

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ СТАТОРНОГО КОЛА СИНХРОННОГО ДВИГУНА

Вступ. Важливими складовими функціональних властивостей сучасних систем електропривода, які позитивно впливають на їхні експлуатаційні характеристики, є функції автоматичної настройки систем на базі ідентифікації параметрів об'єктів регулювання. Між тим, досвід застосування таких систем свідчить, що є необхідність вдосконалення алгоритмів ідентифікації з точки зору мінімізації часових витрат, підвищення точності визначення параметрів об'єктів, реалізації адаптивного регулювання. Особливої уваги потребують високоточні системи електропривода, які сьогодні зазвичай використовують синхронні електродвигуни з постійними магнітами.

Аналіз попередніх досліджень. Ідентифікації параметрів синхронних двигунів присвячено низку публікацій, серед яких можна виділити [1], в якій зроблено детальний аналіз попередніх розробок та запропоновано інші підходи до вирішення такої задачі. На ці питання продовжують звертати увагу й в останні роки [2, 3]. Але з аналізу наявних інформаційних джерел можна зробити висновок, що поза увагою залишилося використання частотних методів ідентифікації. Між тим, такі методи відповідають фізичним основам функціонування синхронних двигунів.

З урахуванням відзначеного на даному етапі було **визначено задачу** щодо дослідження можливостей частотних методів при ідентифікації параметрів статорного кола синхронного двигуна з постійними магнітами.

Матеріал і результати дослідження. Розглянутий метод ідентифікації параметрів базується на рівняннях, що характеризують складові векторів напруги та струму статора в системі координат d-q, орієнтований за магнітним полем ротора:

$$\tilde{u}_s = u_{sd} + j u_{sq} ; \quad \tilde{i}_s = i_{sd} + j i_{sq} ; \tag{1}$$

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + L_d \frac{di_{sd}}{dt} - N_p \omega L_q i_{sq} ; \quad u_{sq} = R_s i_{sq} + L_q \frac{di_{sq}}{dt} + N_p \omega L_d i_{sd} + \frac{3}{2} N_p \Psi_F \omega , \tag{2}$$

де \tilde{u}_s, \tilde{i}_s – вектори відповідно напруги та струму статора;

$u_{sd}, u_{sq}, i_{sd}, i_{sq}$ – складові векторів напруги та струму статора;

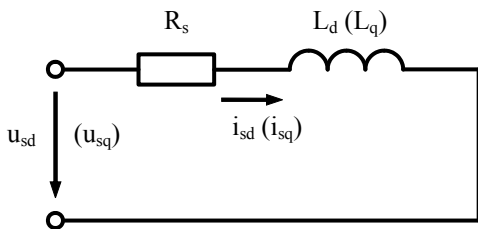


Рис. 1. Електрична схема заміщення статорного кола синхронного двигуна

- R_s – активний опір статора;
- L_d, L_q – поздовжня та поперечна складові індуктивності статора;
- ω – кутова швидкість обертання ротора;
- N_p – число пар полюсів;
- Ψ_F – потокозчеплення, утворене постійними магнітами ротора.

На даному етапі розглянуто процес ідентифікації параметрів статора при нерухомому роторі. При цьому $\omega = 0$, і рівняння (2) спрощуються:

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + L_d \frac{di_{sd}}{dt} ; \quad u_{sq} = R_s i_{sq} + L_q \frac{di_{sq}}{dt} . \tag{3}$$

Цим рівнянням відповідає електрична схема, зображена на рис. 1.

Таким чином, шуканими є параметри R_s, L_d, L_q , які необхідно визначити експериментально. Для цього формуємо тестові сигнали (рис. 2) у відповідності з виразами:

$$u_{sq}^T = U_{sq}^{off} + u_{sq}^{sin} ; \quad u_{sd}^T = U_{sd}^{off} + u_{sd}^{sin} . \tag{4}$$

