ІДЕНТИФІКАЦІЯ РОТОРНИХ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННИХ МАШИН ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ ІНВАРІАНТНОГО ПОГЛИБЛЕННЯ

В.О.Поджаренко, В.Ю.Кучерук, І.М.Демідов
Вінницький державний технічний університет, кафедра МПА
E-mail: kucheruk@svitonline.com

Abstract
Podzharenko V., Kucheruk V., Demidov I. Identification of the rotors parameters of asynchronous machines with the help of the invariant deepening method. *In the given work the basic results of use of an invariant deepening method are resulted at parameters identification of a rotors circuit of short-circuited asynchronous engines.*

Трифазні асинхронні машини (АМ) загального призначення є найбільш масовою продукцією електромашинобудування. Асинхронні електроприводи складають близько 95% загальної кількості електроприводів, а АМ споживають більше половини електроенергії, що виробляється у нашій країні. Тому ефективна оцінка показників якості цих двигунів в процесі виробництва і після їх виготовлення (приймально-здавальні випробування), своєчасна діагностика причин розладу технологічного процесу є актуальним завданням.

При випробовуваннях АМ неможливо провести пряме вимірювання параметрів роторного кола (активний опір обмоток ротору R_r, індуктивність обмоток ротору L_r, взаємна індуктивність між обмотками статора і ротора L_m). Тому для визначення цих параметрів користуються методами ідентифікації. До цих методів відносяться методи затухання постійного струму в статорному колі і гармонічних коливань, які виконуються на нерухомій машині, а також методи, які використовують режими пуску та самогальмування АМ. Існуючі методи мають ряд недоліків, зв‘язаних із трудношами врахування впливу прискорення, вирішення проблеми мультимодальності цільової функції ідентифікації, складністю реалізації та іншими факторами.

В даній роботі наводяться основні результати використання методу інваріантного поглиблення при ідентифікації параметрів роторного кола короткозамкнених АМ.

Припустимо, що проведені спостереження одної чи кількох компонент вектору стану **I** протягом часу T, які вміщують похибки. Для цих спостережень і динамічних рівнянь процесу

$$\frac{d\mathbf{I}}{dT} = \mathbf{g}(\mathbf{I}). \qquad (1)$$

Слідуючи Н.Дістефано [1], визначимо оптимальну оцінку стану в час t, поліпшення цієї оцінки в міру збільшення кількості спостережень.

Якщо t < T, то задача називається інтерполяцією або згладжуванням. При t = T вона називається задачею фільтрування, а коли t > T – задачею передбачення.

В задачах ідентифікації, де основна мета полягає у визначенні набору констант a_i, зручно оперувати з цими константами як з додатковими координатами стану, які задовольняють очевидним диференціальним рівнянням

$$\frac{da_i}{dt} = 0, \quad i = 1, 2, \ldots, k. \qquad (2)$$

Тоді константи a_i можна включити в розширений вектор стану. Ясно, що фільтр розширеного вектору стану дає не тільки оптимальну оцінку вектору стану, а й оптимальну оцінку вектору **a** – основну мету ідентифікації. Слідуючи Беллману [2], вирішується задача фільтрування, використовуючи ідеї інваріантного поглиблення. Визначимо вектор спостережень $\mathbf{\Gamma}\,\mathbf{w}$:

$$\mathbf{w} = \left[w_1\,;\,w_2\,;\,w_3\,;\,w_4\right]^T = \left[i_A\,;\,i_B\,;\,i_C\,;\,\omega_r\right]^T = \mathbf{\Gamma I} + \boldsymbol{\eta}\,, \tag{3}$$

де $\mathbf{\Gamma}$ - прямокутна матриця повного рангу; $\boldsymbol{\eta}$ - вектор похибок спостережень.

