

**МОДЕЛЮВАННЯ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ І ПРИСТРОЇВ**

УДК 621.313

**АНАЛІЗ ВПЛИВУ СПІЗНЕНЬ УВІМКНЕННЯ
ОДНІЄЇ ФАЗИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА
НА КОЛИВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО МОМЕНТУ
ПІД ЧАС ЗАПУСКУ**

З. Людвіковські, С. Цеслік, О. Плахтина

*Інститут електротехніки сільськогосподарчо-технічної академії
85 – 791 Бидгощ, вул. Каліцького, 7, Польща,
E-mail: slawciesz@mail.atr.bydgoszcz.pl*

Проаналізовано вплив спізнення ввімкнення однієї фази напруги живлення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором на обмеження коливання електромагнітного моменту під час запуску електропривода.

Ключові слова: запуск асинхронного двигуна.

Запуск асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором є перехідним електромеханічним процесом, який часто розглядали занадто спрощеним способом. Ще порівняно недавно увага дослідників і експлуататорів електроприводів була обмежена, головне, аналізом теплових явищ під час запуску. У багатьох випадках, що трапляються досить часто на практиці, запуск є одним із процесів, який значно відповідає за аварійність і безпечну роботу електропривода. Одним із шкідливих наслідків безпосереднього запуску електроприводів з асинхронними двигунами є скручувальні коливання, яких зазнають елементи, що обертаються, наприклад, кінці валів з'єднаних машин.

В Інституті електротехніки сільськогосподарчо-технічної академії м. Бидгощ опрацьовано спосіб запуску асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, у разі застосування якого зменшуються коливання електромагнітного моменту двигуна, що поліпшує динаміку запуску і обмежує механічні вібрації електропривода. Цей спосіб полягає в контрольованому спізненню ввімкнення однієї фази напруги живлення відносно часу ввімкнення решти фаз напруг живлення двигуна [1–3].

Проаналізовано вплив спізнення ввімкнення однієї фази індукційного двигуна з короткозамкненим ротором на коливання електромагнітного моменту двигуна під час запуску.

Розглянемо електропривід із асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором (номінальна потужність 11 кВт), що навантажений робочою машиною. Обмотки статора з'єднані зіркою. Робоча машина зчеплена з валом асинхронного двигуна, натомість момент інерції мас, що обертаються, (приведений до валу

двигуна) дорівнює потрійному значенню номінального моменту інерції двигуна (номінальний момент інерції ротора асинхронного двигуна $0,096 \text{ кгм}^2$). Під час запуску приводу вважаємо, що момент навантаження двигуна дорівнює нулю. Живлення електропривода забезпечене від стабільної трифазної мережі, параметри якої дають змогу безпосередньо запускати асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором номінальної потужності до 30 кВт.

З метою дослідження і з'ясування явищ, що відбуваються, розроблено контурну математичну модель електропривода з асинхронним двигуном із короткозамкненим ротором, яка наведена в [2]. Математична модель асинхронного двигуна створена на підставі таких припущень. Магнітопровід має класичну конструкцію, де на статорі і роторі розміщені трифазні обмотки (а у випадку двигуна із короткозамкненим ротором – на роторі короткозамкнена обмотка). Обмотки двигуна апроксимовані симетричними обмотками, що мають безперервний синусоїдальний розподіл. Не враховано втрат потужності в сталі магнітопроводу, а також явища витіснення струму в обмотках. Магнітне поле розглянуто у вигляді трьох незалежних частин: поле головне (з урахуванням нелінійності, спричиненої насиченням сердечника), поле розсіяння обмоток статора, а також поле розсіяння обмоток ротора.

