

УДК 621.313.322-81

МЕТОДИКА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ПРУЖНОЇ МОДЕЛІ ВАЛОПРОВОДУ ТУРБОАГРЕГАТУ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ КРУТИЛЬНИХ КОЛИВАНЬ**Ю.В. Куєвда, С.М. Балюта**, докт. техн. наук

Національний університет харчових технологій,

вул. Володимирська 68, Київ, 01601, Україна

e-mail: julia@kuevda.com, epem2011@ukr.net

Порівняно математичні моделі різної розмірності з кінцевим числом ступенів свободи валопроводу потужного турбоагрегату, які використовуються для розрахунку крутильних коливань валопроводу турбогенератора. Проведено розрахункові дослідження перехідних процесів при ввімкненні турбогенератора на паралельну роботу з електричною системою з холостого ходу при використанні різних математичних моделей валопроводу та порівняння крутильних моментів. Розроблено методику ідентифікації параметрів багатомасової моделі валопроводу турбоагрегату за допомогою ітеративного методу спряжених градієнтів та евристичного методу генетичного алгоритму. Проведені розрахункові дослідження показали ефективність розробленої методики. Бібл. 12, рис. 6.

Ключові слова: турбогенератор, валопровід, багатомасова модель, ідентифікація параметрів, генетичний алгоритм, метод спряжених градієнтів.

Вступ. Для розрахунків валів потужних турбоагрегатів на пошкодження від дії крутильних коливань під час електромеханічних перехідних процесів потрібно обрати адекватну модель валопроводу, яка з урахуванням пружності достатньо точно відображає властивості механічної системи. Оскільки однією з основних задач розрахунків є визначення характеру змін механічних напружень у різних перетинах валопроводу, зокрема визначення перетинів з максимальними напруженнями та подальший розрахунок зміни дотичних напружень у цих перетинах за часом, необхідно окрему увагу приділити вибору механічної моделі валопроводу, яка б відповідала обраному способу моделювання електромеханічної системи в цілому для вирішення поставлених задач дослідження.

У літературі представлені такі види моделей валів потужних турбоагрегатів: пружна багатомасова з різною кількістю мас чи скінченновимірна [9], неперервна [3] та гібридна [8], яка є поєднанням двох попередніх моделей. Однак автори представлених моделей не порівнювали значення крутильних моментів, отриманих за допомогою точних і спрощених моделей, і відповідно можливість спрощених моделей з достатньою точністю відображати процеси в механічній частині валопроводу турбоагрегату. Таким чином, обґрунтування структури спрощеної механічної моделі вала турбоагрегату та розробка методики розрахунку її параметрів для подальшого моделювання електромеханічних перехідних процесів в електроенергетичних системах, що містять потужні турбоагрегати, є актуальною задачею.

Математична модель та результати розрахунків. Для моделювання перехідного процесу в турбоагрегаті використовується єдина система рівнянь електромеханічної системи, без розділення на механічну та електромагнітну частини.

Модель турбоагрегату, що працює паралельно з електричною системою, можна записати в просторі станів у такому вигляді (без урахування регуляторів збудження та частоти) [5, 6, 2]:

$$\frac{d}{dt} \Psi = U(\Phi) - RI - K_1 \Omega K_2 \Psi ; \quad (1)$$

$$\Psi = XI ; \quad (2)$$

$$J \frac{d}{dt} \Omega = K_3 I^T K_4 \Psi - M + C\Phi - D\Omega ; \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \Phi = \Omega , \quad (4)$$

де $\Psi = (\psi_d \ \psi_q \ \psi_{rd} \ \psi_{rq} \ \psi_f)^T$ – вектор потокозчеплень; $I = (i_d \ i_q \ i_{rd} \ i_{rq} \ i_f)^T$ – вектор струмів; $R = \text{diag}(r_s \ r_s \ r_{rd} \ r_{rq} \ r_f)$ – діагональна матриця активних опорів; X – матриця індуктивних опорів обмоток генератора; $U = (U_d \ U_q \ 0 \ 0 \ U_f)^T$ – вектор напруг електричної системи та обмотки збудження; $\Omega = (\omega_\Gamma \ \omega_{T1} \ \dots \ \omega_{Tn})^T$ – вектор кутових частот точкових мас валопроводу; $\Phi = (\varphi_\Gamma \ \varphi_{T1} \ \dots \ \varphi_{Tn})^T$ – вектор кутів закручення точкових мас; $M = (0 \ M_{T1} \ \dots \ M_{Tn})^T$ – вектор моментів турбіни; J – матриця моментів інерції точкових мас; C – матриця коефіцієнтів жорсткості ділянок між точковими масами; D – матриця коефіцієнтів механічного демпфірування (вигляд матриць J , C та D буде надано нижче); K_1, K_2, K_3, K_4 – матриці перетворень: $K_1 = (1 \ Z)^T$, $K_2 = \begin{pmatrix} Y & Z \\ Z & Z \end{pmatrix}$, $K_3 = k(1 \ Z)$, $K_4 = \begin{pmatrix} Y & Z \\ Z & Z \end{pmatrix}$, $Y = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$, де Z – нульові матриці відповідної розмірності; k – коефіцієнт пропорційності, що враховує базисні величини генератора.

