

МЕТОД ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ІНДУКТИВНОСТЕЙ ТА МАГНІТНОГО ПОТОКУ ЯВНОПОЛЮСНИХ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Пересада С.М., д.т.н., проф., Ніконенко Є.О., асп., Решетник В.С., асп.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Вступ. Явнополюсні синхронні двигуни з постійними магнітами (англ. Interior permanent magnet synchronous motor, IPMSM) є простішими за конструкцією та відповідно дешевшими за неявнополюсні синхронні двигуни [1] – [4]. Реалізація алгоритмів векторного керування потребує точної інформації щодо параметрів IPMSM [5], [6]

Методи ідентифікації параметрів можна поділити на два класи: онлайн-ідентифікація та офлайн-ідентифікація або процедура self-commissioning. Онлайн-ідентифікація базується на інжекції високочастотних сигналів струму статора, на основі яких визначаються параметри двигуна в робочому режимі [7], [8]. Офлайн-ідентифікація базується на спеціальних умовах тесту. Зокрема, в [9] визначають індуктивності за виглядом перехідної характеристики струму при завданні напруги статора стрибком. Проте такий підхід залежить від неідеальностей джерела, вимагає спеціального підключення обмоток статора та нерухомого ротора. В [10] застосовано розрахунок імпедансу статорних обмоток та оцінка втрат в сталі машини. При цьому для ідентифікації магнітного потоку постійних магнітів та індуктивностей використовуються високочастотні струмові сигнали та розклад струмів в ряд Фур'є. В [11] запропоновано інжекцію прямокутних імпульсів напруги із застосуванням алгоритму найменших квадратів для ідентифікації індуктивностей. Недоліками [10] та [11] є залежність від нелінійностей інвертора та використання розімкненого інтегрування струмів. За такими методами знаходять значення динамічних індуктивностей.

Серед неідеальностей інвертора виділимо наступні: «мертвий час» інвертора спричиняє помилкове відпрацювання напруги в зоні малих струмів; еквівалентний активний опір змінюється в різних режимах роботи інвертора. Також насичення магнітного кола IPMSM може спричинити невірну оцінку індуктивностей.

Мета роботи. Метою роботи є розробка методу експериментального визначення статичних індуктивностей та магнітного потоку постійних магнітів IPMSM, на точність результатів якого не впливають неідеальності інвертора, а також зміни еквівалентного активного опору статора.

Матеріали дослідження. За умови, що взаємні індуктивності статора відсутні, після перетворень до синхронної системи координат ротора (d - q), динаміка струмів IPMSM описується наступними рівняннями [1]:

$$\begin{aligned} \dot{i}_d &= -\frac{R}{L_d(i_d)} i_d + \frac{\Psi_q(i_q)}{L_d(i_d)} \omega p_n + \frac{1}{L_d(i_d)} u_d, \\ \dot{i}_q &= -\frac{R}{L_q(i_q)} i_q - \frac{\Psi_d(i_d)}{L_q(i_q)} \omega p_n + \frac{1}{L_q(i_q)} u_q, \end{aligned} \quad (1)$$

де ω – кутова швидкість; u_d, u_q – статорні напруги; i_d, i_q – статорні струми, R – еквівалентний активний опір статорних обмоток; $\Psi_d = L_d(i_d) i_d + L_{md} i_f$, $\Psi_q = L_q(i_q) i_q$ – потокозчеплення; $L_d(i_d), L_q(i_q)$ – індуктивності статора; $L_{md} i_f = \text{const}$ – магнітний потік постійних магнітів; p_n – кількість пар полюсів.

Відмітимо, що в (1) присутні чотири параметри, які в загальному випадку є невідомими: активний опір R , індуктивності $L_d(i_d), L_q(i_q)$ та магнітний потік постійних магнітів $L_{md} i_f$.

Метод визначення індуктивностей та магнітного потоку на основі розрахунку потокозчеплень. Метод розрахунку індуктивностей $L_d(i_d), L_q(i_q)$ та магнітного потоку $L_{md} i_f$ полягає в отриманні залежностей потокозчеплення від струму $\Psi_d(i_d), i_q = 0$ та $\Psi_q(i_q), i_d = 0$ за умови: а) швидкість ротора стабілізується зовнішнім рушієм; б) відповідні струми i_d та i_q змінюється повільно за лінійним законом, так, що динамікою струмів в (1) можна знехтувати.