Електромеханічні перехідні процеси в асинхронному двигуні описують такими рівняннями:

$$\frac{d}{dt} \Psi + \mathbf{R} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \mathbf{0}; \quad \Omega = \frac{1}{p} \frac{d}{dt} \vartheta; \quad T + T_o = J \frac{d}{dt} \Omega, \quad (1)$$

де $\Psi = [\Psi_A \ \Psi_B \ \Psi_C \ \Psi_a \ \Psi_b \ \Psi_c]^T$ – вектор зв'язаних магнітних потоків обмоток статора (індекси, що стосуються фаз: А, В, С) і ротора (індекси, що стосуються фаз: а, b, с) асинхронної машини; $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{diag}(\mathbf{R}_A, \mathbf{R}_B, \mathbf{R}_C) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \text{diag}(\mathbf{R}_a, \mathbf{R}_b, \mathbf{R}_c) \end{bmatrix}$ – матриця активного опору обмоток статора і ротора (приведених до статора); $\mathbf{i}_s = [i_A \ i_B \ i_C]^T$, $\mathbf{i}_r = [i_a \ i_b \ i_c]^T$ – вектори фазних струмів обмоток статора і ротора машини; $\mathbf{u} = [u_A \ u_B \ u_C]^T$ – вектор фазних напруг статора машини; Ω – механічна кутова швидкість ротора; ϑ – електричний кут повороту ротора; p – кількість пар полюсів машини; T – електромагнітний момент машини; T_o – механічний момент на валі ротора машини; J – момент інерції ротора машини і приєднаних механічних елементів.

Магнітні потоки, зв'язані з фазними обмотками статора і ротора, згідно з прийнятими припущеннями, наведені у вигляді суми відповідної складової потоку поля головного $\Psi_{\mu j}$ і потоку розсіяння $\Psi_{\sigma j}$ (де j : А, В, С, а, b, с). Магнітний потік для головного поля асинхронної машини, представлений вектором Ψ_{μ} , є функцією намагнічувального струму i_{μ} (просторовий вектор намагнічувального струму i_{μ} отримують, додаючи геометрично просторові вектори струмів статора

i_s і ротора i_r [2]). Згідно із прийнятими припущеннями, вектори Ψ_μ і i_μ колінеарні, а залежність між їхніми модулями описує характеристика намагнічування $\Psi_\mu(i_\mu)$ (характеристику намагнічування для двигуна, що розглядаємо, показано на рис. 1).

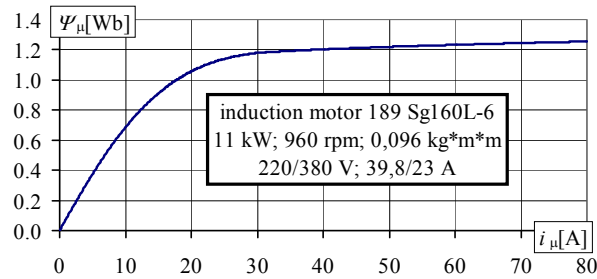


Рис. 1. Характеристика намагнічування індукційного двигуна Sg160L–6

Електромагнітний момент двигуна

$$T = \Psi_\mu^T \Gamma_g^T C^T i_r, \quad (2)$$

де C , Γ і $\Gamma_g = \frac{d\Gamma}{d\vartheta}$ – матриці трансформації змінних до відповідних систем координат [2].

На рис. 2–5 показано результати досліджень запуску електропривода з асинхронним двигуном із короткозамкненим ротором Sg160L–6, тут зображено струми, швидкості і моменти у відносних одиницях .

Рис. 2 відображає результати досліджень перехідного процесу, спричиненого увімкненням (одночасним увімкненням трьох фаз) двигуна до електромережі. Під дією напруги, поданої на обмотки статора двигуна, в них протікатимуть струми (див. рис. 2, б). Одночасна подача живлення у три фази призведе до магнітного перепливу в усіх трьох фазах. Просторовий вектор потоку, зв'язаного магнітно з обмотками машини, для головного поля в момент увімкнення двигуна у мережу починає обертатися (див. рис. 2, а). Головний магнітний контур машини практично не є намагнічений (нульові початкові умови), і траєкторія кінця вектора потоку набуває нерегулярних форм. Електромагнітний момент, згідно з рівнянням (2), залежить як від потоку головного поля, так і від струмів в обмотках. Електромагнітний момент і швидкість ротора двигуна показано на рис. 2, в. До часу, коли потік досягне відповідну до режиму роботи траєкторію, електромагнітний момент коливається. При незмінних величинах моменту навантаження двигуна, а також моменту інерції обертальних мас це призводить до зміни прискорення ротора асинхронного двигуна, а в деяких випадках також його пригальмовування (від'ємне прискорення). Такий стан є шкідливим, зважаючи, між іншим, на скручувальні вібрації елементів валів і механічні вібрації, яких зазнають конструкційні елементи.

