роторів СГ) ідентифікованої системи (12-го порядку) по відношенню до реакції вихідної моделі в ПЗ PowerFactory (40-го порядку) складає  $3.8828 \cdot 10^{-04}$ ,  $3.8709 \cdot 10^{-04}$ , та  $3.7526 \cdot 10^{-04}$  відповідно для СГ1, СГ2, СГ3, що свідчить про адекватність ідентифікованої моделі.

**Висновки.** У статті проаналізовано основні етапи ідентифікації динамічної моделі електроенергетичної системи та визначено підходи до вибору структури моделі системи та її порядку. Отримані результати свідчать, що при оцінці порядку моделі ЕЕС доцільно використати сингулярний розклад Ганкелевої інформаційної матриці, побудованої за даними перехідного процесу системи, яка досліджується. Сингулярний розклад даних перехідного процесу зміни частоти обертання ротора СГ свідчить про 4-й порядок моделі, яка описує вказані ПП. При необхідності моделювання процесів взаємного руху траєкторій зміни частоти обертання роторів синхронних генераторів модель 12-го порядку

для тримашинної системи точно відображає перехідний процес. Отримані результати показали, що використання підпросторових методів дозволяє ідентифікувати адекватну відносно процесів зміни частоти обертання роторів СГ модель ЕЕС за даними перехідних режимів, що реєструються СМІР.

УДК 621.311.001.57

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ  
СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВО ВРЕМЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ**

**А.С.Яндульский, докт.техн.наук, А.Б.Нестерко**

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,**

**пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина,**

**e-mail: nesterko@fea.kpi.ua**

*Использование системы мониторинга переходных режимов (СМІР) для регистрации режимных параметров электроэнергетической системы (ЭЭС) и дальнейшей идентификации ее динамических характеристик позволяет значительно повысить эффективность мероприятий по сохранению устойчивости электроэнергетической системы. Эффективным средством получения математической модели системы является идентификация по данным зарегистрированных переходных режимов. Сложность проведения активных экспериментов и стохастическая природа ЭЭС обуславливают актуальность использования методов идентификации систем, которые способны быстро определить детерминированную модель ЭЭС путем пассивного эксперимента. В работе исследованы особенности идентификации и анализа модели электроэнергетической системы для задач оптимального управления переходным процессом изменения частоты. Библи. 8, рис. 2.*

**Ключевые слова:** система мониторинга переходных режимов, Ганкелева информационная матрица, электроэнергетическая система, подпространственная идентификация.

**POWER SYSTEM MODEL IDENTIFICATION USING SYNCHRONIZED MEASUREMENTS OF TRANSIENT MODES**

**O.S. Yandulskyy, A.B. Nesterko**

**National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»,**

**pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.**

**e-mail: nesterko@fea.kpi.ua**

*Using the wide area measurement system (WAMS) for electric power system (EPS) mode parameters registration and further EPS dynamic characteristics identification can significantly improve the effectiveness of measures to preserve the stability of the power system. Effective means of the EPS mathematical model obtaining is to identify it according to the recorded transients. The complexity of active experiments and stochastic nature of EPS determine the relevance of the use of methods of identification systems, which are able to identify the deterministic model of the EPS robustly, during passive experiment. This paper investigates the features of identification and analysis of power system model for optimal control during transient frequency change. References 8, figures 2.*

**Keywords:** wide area measurement system, Hankel matrix, electric power system, subspace identification.

1. Crow M.L., Singh A. The matrix pencil for power system modal extraction // IEEE Transactions on Power Systems. – 2005. – Vol. 20.1. – Pp. 501–502.
2. De Moor Bart. The singular value decomposition and long and short spaces of noisy matrices // IEEE Transactions on Signal Processing. – 1993. – Vol. 41.9. – Pp. 2826–2838.
3. Han Song. Hilbert-Huang Transform Based Nonlinear and Non-Stationary Analysis of Power System Low Frequency Oscillation and Its Application // Power System Technology. – 2008. – Vol. 4. – Pp. 13–15.
4. Lu J.J., Guo J., Tian F., Wu Z. Power system oscillation mode analysis and parameter determination of PSS based on Prony method // Power System Technology. – 2004. – Vol. 15. – Pp. 187–190.
5. Kundur P. Power system stability and control. – New York: McGraw-hill, 1994. – 1176 p.
6. Qin S. Joe. An overview of subspace identification // Computers engineering. – 2006. – Vol. 30. – Pp. 1502–1513.
7. Van Overschee, B. De Moor. N4SID: subspace algorithms for the identification of combined deterministic and stochastic systems // Automatica. – 1994. – Vol. 30. – Pp. 75–93.
8. Katayama T., Tanaka H. An approach to closed-loop subspace identification by orthogonal decomposition // Automatica. – 2007. – Vol. 43. – Pp. 1623–1630.

Надійшла 15.04.2015

Остаточний варіант 08.07.2015