Для відпрацювання струмів застосовано ПІ-регулятори струму:

$$\begin{aligned} u_d &= -k_i \tilde{i}_d - x_d, & u_q &= -k_i \tilde{i}_q - x_q, \\ \dot{x}_d &= k_{ii} \tilde{i}_d, & \dot{x}_q &= k_{ii} \tilde{i}_q, \end{aligned} \quad (2)$$

де $\tilde{i}_q = i_q - i_q^*$, $\tilde{i}_d = i_d - i_d^*$ – похибки регулювання струмів, i_q^*, i_d^* – задані значення струмів, x_d, x_q – інтегральні складові, $k_i > 0, k_{ii} > 0$ – коефіцієнти регуляторів.

Регулятори (2) забезпечують асимптотичність регулювання струмів, тобто $\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{i}_d, \tilde{i}_q) = 0$ за умови, якщо струм змінюється від i_{\max} до i_{\min} за достатньо великий проміжок часу, щоб розглядати тест як роботу в усталеному режимі, коли $\dot{i}_d = 0, \dot{i}_q = 0$.

Перевагою такого методу є те, що при нульовому струмі виключається вплив зміни активного опору та нелінійностей інвертора. Умови тесту передбачають роботу в статичному режимі, тому з отриманих характеристик потокозчеплень можна визначити насичення магнітної системи, розрахувати індуктивності та магнітний потік постійних магнітів.

Визначення потокозчеплень. В усталеному режимі при $i_d = 0$ залежність потокозчеплення за віссю q дорівнює

$$\Psi_q(i_q) = -\frac{u_d}{\omega p_n}. \quad (3)$$

Аналогічно, за умови $i_q = 0$ потокозчеплення за віссю d визначається як

$$\Psi_d(i_d) = \frac{u_q}{\omega p_n}. \quad (4)$$

За умов $i_d = 0$, $i_q = 0$, $\omega = \text{const}$ з рівняння (4) можливо визначити магнітний потік постійних магнітів $L_{md}i_f$ за наступною формулою:

$$L_{md}i_f = \Psi_d(i_d = 0). \quad (5)$$

Після отримання характеристик (3), (4), для подальшого аналізу вони апроксимуються. Для цього застосовується «Curve Fitting Toolbox» в програмному середовищі MatLab.

Статичні та інкрементальні індуктивності у разі насичення магнітної системи розраховуються за формулами:

$$L_d(i_d) = \frac{\Psi_d(i_d)}{i_d}, \quad L_q(i_q) = \frac{\Psi_q(i_q)}{i_q}, \quad (6)$$

$$L_{de}(i_d) = \frac{\Delta\Psi_d}{\Delta i_d}, \quad L_{qe}(i_q) = \frac{\Delta\Psi_q}{\Delta i_q}. \quad (7)$$

Результати експерименту. Для експериментального тестування виконано розробку, виготовлення та налаштування експериментальної установки з IPMSM потужністю 3 кВт, параметри якого наведено в Додатку.

До складу експериментальної установки, функціональну схему якої показано на Рисунок 1, входять наступні блоки:

- силовий перетворювач потужністю 3 кВт;
- керуючий контролер на базі 32-х розрядного цифрового сигнального процесору TMS320F28335 з плаваючою комою, в якому програмно реалізуються алгоритми керування IPMSM;
- явнополосний синхронний двигун зі збудженням від постійних магнітів потужністю 3 кВт (M1) та асинхронний двигун потужністю 2.2 кВт (M2);
- два фотоімпульсних датчика швидкості (енкодери) з розподільчою здатністю 4096 імпульсів/об;
- пульт керування;

- ПК для програмування контролера та візуалізації перехідних процесів;
- серійний перетворювач частоти компанії NORDAC SK 545E-401-340-A для керування асинхронним двигуном M2.