У тестових сигналах має місце синусоїдальна складова, яку характеризує рівняння

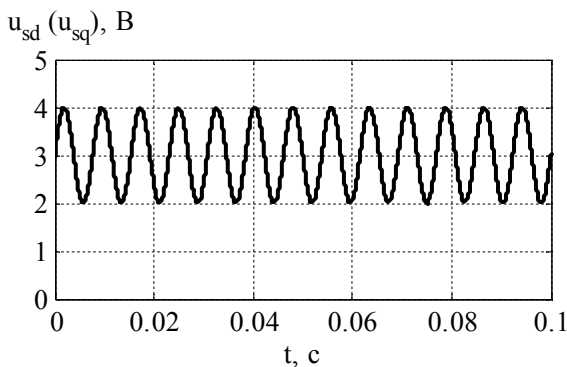


Рис. 2. Вигляд тестового сигналу

$$u_{sd(q)}^{\sin} = U_{sd(q)}^A \sin(2\pi f nT), \quad (5)$$

де $U_{sd}^A = U_{sq}^A$ – амплітуда синусоїдальної складової; f – частота синусоїдальної складової;

T – інтервал дискретності формування тестового сигналу; n – номер інтервалу дискретності.

Тестові сигнали відповідно до рівнянь (4) характеризують також постійні складові U_{sd}^{off} і U_{sq}^{off} , які забезпечують зміщення точки вимірювань.

Синусоїдальна частина є присутньою тільки в одній із складових напруги тестового сигналу у залежності від того, величина якої з індуктивностей (L_d або L_q) ідентифікується. При подачі тестового сигналу фіксується синусоїдальна складова струму статора.

Застосований метод ідентифікації виходить із частотної передавальної функції кола статора (рис. 1)

$$W(j\omega_f) = \frac{1}{R_s + j\omega_f L_s} = W_A(\omega_f) + jW_B(\omega_f) = \frac{R_s}{R_s^2 + (\omega_f L_s)^2} + j \cdot \frac{-\omega_f L_s}{R_s^2 + (\omega_f L_s)^2}. \quad (6)$$

З урахуванням наданого в [4] обґрунтування складові частотної передавальної функції (6) визначаються як

$$W_A = \frac{2}{(U_s^A)^2} \cdot I_A; \quad W_B = \frac{-2}{(U_s^A)^2} \cdot I_B, \quad (7)$$

де $I_A = \frac{1}{NT_f} \int_0^{NT_f} u_s^{\sin} \cdot i_s^{\sin} dt$; $I_B = \frac{1}{NT_f} \int_0^{NT_f} u_s^{\cos} \cdot i_s^{\sin} dt$; $u_s^{\cos} = U_s^A \cos(\omega_f t)$.

T_f – період тестового синусоїдального сигналу; N – число періодів тестового сигналу при ідентифікації;

При реалізації цього методу формування тестового сигналу вимірювання струмів та обробка інформації здійснюється дискретно у часі. При цьому інтегрування виконується в дискретному вигляді:

$$I_A \cong \frac{T}{NT_f} \sum_{k=0}^n (u_{s[k]}^{\sin} \cdot i_{s[k]}^{\sin}) = \frac{1}{n} \cdot A_{[n]}; \quad I_B \cong \frac{T}{NT_f} \sum_{k=0}^n (u_{s[k]}^{\cos} \cdot i_{s[k]}^{\sin}) = \frac{1}{n} \cdot B_{[n]}. \quad (8)$$

де T – інтервал дискретності вимірювання струмів; $n = NT_f/T$ – число інтервалів вимірювань;

$$A_{[n]} = \sum_{k=0}^n (u_{s[k]}^{\sin} \cdot i_{s[k]}^{\sin}); \quad B_{[n]} = \sum_{k=0}^n (u_{s[k]}^{\cos} \cdot i_{s[k]}^{\sin}).$$

При розрахунках інтегралів (8) доцільно використовувати рекурентні формули:

$$A_{[n]} = A_{[n-1]} + u_{s[n]}^{\sin} \cdot i_{s[n]}^{\sin}; \quad B_{[n]} = B_{[n-1]} + u_{s[n]}^{\cos} \cdot i_{s[n]}^{\sin}. \quad (9)$$

На підставі зіставлення виразів для W_A та W_B у рівняннях (6) та (7) з урахуванням $T_f = 1/f$ отримуємо формули для розрахунку параметрів кола статора синхронного двигуна:

$$R_s = \frac{(U_s^A)^2 n}{2} \cdot \frac{A_{[n]}}{A_{[n]}^2 + B_{[n]}^2}; \quad L_s = \frac{(U_s^A)^2 n}{4\pi f} \cdot \frac{B_{[n]}}{A_{[n]}^2 + B_{[n]}^2}. \quad (10)$$

Розглянуті теоретичні передумови відображено у функціональній схемі експерименту з ідентифікації параметрів кола статора синхронного двигуна, надану на рис. 3.