Більш детально розглянемо механічну частину моделі [рівняння (3)]. Застосовуємо пружно-масову модель валопроводу, яка враховує визначену кількість мас. Схематизацію пружно-масової моделі валопроводу можна проводити за допомогою класичних алгоритмів, що наведені в [5, 1]. Однак при використанні цієї моделі необхідно вирішити питання вибору достатньої кількості мас та методу визначення значень параметрів моделі, які забезпечать результати, наближені до розрахованих за точною моделлю. Наприклад, отримані за допомогою методу дискретизації параметри не дають точні частоти крутильних коливань, які є дуже важливими для моделювання резонансних явищ та інших перехідних процесів. Для забезпечення адекватності спрощеної механічної моделі пропонується провести ідентифікацію параметрів моделі відомими методами параметричної ідентифікації [4, 12] з використанням еталонної розрахункової моделі або даних, які отримані за вимірами у досліді з реальним об'єктом. Метою ідентифікації є забезпечення наближення деяких параметрів еталонної та спрощеної розрахункової моделі за обраним критерієм якості з застосуванням відповідних методів.

У нашому випадку таким критерієм буде близькість значень власних частот крутильних коливань вала турбоагрегату, отриманих за точною та спрощеною моделями, та точність моделювання величин, що характеризують електромеханічні перехідні процеси.

Порядок ідентифікації параметрів спрощеної механічної моделі розглянемо на прикладі турбоагрегату, що складається з турбіни К-200-130 та турбогенератора ТГВ-200. За еталонну модель приймемо 112-масову систему валопроводу. Модель була побудована за даними креслення вала турбоагрегату (рис. 1, 2) за методом прямої дискретизації систем з розподіленою масою [1]. Для розрахунків параметрів еталонної моделі вал турбоагрегату умовно був поділений на 112 циліндричних ділянок з радіусом r_i та довжиною l_i , внутрішній радіус у всіх однаковий – $r = 0,05$ м. Точкові маси з відповідним моментом інерції ділянки $\hat{J}_i = \frac{1}{2} \gamma \pi l_i (r_i^4 - r^4)$ ($i = 1 \dots 112$, γ – густина матеріалу) розташовували в середині кожної з ділянок і розраховували коефіцієнти жорсткості між точковими масами, які отримували за такою формулою: $\hat{C}_{j,j+1} = (\tilde{C}_j^{-1} + \tilde{C}_{j+1}^{-1})^{-1}$, $j = 1 \dots 111$, де $\tilde{C}_i = \frac{2\pi G}{(l_i/2)(r_i^4 - r^4)}$ ($i = 1 \dots 112$, G – модуль пружності матеріалу).

Власні числа коливань такої системи знаходять з власних чисел матриці $J^{-1}C$ [5], де матриця J діагональна, а її елементи обчислюються за формулами $J_{i,i} = \hat{J}_i$, $J_{i,j} = 0$, $i \neq j$;