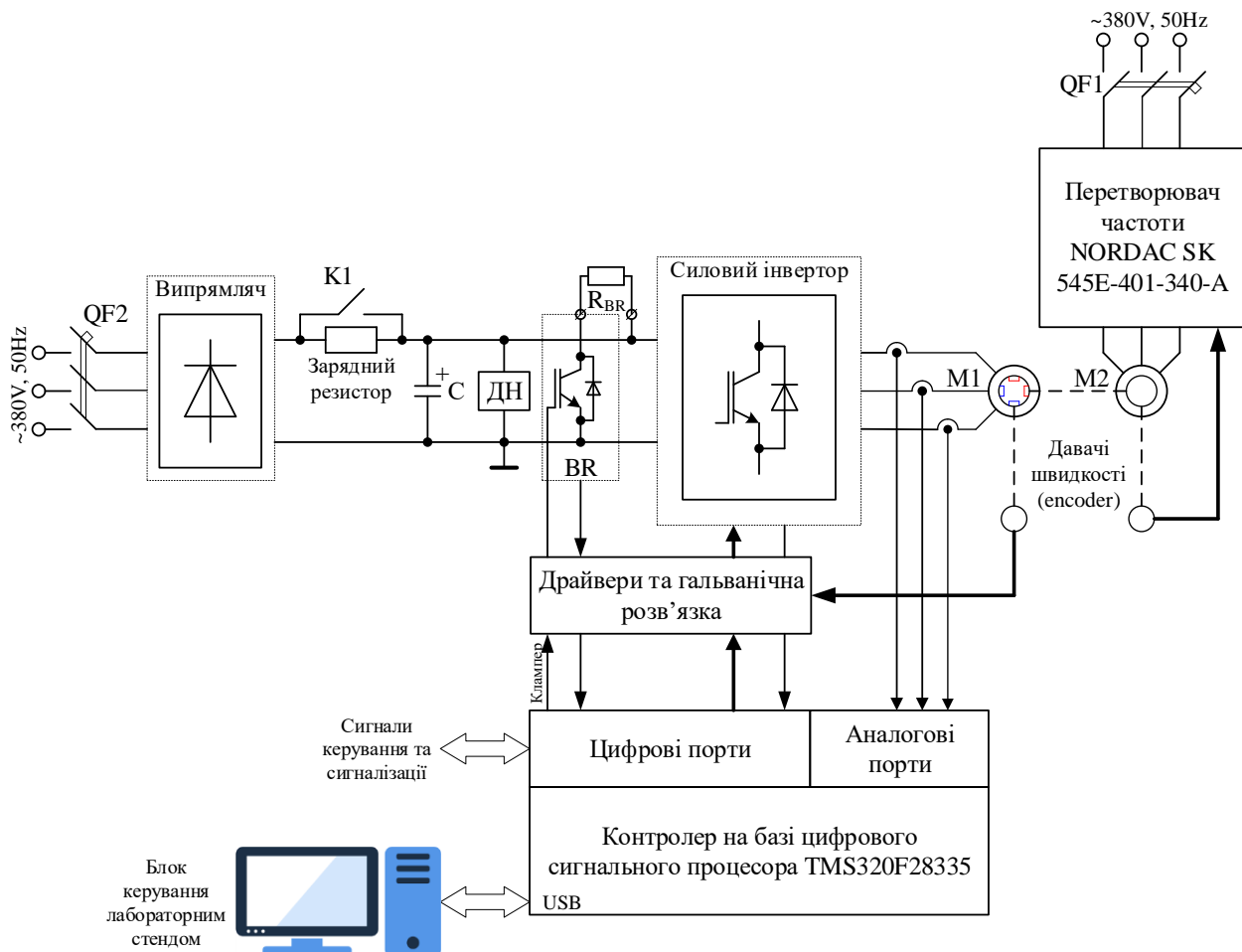


Рисунок 1 – Функціональна схема експериментальної установки

У тестуванні використовувався такий метод знаходження положення осі магнітного потоку: до однієї обмотки статора IPMSM було подано постійну напругу, внаслідок чого ротор машини повернувся уздовж дії струму. Таке положення відповідає нульовому куту повороту системи координат (d-q) відносно (a-b). В подальшому це положення зберігається в пам'яті контролера.