На основі цих спостережень в інтервалі [0; T] визначається оптимальна оцінка вектору стану $\mathbf{I}$ при t=T така, щоб мінімізувати функцію квадратичної похибки $f(\mathbf{I}(T), T)$, задану у вигляді:

$$f(\mathbf{I}(T), T) = \int_0^T (\mathbf{w} - \mathbf{\Gamma I}, \mathbf{w} - \mathbf{\Gamma I})dt + (\mathbf{I}(0) - \mathbf{b}, -\mathbf{\Lambda}(\mathbf{I}(0) - \mathbf{b})), \tag{4}$$

де $\mathbf{b}$ - найкраща апріорна оцінка $\mathbf{I}(0)$; $\mathbf{\Lambda}$ - невироджена матриця, яка встановлює міру впевненості у даній оцінці.

Згідно [1], мінімізація (4) досягається при вирішенні диференціальних рівнянь оптимального нелінійного фільтру

$$\frac{d\mathbf{e}}{dT} = \mathbf{g}(\mathbf{e}) + \mathbf{Q}(T)\mathbf{\Gamma}^T(\mathbf{w} - \mathbf{\Gamma e}); \quad \mathbf{e}(0) = \mathbf{b}, \tag{5}$$

а матриця коригуючих коефіцієнтів $\mathbf{Q}(T)$ задовольняє рівнянню

$$\frac{d\mathbf{Q}}{dT} = \mathbf{g_c}(\mathbf{e})\mathbf{Q} + \mathbf{Q}\mathbf{g_c}^T(\mathbf{e}) - \mathbf{Q}\mathbf{\Gamma}^T\mathbf{\Gamma Q}; \quad \mathbf{Q}(0) = \mathbf{\Lambda}^{-1}. \tag{6}$$

Тут для спрощення запису зображено $\mathbf{c} = \mathbf{I}(T)$; $\mathbf{e} = \arg\min f(\mathbf{c}, T)$; $\mathbf{g}_c(\mathbf{e})$ - якобіан $\mathbf{g}(\mathbf{e})$ по $\mathbf{c}$; "Т зверху" – знак транспонування.

Задача ідентифікації за Н.Дістефано зводиться до вирішення системи із двох диференціальних рівнянь (5) і (6).

В [3] виведено рівняння для похибки фільтра Н.Дістефано. Позначимо через $\widetilde{\mathbf{I}} = \mathbf{I} - \mathbf{e}$ похибку оцінки фільтра. Тоді похибка оцінки фільтра $\widetilde{\mathbf{I}}$ має такий вид

$$\widetilde{\mathbf{I}} = \int_0^T \mathbf{X}(T)\mathbf{X}^{-1}(S)\mathbf{Q}(S)\mathbf{\Gamma}^T\boldsymbol{\eta}(S)dS, \tag{7}$$

де $\mathbf{X}(T)$ - розв'язок рівняння

$$\frac{d\mathbf{X}(T)}{dT} = -\left[\mathbf{Q}(T)\mathbf{\Gamma}^T\mathbf{\Gamma} - \mathbf{g_c}(\mathbf{e})\right]\mathbf{X}(T)\,. \tag{8}$$

Таким чином, задача ідентифікації з одночасним знаходженням похибки ідентифікації за Н.Дістефано полягає у вирішенні системи рівнянь (5) – (7).

Ідентифікацію за допомогою методу інваріантного поглиблення будемо проводити для активного опору R_r та індуктивності L_r ротора; взаємна індуктивність між статором і ротором L_m добре ідентифікується за допомогою методів теорії чутливості [4].