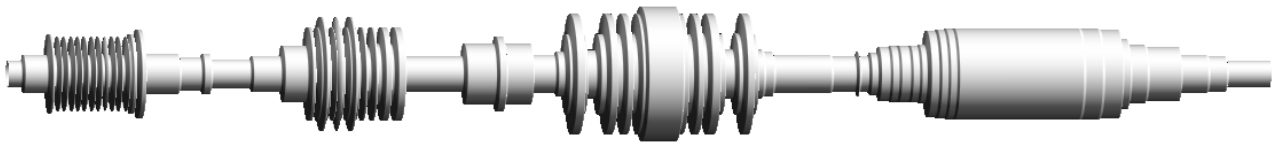


Рис. 1

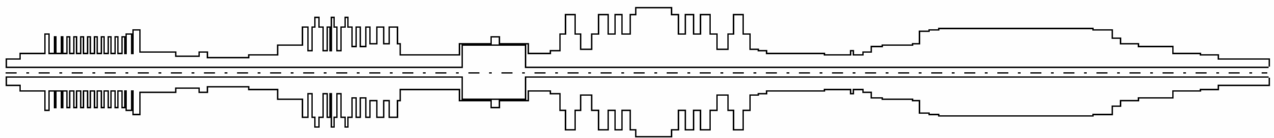


Рис. 2

матриця C трьохдіагональна, а її елементи на діагоналях обчислюються за формулами $C_{i,i} = \hat{C}_{i-1,i} + \hat{C}_{i,i+1}$, $C_{i,i-1} = \hat{C}_{i-1,i}$, $C_{i-1,i} = \hat{C}_{i-1,i}$, $\hat{C}_{0,i} = 0$, $\hat{C}_{i,113} = 0$, $i = 1 \dots 112$, інші дорівнюють нулю. Якщо власні числа матриці $J^{-1}C$ позначити як λ_i , $i = 1 \dots 112$, тоді власні лінійні частоти коливань системи можна знайти за формулою $\nu_i = \frac{\sqrt{\lambda_i}}{2\pi}$ [5].

Для розрахункового моделювання електромеханічних перехідних процесів матриці J та C підставляють у рівняння (3) і розв'язують систему звичайних диференціальних рівнянь (1)...(4) за допомогою одного з чисельних методів. При чисельному розв'язанні цієї системи треба врахувати, що вона є жорсткою, та використати відповідні методи, наприклад, TR-BDF2, неявний методу Рунге-Кутта з першим кроком за формулою трапеції, а другим кроком – за формулою диференціювання назад другого порядку [11]. Зважаючи на те, що розрахунки проводяться без врахування загасання механічних коливань, матрицю D приймають нульовою.

Розглянемо порядок ідентифікації параметрів двох спрощених моделей: двомасової, що включає в себе окремі маси турбогенератора та всіх ступенів турбіни як однієї маси, та чотиримасової, що складається з турбогенератора та кожного ступеня турбіни як окремої маси (рис. 3).

Початкові параметри цих моделей розраховують за допомогою вже згаданого методу прямої дискретизації, але для меншої кількості кінцевих мас. Поділимо вал відповідно на дві та чотири частини за фіксованими перерізами, агреговані маси розташуємо в центрах мас вихідного вала, жорсткість між масами отримаємо за правилом послідовного з'єднання [5]. Перерізи, за якими потрібно ділити вал, обирались у результаті розв'язання статичної задачі на кручення зі знаходженням елементів з найбільшим дотичним напруженням [9]. У результаті розрахунків отримано такі параметри спрощених моделей: для двомасової моделі: $J_1 = 486,877 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $J_2 = 3567,26 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $C_{12} = 5,0233 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{м}$, (далі одиниці виміру

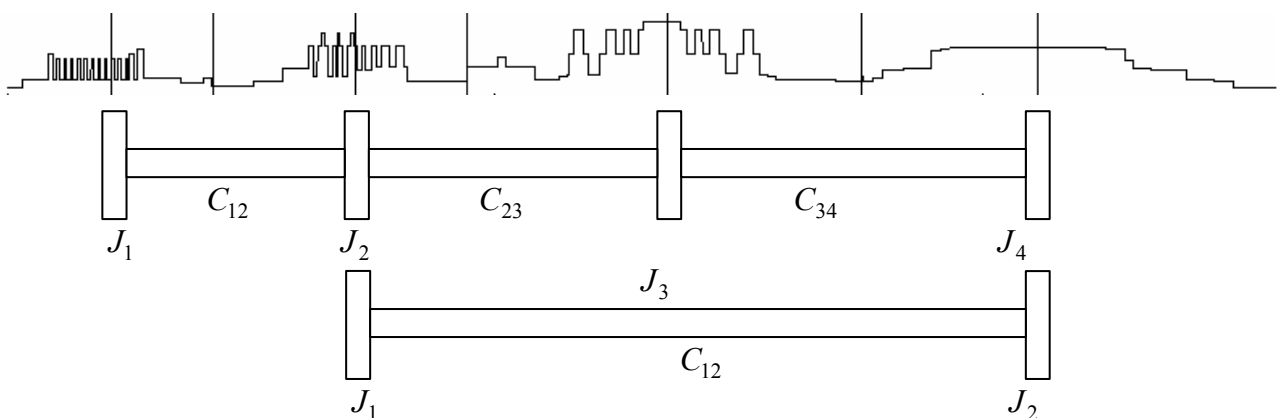


Рис. 3

повторюються відповідно, якщо не зазначено інше); для чотиримасової: $J_1 = 486,877$; $J_2 = 1643,2908$; $J_3 = 7148,1162$; $J_4 = 3567,26$; $C_{12} = 5,0233 \cdot 10^7$; $C_{23} = 8,7219 \cdot 10^7$; $C_{34} = 9,2945 \cdot 10^7$.