Тестування було проведено для постійної швидкості $\omega = 157$ рад/с. Струм i_d або i_q змінювався від $i_{\max} = 7.5$ А до $i_{\min} = -7.5$ А (значення близькі до номінальних) лінійно від часу, приблизно за 60 с. Прийняті значення коефіцієнтів регуляторів струму $k_i = 30$, $k_{ii} = 1250$ забезпечують достатню швидкодію контурів регулювання струму для розгляду процесів регулювання струмів як квазіусталених.

Експериментально отримані залежності $\Psi_d(i_d)$ та $\Psi_q(i_q)$ представлено лініями чорного кольору на Рисунок 2а та Рисунок 2б, в той час як апроксимовані залежності показано червоними лініями. Експериментальні дані попередньо було відфільтровано без втрати характеру їх зміни.

З графіків на Рисунок 2б видно, що при нульовому $i_q = 0$ потокозчеплення $\Psi_q(i_q = 0) \neq 0$, що потребує додаткового дослідження. Залежність $\Psi_d(i_d)$ апроксимована тільки в діапазоні від'ємних значень струму, так як цей діапазон відповідає робочому режиму IPMSM.

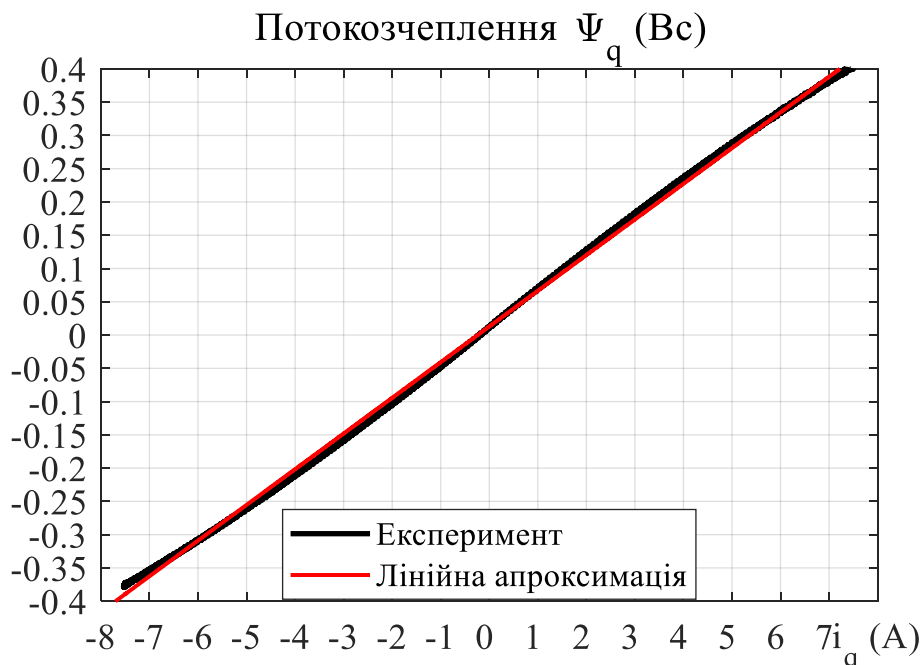
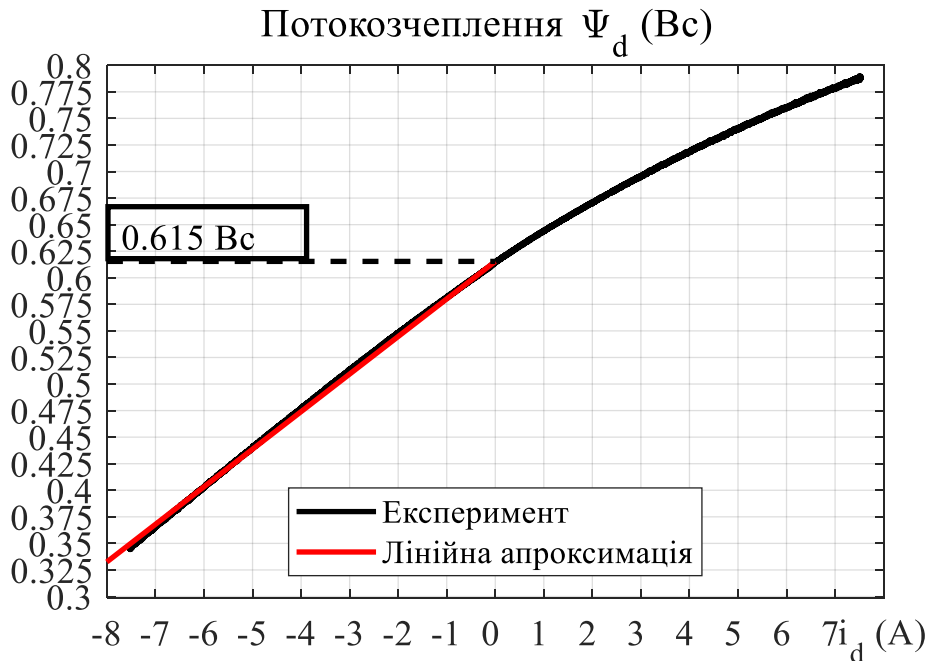