Представимо перші чотири рівняння математичної моделі АД [5] у формі Коші

$$\mathbf{A}\frac{d\mathbf{i}}{dt} = \mathbf{Bi} + \mathbf{u}_m\,, \tag{9}$$

де

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_r L_m & -R_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_m & 0 & \omega_r L_r & -R_r \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{i} = \left[i_{s\alpha}\,;\,i_{s\beta}\,;\,i_{r\alpha}\,;\,i_{r\beta}\right]^T; \quad \mathbf{u}_m = \left[u_{s\alpha}\,;\,u_{s\beta}\,;\,u_{r\alpha}\,;\,u_{r\beta}\right]^T.$$

Зворотна матриця $\mathbf{A}^{-1}$ матиме вигляд:

$$\mathbf{A}^{-1}=\begin{bmatrix}\frac{L_r}{L_sL_r-L_m^2} & 0 & \frac{-L_m}{L_sL_r-L_m^2} & 0\\ 0 & \frac{L_r}{L_sL_r-L_m^2} & 0 & \frac{-L_m}{L_sL_r-L_m^2}\\ \frac{-L_m}{L_sL_r-L_m^2} & 0 & \frac{L_s}{L_sL_r-L_m^2} & 0\\ 0 & \frac{-L_m}{L_sL_r-L_m^2} & 0 & \frac{L_s}{L_sL_r-L_m^2}\end{bmatrix}. \tag{10}$$

Помножимо рівняння (9) на $\mathbf{A}^{-1}$:

$$\frac{d\mathbf{i}}{dt}=\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}\mathbf{i}+\mathbf{A}^{-1}\mathbf{u}_m, \tag{11}$$

де

$$\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}=\frac{1}{L_sL_r-L_m^2}\times\begin{bmatrix}-L_rR_s & L_m^2\omega_r & L_mR_r & L_mL_r\omega_r\\ -L_m^2\omega_r & -L_rR_s & -L_mL_r\omega_r & L_mR_r\\ L_mR_s & -L_sL_m\omega_r & -L_sR_r & -L_sL_r\omega_r\\ L_sL_m\omega_r & L_mR_s & L_sL_r\omega_r & -L_sR_r\end{bmatrix}.$$

Для короткозамкненого АД $u_{r\alpha}=u_{r\beta}=0$. Тоді $\mathbf{A}^{-1}\mathbf{u}_m$ запишеться:

$$\mathbf{A}^{-1}\mathbf{u_m}=\left[\frac{L_ru_{s\alpha}}{L_sL_r-L_m^2};\frac{L_ru_{s\beta}}{L_sL_r-L_m^2};\frac{-L_mu_{s\alpha}}{L_sL_r-L_m^2};\frac{-L_mu_{s\beta}}{L_sL_r-L_m^2}\right]. \tag{12}$$

Розширимо вектор стану $\mathbf{u}$ п'ятим рівнянням математичної моделі АД [5] та параметрами R_r і L_r:

$$\mathbf{u}=[u_1;u_2;u_3;u_4;u_5;u_6;u_7]^T=[i_{s\alpha};i_{s\beta};i_{r\alpha};i_{r\beta};\omega_r;R_r;L_r]^T,$$

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt}=\mathbf{g}(\mathbf{u},u_{s\alpha},u_{s\beta}),\quad \mathbf{u}\in\Re^7,\quad \mathbf{g}:\Re^7\times\Re^7\to\Re^7,$$

де $\mathbf{g}$ - наступна вектор-функція:

$$g_1=\frac{-L_sR_su_1+L_m^2u_5u_2+L_mu_6u_3+L_mu_7u_5u_4+u_7u_{s\alpha}}{L_su_7-L_m^2};$$

$$g_2=\frac{-L_m^2u_5u_1-u_7R_su_2-L_mu_7u_5u_3+L_mu_6u_4+u_7u_{s\beta}}{L_su_7-L_m^2};$$

$$g_3=\frac{L_mR_su_1-L_sL_mu_5u_2-L_su_6u_3-L_su_7u_5u_4-L_mu_{s\alpha}}{L_su_7-L_m^2};$$

$$g_4=\frac{L_sL_mu_5u_1+L_mR_su_2+L_su_7u_5u_3-L_su_6u_4-L_mu_{s\beta}}{L_su_7-L_m^2};$$

$$g_5=\frac{p}{J}\left(\frac{mp}{2}L_m(u_2u_3-u_1u_4)-M_0\right);\quad g_6=g_7=0.$$

Визначимо вектор спостережень $\mathbf{w}$:

$$w=[w_1;w_2;w_3;w_4]^T=[i_A;i_B;i_C;\omega_r]^T=\mathbf{\Gamma u}+\boldsymbol{\eta}, \tag{13}$$

де i_A, i_B, i_C - струми в обмотках статору АД.