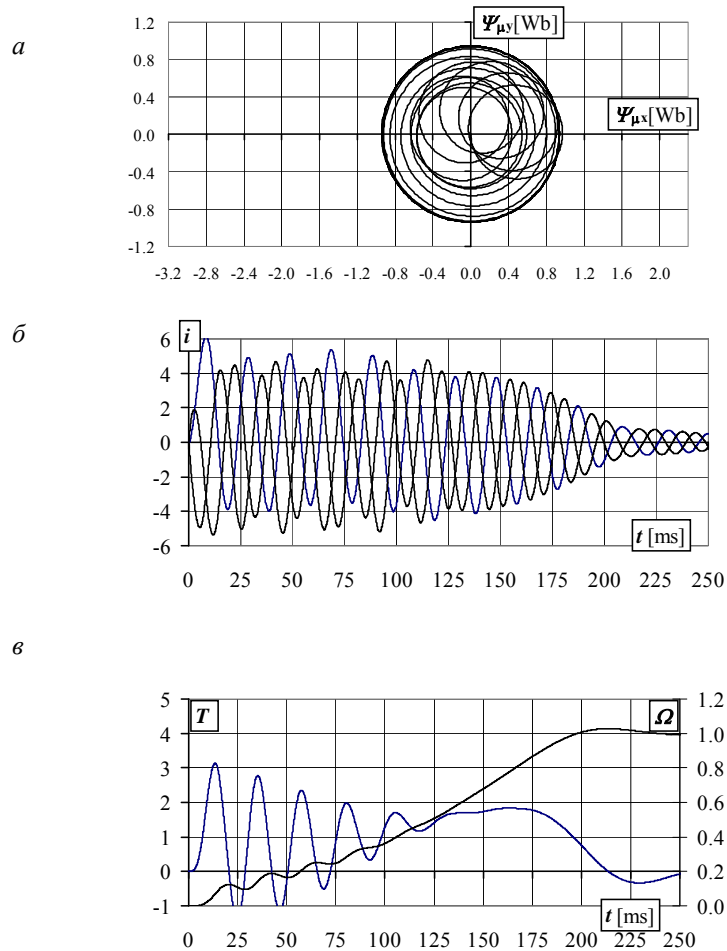


Рис. 2. Запуск ненавантаженого асинхронного двигуна Sg160L–6, з одночасним увімкненням трьох фаз

Результати досліджень перехідних процесів в електроприводі в разі увімкнення двигуна до електромережі із спізненням в одній фазі показано на рис. 3. Простежується фазна напруга у фазі А електромережі живлення. В момент переходу напруги через нуль приєднуються до напруги фази В і С двигуна. Під дією цих напруг в обмотках фаз В і С потечуть струми (див. рис. 3, б). У фазі А струм не протікає. Це призводить до утворення магнітного поля, яке не обертається у просторі, з огляду на що не створюється електромагнітний момент двигуна, і ротор залишається нерухомим (див. рис. 3, в). Однак феромагнітне

осердя двигуна підмагнічується – просторовий вектор магнітного потоку для головного поля збільшується у довжині, але не змінює просторового положення (не змінює напрямку дії). Через 2,5 мс від моменту увімкнення двох фаз у мережу живлення вмикається фаза А обмотки. Це викликає струм у фазі А (див. рис. 3, б) і просторове переміщення вектора потоку (див. рис. 3, в) – обертове просторове магнітне поле. Настають ненульові магнітні умови, що сприяють створенню електромагнітного моменту двигуна і спричиненню руху ротора (див. рис. 3, в). Ненульові магнітні умови – тобто, на практиці, підмагнічування сердечника двигуна (у властивому напрямі), – призводять до зменшення коливань електромагнітного моменту в фазі запуску і менших змінах прискорень двигуна. Також зменшилася кількість „пригальмовувань” (від’ємного прискорення) ротора асинхронного двигуна.