За цими параметрами розраховані лінійні власні частоти крутильних коливань (Гц) спрощених та еталонної моделей за матричним методом [5]: двомасова модель: 0; 30,228; чотиримасова: 0; 27,866; 37,258; 62,176; еталонна модель: 0; 28,258; 38,082; 65,192.

Порівняння власних частот коливань еталонної та спрощених моделей показало, що вони достатньо відрізняються. Графіки зміни крутних моментів за часом у перерізі генератор-турбіна, отримані в результаті розрахунку тестового електромеханічного

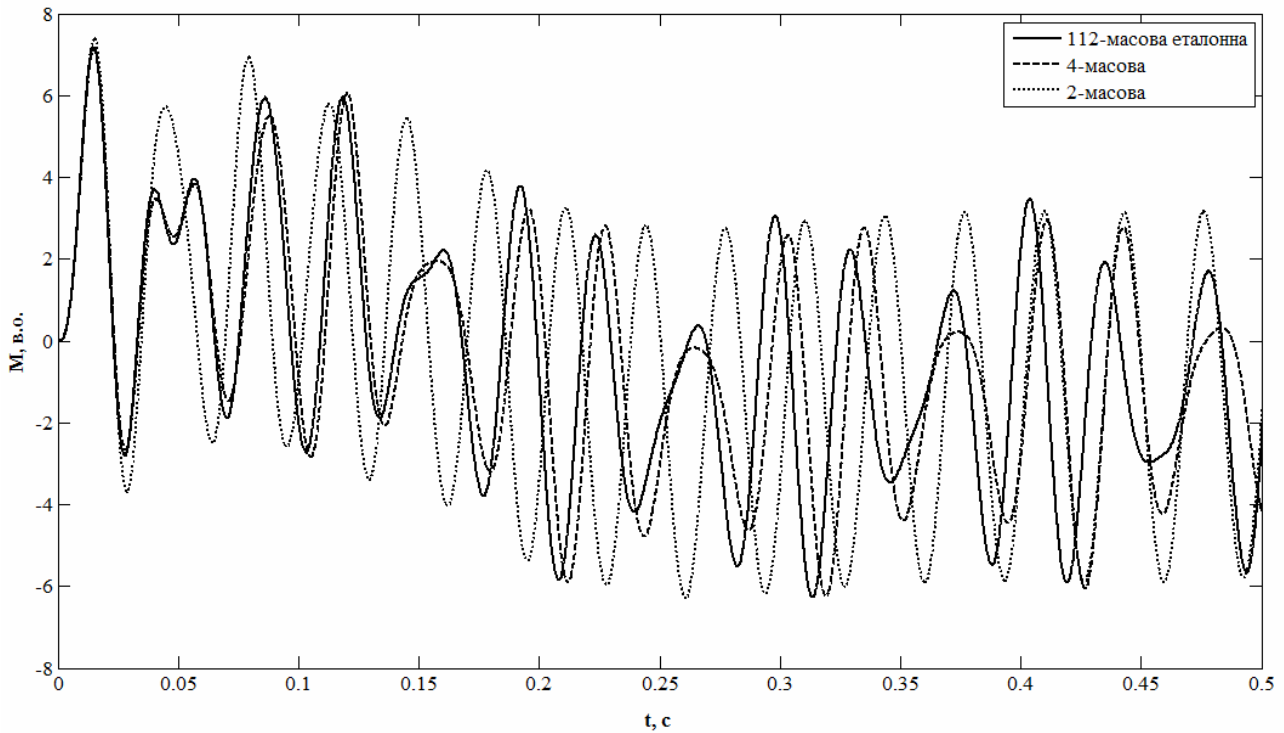


Рис. 4

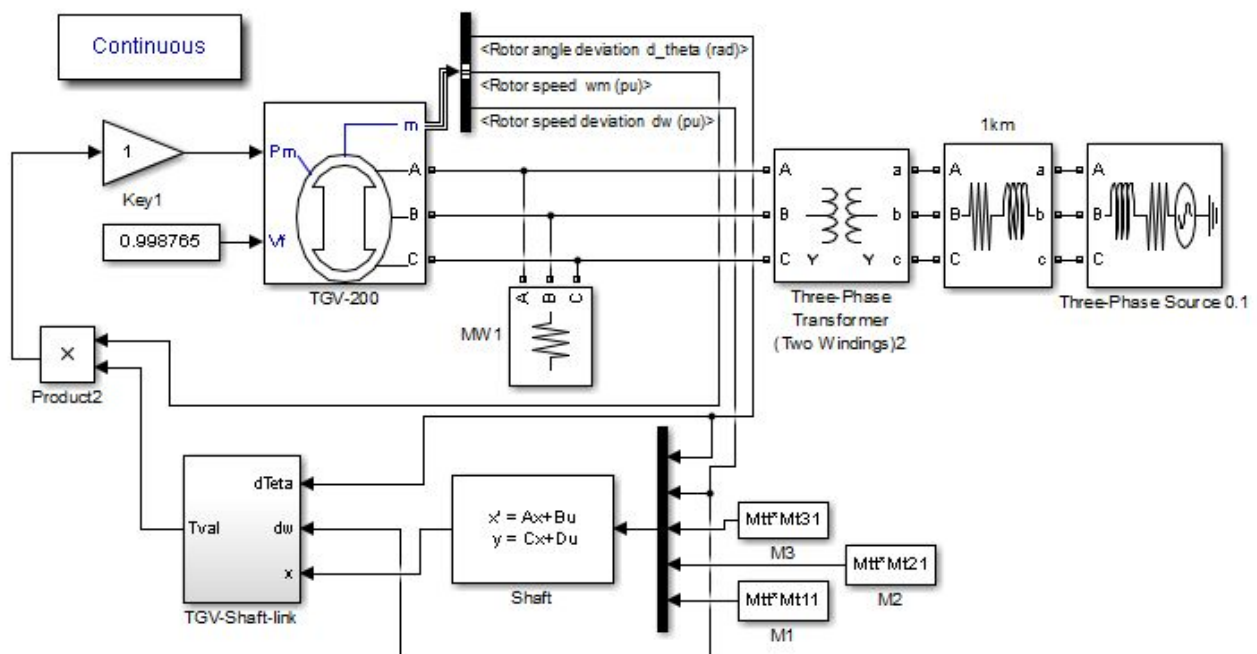


Рис. 5

перехідного процесу несинхронного ввімкнення турбогенератора з холостого ходу в електричну систему, для спрощених і точної моделей, підтвердили відмінність значень моментів (рис. 4). Ці відмінності обумовлені різними значеннями власних частот. Моделювання проводилось у системі MATLAB Simulink з використанням для генератора та електричної системи блоків SimPowerSystems, а для механічної моделі валопроводу блока системи у просторі станів (рис. 5).

Метою ідентифікації параметрів спрощених моделей є визначення значень жорсткості C_{ij} та моментів інерції $J_{i,i}$, які забезпечать максимальне наближення значення власних частот коливань спрощених