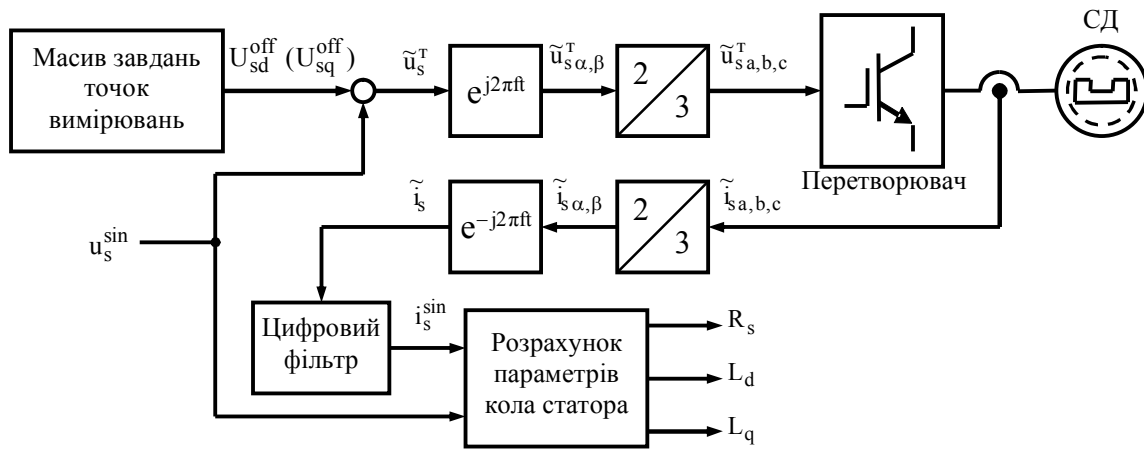


Рис. 3. Функціональна схема ідентифікації параметрів

Метод ідентифікації параметрів кола статора синхронного двигуна реалізовано на лабораторному стенді, функціональну схему якого зображено на рис. 4.