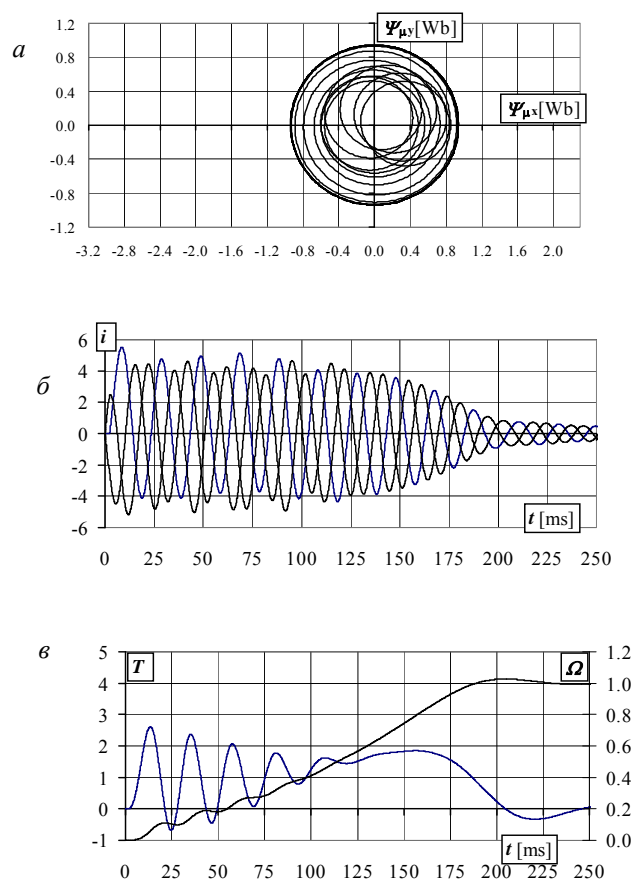


Рис. 3. Запуск навантаженого асинхронного двигуна Sg160L–6 зі спізнанням увімкнення однієї фази, що дорівнює 2,5мс

На рис. 4 показано перехідний процес електропривода під час запуску, в спосіб, описаний вище, але з урахуванням, що спізнення вмикання фази А становить 5,0 мс.