моделей до еталонних власних частот. Для спрощення методики розрахунку будемо вважати, що моменти інерції для спрощених моделей визначені з достатньою точністю. Тому задача ідентифікації зводиться до наступного: змінювати значення коефіцієнтів жорсткості C_{ij} у спрощених моделях таким чином, щоб максимально наблизити значення власних частот коливань до еталонних, незважаючи на те, яким методом останні були отримані.

У випадку двомасової моделі, яка має параметр J_1 , J_2 , C_{12} , можна за заданим значенням еталонної лінійної частоти ν обчислити значення єдиного коефіцієнта жорсткості C_{12} за формулою $C_{12} = (2\pi\nu)^2 \frac{J_1 J_2}{J_1 + J_2}$, яка витікає з таких формул для власних частот

двомасової системи з вільними кінцями [5]: $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = \sqrt{\frac{C_{12}(J_1 + J_2)}{J_1 J_2}}$, враховуючи, що $\lambda = 2\pi\nu$.

Для ідентифікації чотиримасової моделі валопроводу формула залежності власних частот від коефіцієнтів жорсткості буде надто складною, тому для знаходження C_{ij} доцільно використати методи оптимізації обраного критерію. Застосуємо для порівняння один з ітеративних методів – спряжених градієнтів та один з евристичних методів – генетичного алгоритму.