Рисунок 2 – Залежності потокозчеплень від струму: а) $\Psi_d(i_d)$, б) $\Psi_q(i_q)$

Вигляд залежностей $\Psi_d(i_d)$ і $\Psi_q(i_q)$ свідчить, що індуктивність $L_d(i_d)$ знижується зі збільшенням струму $i_d > 0$ внаслідок насичення магнітної системи, що корелюється з даними [9], [12]. Для $i_d < 0$ в розглянутому діапазоні струмів насичення є незначним. Індуктивність $L_q(i_q)$ також дещо зменшується в зоні номінальних значень струму i_q , але з достатньою для практики точністю може вважатися постійною.

Отже функції потокозчеплень допускають наступну лінійну апроксимацію:

$$\Psi_d(i_d) = k_1 i_d + k_2, \quad (8)$$

$$\Psi_q(i_q) = k_3 i_q + k_4, \quad (9)$$

де k_m , $m = 1, 2, 3, 4$ – коефіцієнти апроксимації.

З Рисунок 2а в точці $i_d = 0$ отримано значення магнітного потоку постійних магнітів $L_{md} i_f = k_2 = 0.615$ Вс. З Рисунок 2б при нульовому струмі $i_q = 0$ потокозчеплення складає $\Psi_q(i_q = 0) = k_4 = 0.011$ Вс (2 % від $L_{md} i_f$). Отримані значення індуктивностей: $L_d = k_1 = 35.4$ мГн за умови $i_d < 0$, $L_q = k_3 = 53.6$ мГн.

Графіки перехідних процесів в умовах тесту ідентифікації представлено на Рисунок 3 та Рисунок 4. Результати моделювання в системі з ідеальним інвертором (без ШІМ) для випадку дослідження $\Psi_q(i_q)$ показано на Рисунок 5. Порівнюючи перехідні процеси Рисунок 4 та Рисунок 5, можна встановити високий ступень співпадіння графіків перехідних процесів для змінних, які необхідні для ідентифікації. В той же час суттєва різниця в поведінці напруги u_q в реальній установці та в моделюванні свідчить про вплив «мертвого часу» інвертора, що не враховано в моделі, але ця змінна не використовується для визначення залежності $\Psi_q(i_q)$. Цей висновок є справедливим також для тесту по визначенню залежності $\Psi_d(i_d)$.

Висновки. Запропоновано метод експериментального визначення статичних індуктивностей та магнітного потоку постійних магнітів IPMSM на основі оцінених функцій потокозчеплень від струмів, незалежно від неідеальностей інвертора і змін еквівалентного активного опору статора.

Розроблено експериментальну установку з IPMSM, яка дозволяє виконувати дослідження процесів керування та методів ідентифікації параметрів машини. З використанням розробленої установки експериментально визначено параметри двигуна: магнітний потік постійних магнітів $L_{md} i_f = 0.615$ Вс, індуктивності $L_d = 35.4$ мГн за умови $i_d < 0$ та $L_q = 53.6$ мГн.