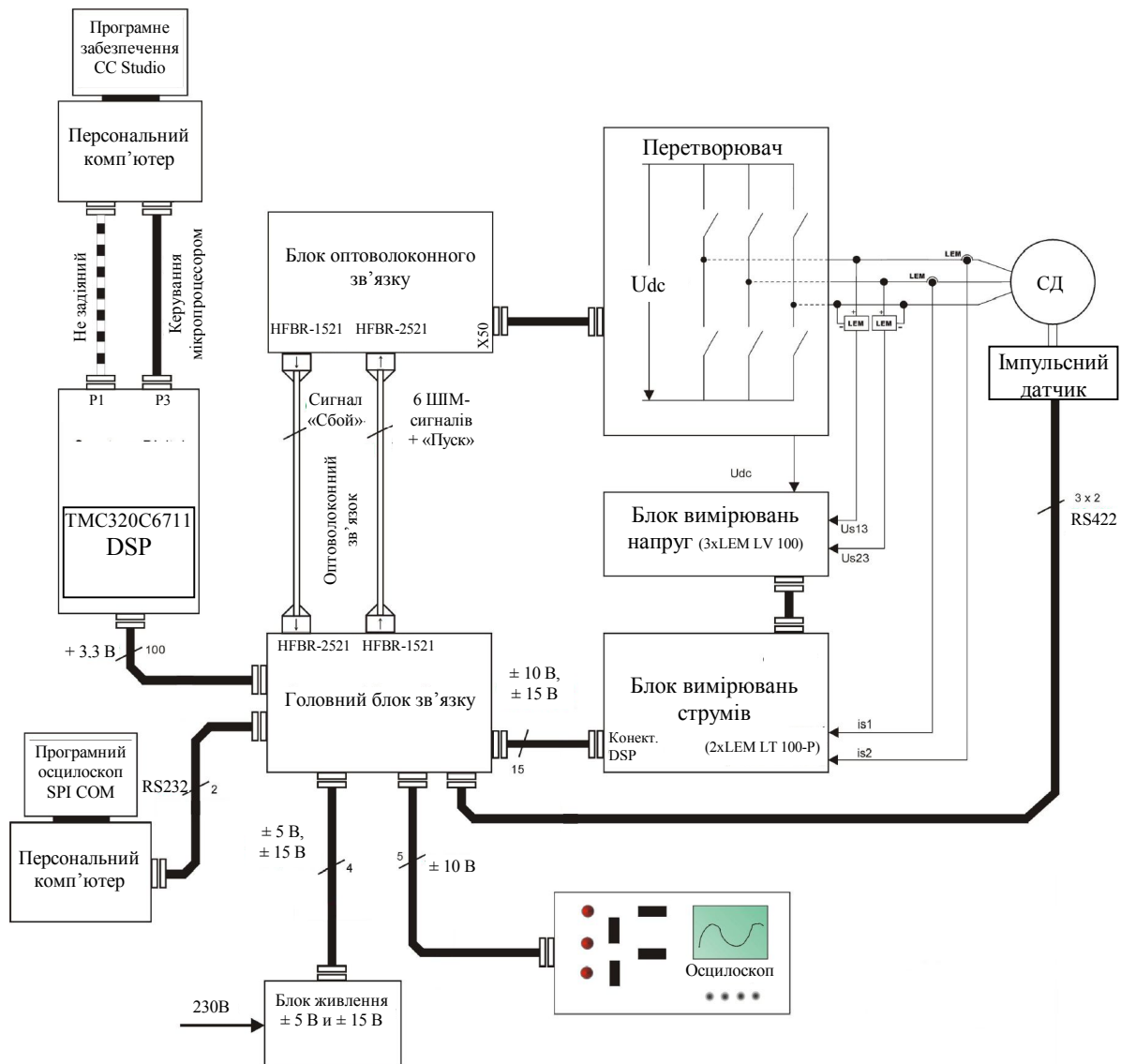


Рис. 4. Функціональна схема лабораторного стенда електропривода

= 1,1 кВт;

- ◆ номінальна напруга $U = 345 \text{ В}$;
- ◆ номінальний струм двигуна $I = 2,6 \text{ А}$;
- ◆ номінальна частота напруги $f = 130 \text{ Гц}$;
- ◆ номінальна частота обертання $n = 1950 \text{ об/хв.}$;
- ◆ число пар полюсів $N_p = 4$.

Застосований в стенді електропривода сигнальний мікропроцесор TMC320C6711 програмується на мові C++ за допомогою програмного пакету Code Composer Studio.

При виконанні експериментів приймалося $N=30$, частота тестового сигналу становила 130 Гц, постійна частина сигналу варіювалася в діапазоні від мінус 15 до +15 В при амплітуді синусоїдальної складової 1 В.

Результати експериментальних досліджень надано на рис. 5 та рис. 6 у вигляді трьохмірних графіків залежностей індуктивностей статора L_d та L_q від величин поздовжньої і поперечної складових напруги статора (U_{sd}^{off} і U_{sq}^{off}).

До складу стенда входить синхронний двигун з наступними паспортними даними:

◆ Н
О
М
і
н
а
л
ь
н
а

П
О
Т
У
Ж
н
і
с
т
ь

Р

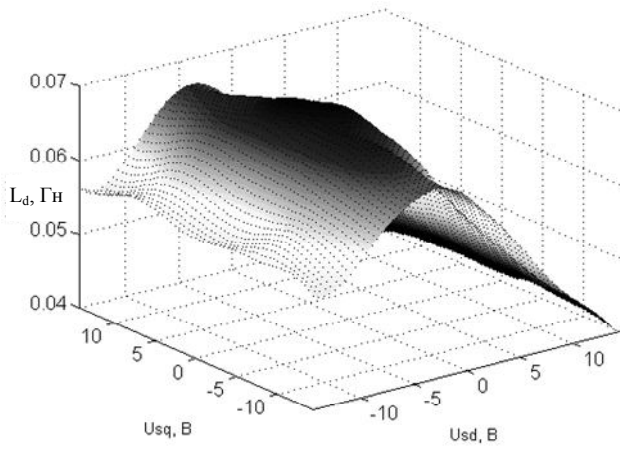


Рис. 5. Залежності індуктивності L_d від

$$U_{sd}^{off} \text{ і } U_{sq}^{off} \text{ при } u_{sd}^{sin} = u_s^{sin}, u_{sq}^{sin} = 0$$