Метод спряжених градієнтів [7] є методом першого порядку, тобто використовує інформацію тільки про першу похідну функції, що мінімізується. Однак при цьому метод спряжених градієнтів вигідно відрізняється від інших градієнтних методів більш високою швидкістю збіжності. Метод був розроблений Хенстеном та Штифелем в 1952-му році для розв'язання систем лінійних рівнянь, потім його узагальнили для нелінійних функцій.

Ідею генетичного алгоритму [8] висунув Дж. Холланд в кінці 1960-х років. Він зацікавився властивостями процесів еволюції живих істот та був впевнений, що цей механізм можна перенести на алгоритми, що оперували послідовностями нулів та одиниць. У результаті він отримав алгоритм оптимізації, який суттєво відрізнявся від традиційних алгоритмів кількома базовими елементами. По-перше, для оптимізації використовують тільки цільову функцію, а не її похідні, що дуже спрощує пошук розв'язку при невідомих апріорі властивостях функції. По-друге, виконують пошук розв'язку не з однієї точки, а з деякого набору, що називається популяцією.

Генетичний алгоритм шукає глобальний мінімум, а після виконання його кілька разів він з деякою ймовірністю дає змогу виявити, чи є в області декілька однакових глобальних мінімумів цільової функції, чи він один. На той же час ітеративні методи дуже залежать від початкових даних та знаходять локальні мінімуми залежно від них, тому потребують уточнених обмежень області пошуку.

Для реалізації методів ідентифікації введемо функцію, яку потрібно мінімізувати: ця функція буде використовуватися для обчислення близькості власних чисел спрощеної моделі до еталонної. Якщо впорядкувати частоти власних коливань за зростанням та представити їх у вигляді вектора, цільову функцію можна записати як квадрат евклідової норми різниці таких векторів спрощеної та повної моделей.

Прийmemo, що J_1, J_2, J_3, J_4 – моменти інерції агрегованих мас спрощеної моделі, а C_{12}, C_{23}, C_{34} – коефіцієнти жорсткості безмасових пружних валів між цими масами. Тоді власні числа коливань такої системи можна знайти через власні числа матриці $J^{-1}C$:

$$J^{-1}C = \begin{pmatrix} J_1^{-1}C_{12} & -J_1^{-1}C_{12} & 0 & 0 \\ -J_2^{-1}C_{12} & J_2^{-1}(C_{12} + C_{23}) & -J_2^{-1}C_{23} & 0 \\ 0 & -J_3^{-1}C_{23} & J_3^{-1}(C_{23} + C_{34}) & -J_3^{-1}C_{34} \\ 0 & 0 & -J_4^{-1}C_{34} & J_4^{-1}C_{34} \end{pmatrix}.$$

Позначимо ν_i – перші чотири частоти еталонної системи; $\tilde{\nu}_i$ – частоти спрощеної системи.

Тоді цільова функція буде виглядати так: $F = \sum_{i=1}^4 (\nu_i - \tilde{\nu}_i)^2$. У загальному випадку цільову функцію можна мінімізувати за всіма параметрами $F(J_1, J_2, J_3, J_4, C_{12}, C_{23}, C_{34}) \rightarrow \min$ або за окремим набором параметрів. У цьому випадку будемо мінімізувати її за коефіцієнтами жорсткості, тобто $F(C_{12}, C_{23}, C_{34}) \rightarrow \min$. Введемо додаткові обмеження на C_{12}, C_{23}, C_{34} , користуючись початковим наближенням, отриманим раніше за допомогою прямого методу дискретизації та окресленням деякого околу цієї точки:

$$1 \cdot 10^7 \leq C_{12}, C_{23}, C_{34} \leq 15 \cdot 10^7. \quad (5)$$

За допомогою генетичного алгоритму, реалізованого в MATLAB, знаходимо точки екстремуму цільової функції, запустивши його 10 разів. При обмеженнях (5) він дає дві різні точки мінімуму з однаковим значенням критерію:

$$C_{12} = 5,5803 \cdot 10^7; C_{23} = 9,1261 \cdot 10^7; C_{34} = 9,444 \cdot 10^7 \quad (6)$$

$$\text{та } C_{12} = 5,7953 \cdot 10^7; C_{23} = 7,1132 \cdot 10^7; C_{34} = 11,6671 \cdot 10^7. \quad (7)$$

Значення коефіцієнтів (7) за евклідовою нормою більш віддалені від значень, що отримані за класичним методом, тому ми їх відкидаємо. Щоб залишити один екстремум, можемо звужити границі області:

$$1 \cdot 10^7 \leq C_{12}, C_{23}, C_{34} \leq 10 \cdot 10^7. \quad (8)$$

Метод спряженого градієнта швидше виконує наближення до шуканих параметрів, але його результат, як вже зазначалось, надто залежить від початкової точки, якщо функція має декілька локальних екстремумів в області. У звуженій області (8) він дає той же результат (6). Ітеративний метод у цій задачі працює швидше, тому після звуження області для отримання точних значень до обраної кількості значущих цифр краще використовувати його.