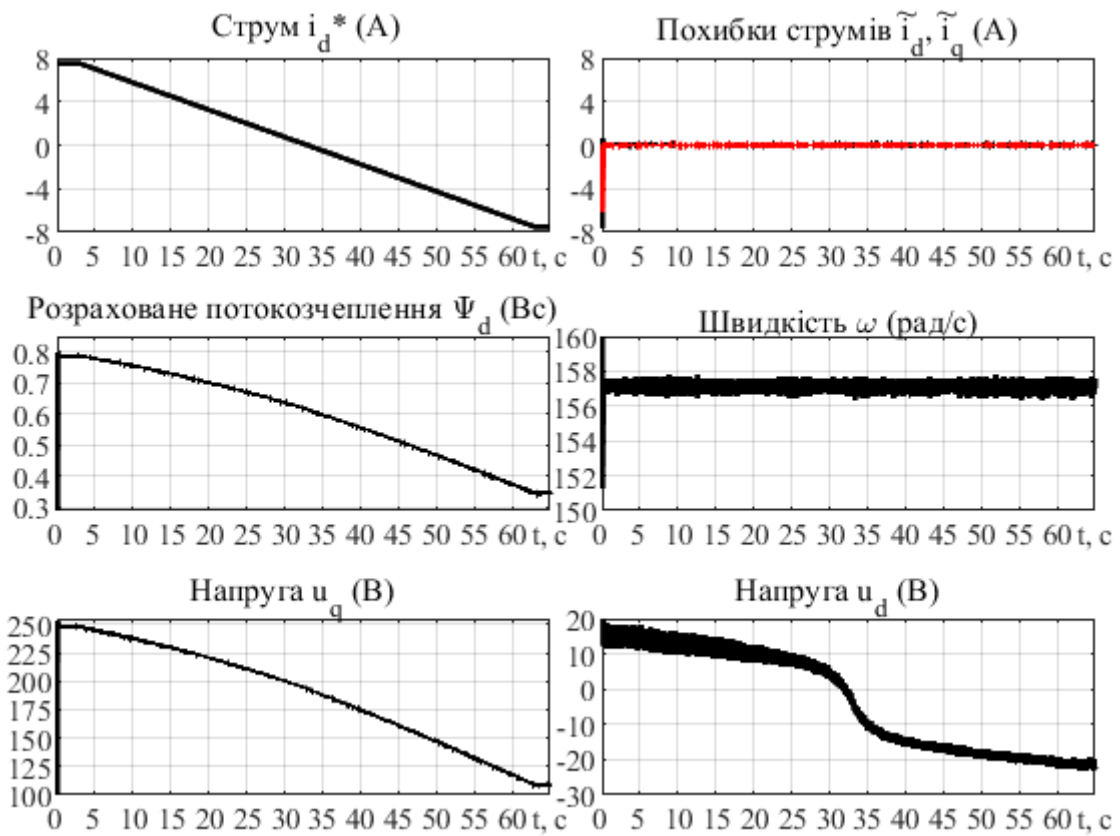


Рисунок 3 – Графіки перехідних процесів при дослідженні залежності $\Psi_d(i_d)$

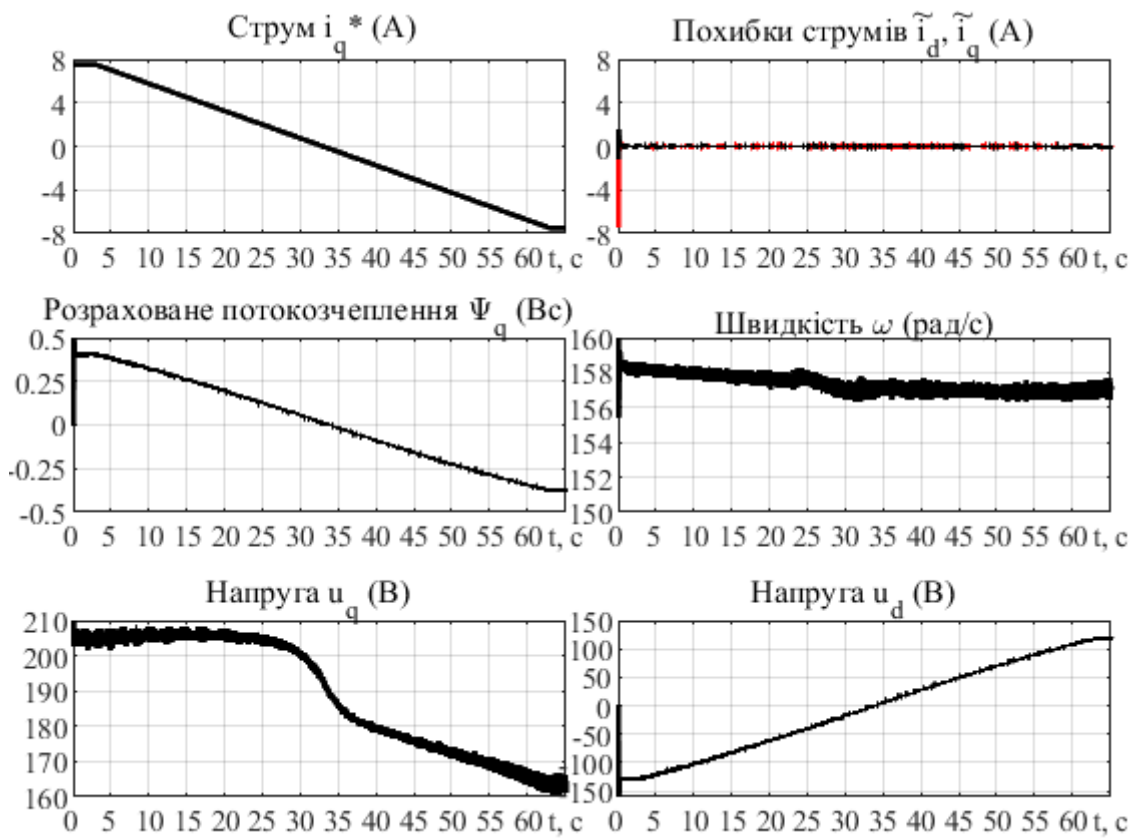


Рисунок 4 – Графіки перехідних процесів при дослідженні залежності $\Psi_q(i_q)$

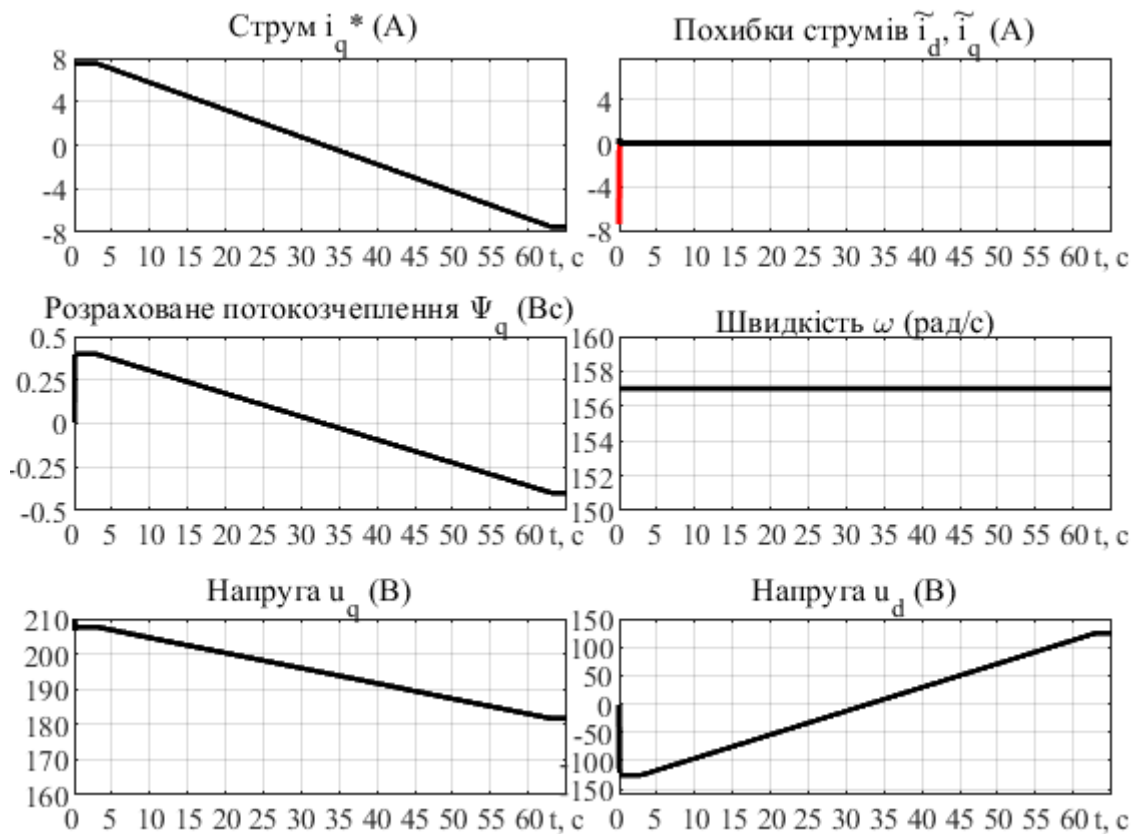


Рисунок 5 – Результати моделювання в системі з ідеальним інвертором при дослідженні залежності $\Psi_q(i_q)$

Додаток. Параметри двигуна NORD SK 100T/4 TF IG4 (M1): номінальна потужність $P_n = 3$ кВт, номінальна швидкість $\omega_n = 220$ рад/с, номінальний момент $T_n = 13.6$ Нм, кількість пар полюсів $p_n = 2$, номінальний струм $I_n = 5.4$ А (діюче значення), струм $I_{SF} = 8.1$ А, активний опір $R_n = 1.3$ Ом, індуктивності $L_{qn} = 45.9$ мГн та $L_{dn} = 22.6$ мГн, коефіцієнт моменту $k_T = 2.6$ Нм/А.

Перелік посилань

1. S.-K. Sul, *Control of electric machine drive systems*. John Wiley & Sons, 2011.
2. G. Pellegrino, T. M. Jahns, N. Bianchi, W. L. Soong, and F. Cupertino, *The rediscovery of synchronous reluctance and ferrite permanent magnet motors: tutorial course notes*. Springer, 2016.
3. B. M. Wilamowski, J. D. Irwin, *Power electronics and motor drives*. CRC Press, 2017.