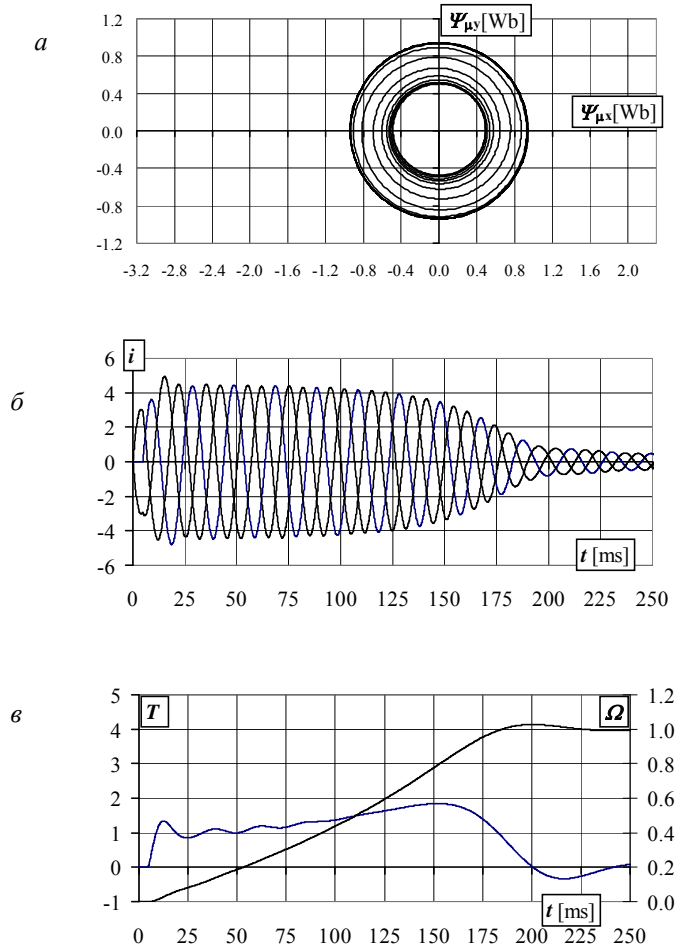


Рис. 4. Запуск невантаженого асинхронного двигуна Sg160L–6 зі спізненням ввімкнення однієї фази, що дорівнює 5,0 мс

Обвідні струмів, що протікають у фазних обмотках статора двигуна (див. рис. 4, б), порівняно із показаними на рис. 2, б і 3, б, практично не мають коливань. У цьому випадку відбувається таке підмагнічення сердечника, що практично із появою складової фази А (через 5 мс від моменту ввімкнення фаз В і С у мережу) кінець просторового вектора магнітного потоку для головного поля починає рухатись за траєкторією, що відповідає режиму роботи двигуна (див. рис. 4, а). Зрозуміло, що після зменшення струмів в обмотках двигуна зменшуються спади напруги на активному опорі обмоток, а також зменшуються напруги на

індуктивностях обмоток, що призводить до збільшення напруги асинхронного двигуна і збільшення магнітного потоку для головного поля. Збільшується діаметр округу траєкторії кінця просторового вектора потоку для головного поля (див. рис. 4, *a*). Поліпшуються динамічні процеси запуску. Практично зникають коливання електромагнітного моменту (див. рис. 4, *в*), і швидкість ротора збільшується із незмінним прискоренням без "пригальмовувань" ротора (від'ємних прискорень нема).

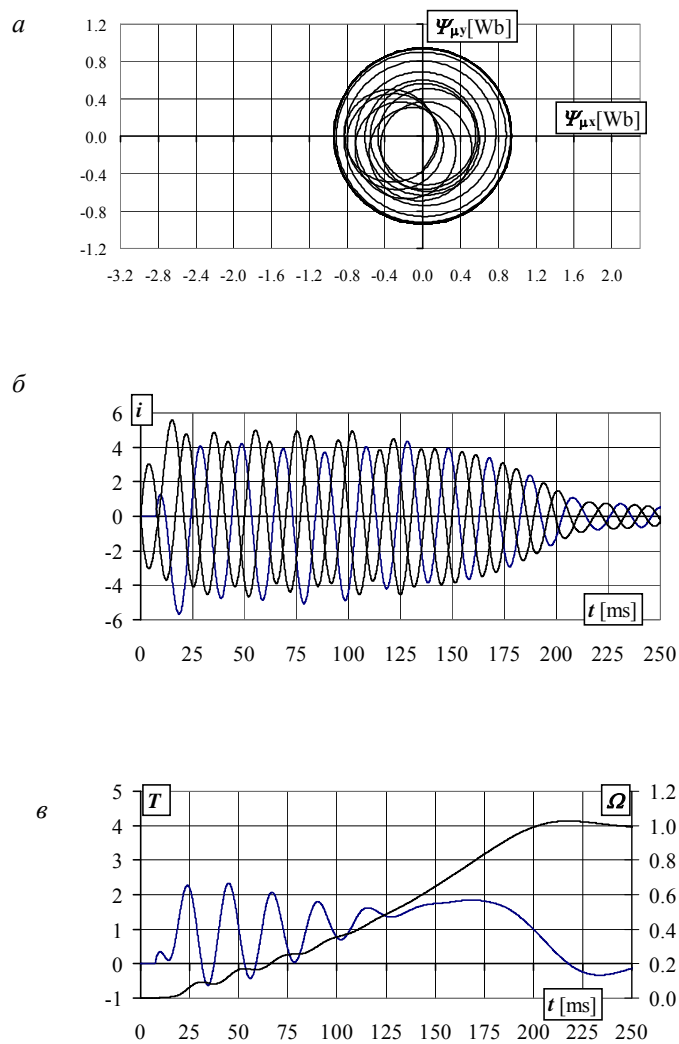


Рис. 5. Запуск ненавантаженого асинхронного двигуна Sg160L-6 зі спізненням ввімкнення однієї фази, що дорівнює 7,5 мс