Порахувавши уточнені коефіцієнти жорсткості (6), можемо повторно змоделювати перехідний процес у тих же умовах, але з уточненими параметрами механічної системи. Отримаємо криві, показані на рис. 6.

Порівнюючи графіки на рис. 4 та 6, можемо зробити такі висновки. Двомасова модель валопроводу навіть з налагодженими параметрами добре апроксимує тільки перший викид крутного моменту в перерізі турбіна-генератор. Далі форми графіків перехідного процесу суттєво відрізняються за амплітудами, що буде вносити похибку в оцінку пошкоджуваності валопроводу. Чотиримасова механічна модель після уточнення параметрів достатньо точно апроксимує перехідний процес крутного моменту, крім того, вона має власні частоти крутих коливань, близькі до еталонної моделі, тому буде більш точно моделювати поведінку системи в явищах субсинхронного резонансу.

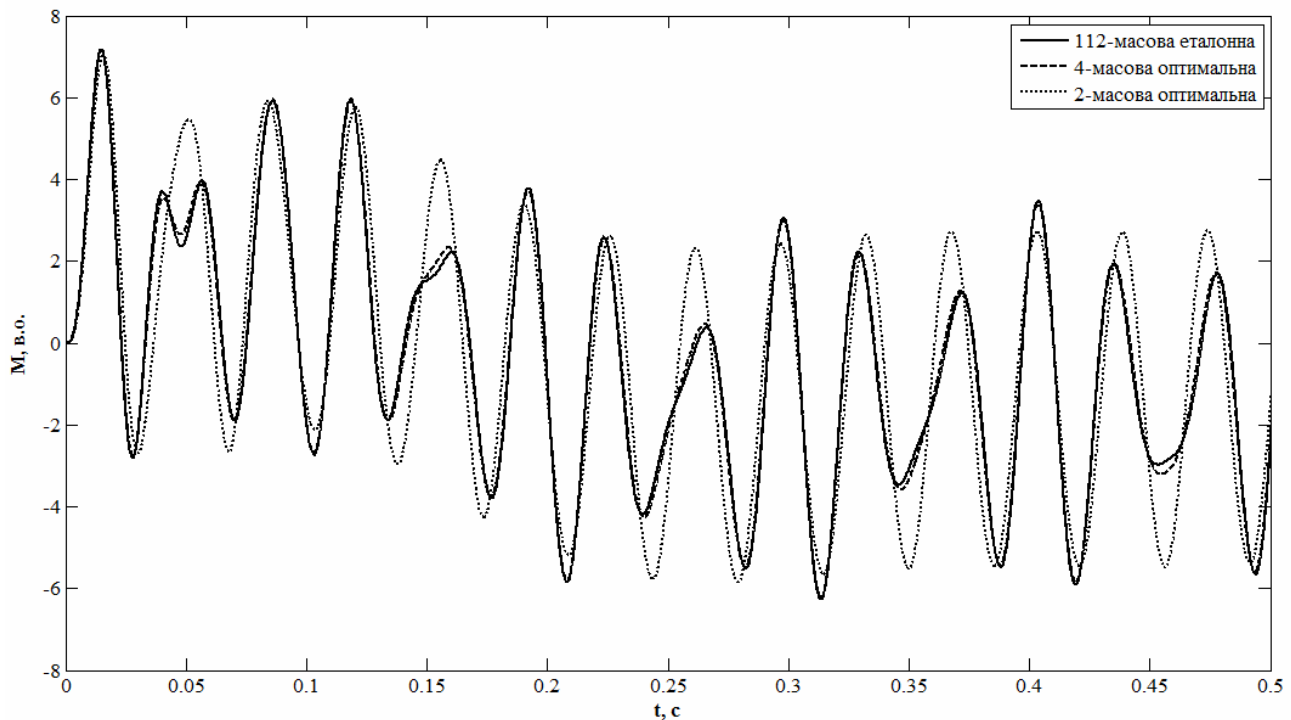


Рис. 6

Висновки. Розрахунків дослідження електромеханічних перехідних процесів турбоагрегату доцільно проводити зі спрощеною математичною моделлю валопроводу без суттєвої втрати точності. Однак потрібно здійснити параметричну ідентифікацію спрощеної моделі з метою наближення до власних частот еталонної моделі за допомогою методів ідентифікації, таких як метод спряжених градієнтів та метод генетичного алгоритму. Можна стверджувати, що метод генетичного алгоритму є більш гнучким та потребує менше апріорної інформації і про цільову функцію, і про початкові умови наближення.

1. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний: Учебник для вузов. – М: Высш. школа, 1980. – 408 с.
2. Бовсуновский А.П., Куевда Ю.В. Учёт качаний валопровода турбоагрегата при оценке усталостной поврежденности его элементов в процессе успешного несинхронного включения // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2015. – Вип. 42. – С. 56–59.
3. Детинко Ф.М., Загородная Г.А., Фастовский В.М. Прочность и колебания электрических машин. – Л.: Энергия, 1969. – 440 с.
4. Кириленко О.В., Сегада М.С., Буткевич О.Ф., Мазур Т.А. Математичне моделювання в електроенергетиці: Підручник. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2010. – 608 с.
5. Лашко В.А., Лейбович М.В. Матричные методы в расчетах крутильных колебаний силовых установок с ДВС: Учеб. пособие. – Хабаровск: Изд-во ХГТУ, 2003. – 211 с.
6. Лукин В.Н., Романов М.Ф., Толкачев Э.А. Системный анализ электрических цепей и машин: Учебное пособие. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1985. – 136 с.
7. Моисеев Н.Н., Иванилов Ю.П., Столярова Е.М. Методы оптимизации. – М.: Главная редакция физ.-мат. литературы, 1978. – 352 с.
8. Рутковская Д., Пильньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
9. Чабан А.В. Алгоритм розрахунку механічних крутильних коливних процесів на прикладі системи «парова турбіна – ротор» синхронного турбогенератора // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2006. – № 556. – С. 86–90.
10. Bovsunovskii A.P. Torsional vibration in steam turbine shafting in turbogenerator abnormal modes of operation // Strength of Materials. – 2012. – 44 (2). – P. 177–186.
11. Hosea M.E., Shampine L.F. Analysis and implementation of TR-BDF2 // Applied Numerical Mathematics. – 1996. – 20. – P. 21–37.
12. Isermann R., Munchhof M. Identification of Dynamic systems. – Berlin-Heidelberg: Springer, 2011. – 705 с.

УДК 621.313.322-81

Ю.В. Куевда, С.Н. Балюта, докт. техн. наук
Национальный университет пищевых технологий,
ул. Владимирская, 68, Киев, 01601, Украина

Методика идентификации параметров упругой модели валопровода турбоагрегата для моделирования крутильных колебаний

Приведено сравнение математических моделей разной размерности с конечным числом степеней свободы валопровода мощного турбоагрегата, которые используются для расчета крутильных колебаний валопровода турбогенератора. Проведены расчетные исследования переходных процессов при включении турбогенератора на параллельную работу с электрической системой с холостого хода при использовании разных математических моделей валопровода и сравнение крутильных моментов. Разработана методика идентификации параметров многомассовой модели валопровода турбоагрегата с помощью итеративного метода сопряженных градиентов и эвристического метода генетического алгоритма. Проведенные расчетные исследования показали эффективность разработанной методики. Библи. 12, рис. 6.

Ключевые слова: турбогенератор, валопровод, многомассовая модель, идентификация параметров, генетический алгоритм, метод сопряженных градиентов.

Yu.V. Kuievda, S.M. Baluta

National University of Food Technologies,
Volodymyrska St., 68, Kyiv, 01601, Ukraine,

Parameter identification method of the turbine-generator shaft elastic model for torsional vibrations simulation

The mathematical models of different dimensions with a finite number of degrees of freedom of a powerful turbine-generator shaft, which is used to calculate the torsional vibrations of the shaft train, were compared. The computational studies of transients during switching of the turbine-generator to parallel operation with the electrical system with no-load conditions using different mathematical models of the shaft train and comparison of torsional moments were performed. The method of parameter identification for the multi-mass model of the shaft line of the turbine set using an iterative conjugate gradient method and a heuristic genetic algorithm was developed. The performed computational studies have shown efficiency of the developed technique. References 12, figures 6.

Key words: turbine-generator, shaft, multiple-mass model, parameter identification, genetic algorithm, conjugate gradient method.

Надійшла 29.06.2017

Received 29.06.2017