4. S. Peresada, Y. Nikonenko and V. Reshetnyk, "Adaptive Speed Control and Self-Commissioning of the Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors," *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 388-394. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879913
5. S. Amornwongpeeti, O. Kiselychuk, J. Wang, N. Shatti, N. Shah and M. Soumelidis, "Adaptive torque control of IPMSM motor drives for electric vehicles," *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Edinburgh, 2017, pp. 226-231. doi: 10.1109/ISIE.2017.8001252
6. S. Peresada, Y. Nikonenko, V. Reshetnyk and D. Rodkin, "Adaptive Position Control and Self-Commissioning of the Interior Permanent Magnet Synchronous Motors," *2019 IEEE*

International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2019, pp. 498-501. doi: 10.1109/MEES.2019.8896410

7. Y. Ren, G. Liu, Q. Chen and H. Zhou, "Online Inductance Identifications of Interior Permanent Magnet Synchronous Machine Based on Adaline Neural Network," *2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Hangzhou, 2016, pp. 1-5. doi: 10.1109/VPPC.2016.7791738

8. G. Wang, C. Li, G. Zhang and D. Xu, "Self-adaptive stepsize affine projection based parameter estimation of IPMSM using square-wave current injection," in *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 48-57, March 2017. doi: 10.23919/TEMS.2017.7911108

9. V. Bobek, *PMSM electrical parameters measurement. Application note*. Freescale Semiconductor Document Number: AN4680, 2013.

10. Yoon, J.-S & Lee, K.-G & Lee, J.-S & Lee, K.-B. Off-Line Parameter Identification of Permanent Magnet Synchronous Motor Using a Goertzel Algorithm. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2015, vol. 10, pp. 2262-2270, doi: 10.5370/JEET.2015.10.6.2262.

11. X. Wu, X. Fu, M. Lin and L. Jia, "Offline Inductance Identification of IPMSM With Sequence-Pulse Injection," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 11, pp. 6127-6135, Nov. 2019. doi: 10.1109/TII.2019.2932796

12. W. Xu and R. D. Lorenz, "High-Frequency Injection-Based Stator Flux Linkage and Torque Estimation for DB-DTFC Implementation on IPMSMs Considering Cross-Saturation Effects," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 6, pp. 3805-3815, Nov.-Dec. 2014. doi: 10.1109/TIA.2014.2322134