Запишемо для рівняння (13) матрицю повного рангу $\mathbf{\Gamma}$. Для цього використаємо рівняння переходу із системи координат $\alpha,\beta,0$ в реальну систему координат [6]:

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \qquad (14)$$

Таким чином, задача ідентифікації за допомогою методу інваріантного поглиблення Н.Дістефано зводиться до вирішення системи із трьох диференціальних рівнянь (5), (6), (7). Але ці рівняння мають складний матричний вигляд, що робить практично неможливим їх спрощення.

Рішення системи (5), (6), (7) може здійснюватися методом Рунге-Кутта четвертого порядку з постійним кроком h.

Для чисельного дослідження алгоритму ідентифікації вибрано АД 4А71А4 із параметрами p=2, m=3, R_s=16.39 Ом, R_r=15.08 Ом, L_s=0.663 Гн, L_r=0.7015 Гн, L_m=0.624 Гн, J=0.011 кГм^2. Шум $\mathbf{\eta}$ моделюється випадковою величиною з нормальним законом розподілу. Приклад роботи методу ідентифікації наведено на рисунках 1 – 3.

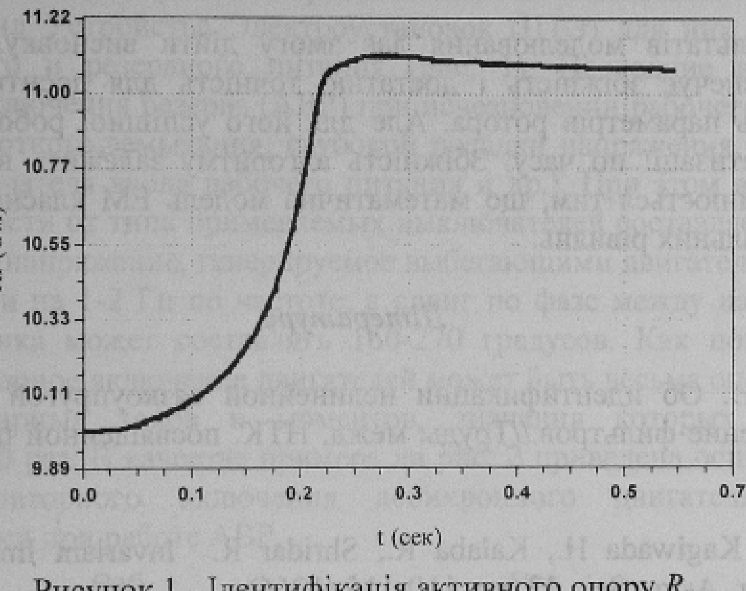

Рисунок 1 - Ідентифікація активного опору R_r

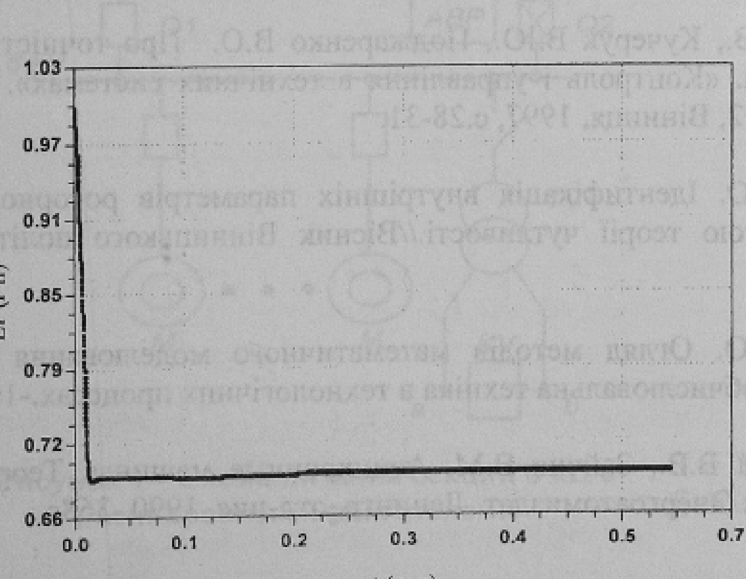

Рисунок 2 - Ідентифікація індуктивності L_r

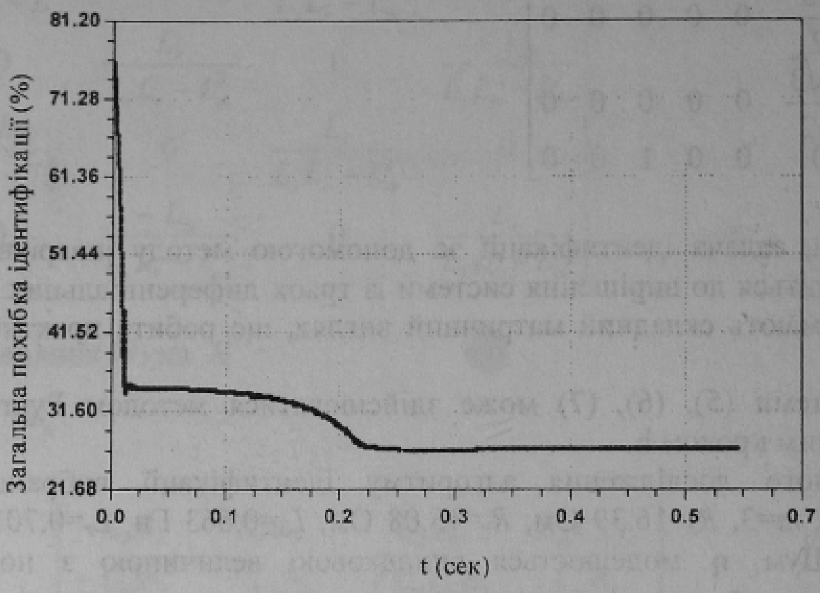

Рисунок 3 - Загальна похибка ідентифікації