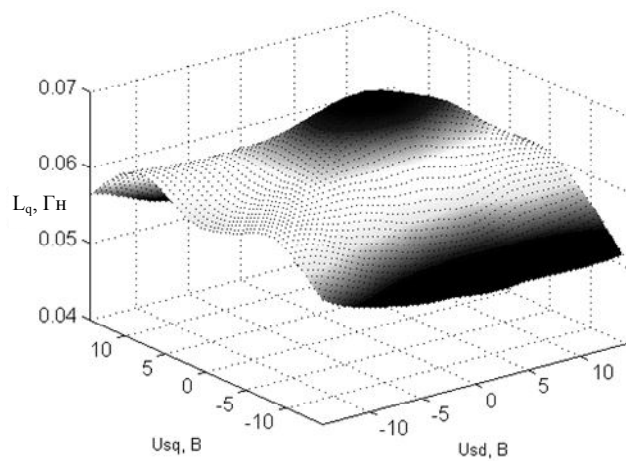


Рис. 6. Залежності індуктивності L_q від

$$U_{sd}^{off} \text{ і } U_{sq}^{off} \text{ при } u_{sd}^{sin} = 0, u_{sq}^{sin} = u_s^{sin}$$

Додатково на рис. 7 та рис. 8, зображено залежності індуктивностей статора L_d та L_q від величини поздовжньої складової напруги U_{sq}^{off} при $U_{sd}^{off} = 0$, що відповідає режиму роботи синхронного двигуна з номінальною величиною потокозчеплення постійних магнітів ротора.

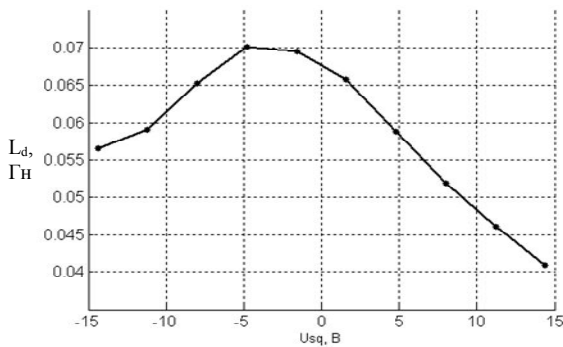


Рис. 7. Залежності індуктивності L_d від

$$U_{sq}^{off} \text{ при } U_{sd}^{off} = 0$$

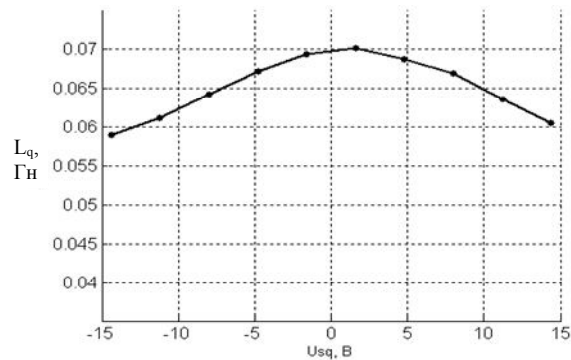


Рис. 8. Залежності індуктивності L_q від

$$U_{sq}^{off} \text{ при } U_{sd}^{off} = 0$$

Як бачимо з графіків на рис. 7 та рис. 8 ідентифіковані значення індуктивностей зменшуються в залежності від постійної складової тестової напруги на 15 – 40 %, що є наслідком ефекту насичення в магнітній системі статора двигуна.

Відносно активного опору статора експериментально встановлено, що він не залежить від точки вимірювань і дорівнює при холодному стані двигуна $R_s = 4 \text{ Ом}$.

Висновки. Результати досліджень підтверджують ефективність частотних методів ідентифікації і створюють передумови для перевірки нових розробок з наступним порівнянням отриманих результатів.

Література

1. Shicha L. Beitrag zur Anwendung stochastischer Methoden zur Parameter- und Zustandsschätzung bei Synchronmaschinen. - Düsseldorf: VDI Verlag, 1993. - 146 S.
2. Rico Melgoza J., Heydt G., Keyhani A., et al. Synchronous machine parameter estimation using the Hartley series // IEEE Transactions on Energy Conversions, Vol. 16, No. 1, March 2001. - Pp.49-54.
3. Elbuluk M., Tong L., Husain I. Neural-network-based model reference adaptive systems for high-performance motor drives and motion controls // IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, No. 3, May/June 2002. - Pp.879-886.
4. Isermann R. Identifikation dynamischer Systeme 1. - Berlin, Heidelberg: Springer, 1992.- 330 S.