Аналіз результатів моделювання дає змогу дійти висновку, що даний алгоритм ідентифікації забезпечує збіжність і достатню точність для досить широкого діапазону початкових значень параметрів ротора. Але для його успішної роботи необхідний досить малий крок дискретизації по часу. Збіжність алгоритму залежить від вибору початкових значень. Це спричинюється тим, що математична модель ЕМ класифікується як жорстка система диференціальних рівнянь.

Література

1. Дистефано Н. Об идентификации нелинейной вязкоупругой пружины в условиях динамики. Применение фильтров.//Труды межд. НТК, посвященной памяти Работнова.- М., 1979, с.163-169.

2. Bellman R., Kagiwada H., Kalaba R., Shridar R. Invariant Imbedding and Nonlinear Filtering Theory, Jour. Astro. Sci., 13, pp. 110-115 (1966).

3. Андреєв М.В., Кучерук В.Ю., Поджаренко В.О. Про точність нелінійного фільтра Н.Дистефано.//В кн. «Контроль і управління в технічних системах». Мат. 4-ї міжнародної НТК КУТС-97, том 2, Вінниця, 1997, с.28-31.

4. Кучерук В.Ю. Ідентифікація внутрішніх параметрів роторного кола асинхронних машин за допомогою теорії чутливості.//Вісник Вінницького політехнічного інституту.- 2000.-№4.-с.5-10.

5. Кучерук В.Ю. Огляд методів математичного моделювання електричних машин. //Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.-1999.-№2.-с.17-23.

6. Домбровский В.В., Зайчик В.М. Асинхронные машины: Теория, расчет, элементы проектирования.-Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990.-368с.