Рис. 5 відображає характеристики перехідного процесу під час запуску електропривода зі спізненням ввімкнення однієї фази 7,5 мс. Явища, що відбуваються, якісно подібні до тих, що виникають у випадку, описаному на рис. 3. Порівняно з результатами, отриманими у попередньому випадку (див. рис. 4), спізнення 7,5 мс погіршує динаміку запуску – з'являються коливання електромагнітного моменту, швидкість ротора збільшується із різними прискореннями, з'являються від'ємні величини прискорень ("пригальмовування" ротора).

Отже, доведено, що є змога обмежити коливання електромагнітного моменту асинхронного двигуна шляхом відповідного, контрольованого ввімкнення окремих обмоток до відповідних фаз напруг електроенергетичної мережі. Спосіб полягає у спостереженні за фазною напругою однієї з фаз живлення, і в момент, коли ця напруга досягне нуля, у мережу вмикаються решта фаз. Через відповідний час у мережу вмикається перша фаза. В такий спосіб підмагнічується феромагнітне осердя асинхронного двигуна (у властивому напрямі) і поліпшуються динамічні властивості електропривода: зменшуються коливання електромагнітного моменту, швидкість ротора збільшується практично із незмінним прискоренням (без від'ємних прискорень, що призводять до "пригальмовування" ротора). Це позитивно впливає на безпосередні експлуатаційні показники приводу: зменшуються скручувальні вібрації на кінцях валів обертових елементів приводу, зменшуються механічні вібрації, яких зазнають конструктивні елементи.

У результаті виконаних комп'ютерних досліджень підтверджено, що найкориснішим спізненням увімкнення однієї фази є величина, що відповідає $\frac{1}{4}$ періоду напруги мережі живлення (5 мс для напруг із частотою 50 Гц). Є очевидним, що подібні ефекти будуть отримані для спізень $t_0 = \frac{T}{4} + k \frac{T}{2}$, де $k=0,1,2,3,\dots$; T – період напруги живлення. Однак у тих випадках потрібно розглядати теплові процеси в асинхронному двигуні – у разі тривалих спізень в обмотках двигуна, ввімкнених на повну напругу мережі, протікають значні струми, що призводить до їхнього безперервного нагрівання.

1. *Ludwikowski Z., Borowski R.* Nowa koncepcja sterowania rozruchem silnika indukcyjnego klatkowego z minimalizacją udarów momentu obrotowego. Materiały Konferencji Naukowej „Modelowanie i Symulacja”. Kościelisko, Polska. 2000. P. 239–246.
2. *Ludwikowski Z., Cieslik S.* Modelowanie matematyczne napędu elektrycznego z silnikiem indukcyjnym o bezpośrednim rozruchu w komputerowej optymalizacji oscylacji momentu elektromagnetycznego. Materiały Konferencji Naukowo–Technicznej „Zastosowanie Komputerów w Elektrotechnice”. Poznań, Polska. 2003. P. 517–520;
3. *Ludwikowski Z., Cieslik S.* Limitation of mechanical vibration during start-up of induction squirrel cage motors // Charkov University Transactions “Problems of Automated Electrodrives – theory and practice”. 2003. Vol. 10. P. 189–190.

**THE ANALYSIS OF A LAG OF INDUCTION MOTOR'S ONE PHASE
CONNECTING INFLUENCE ON THE ELECTROMAGNETIC TORQUE
OSCILLATION UNDER STARTING**

Z. Ludvikovsky, S. Cieslik, O. Plakhtyna

Institute of electrical engineering, ATR
85-791 Bydgoszcz, Kalitskiego str., 7 Poland
slavcies@mail.atr.bydgoszcz.pl

The influence of a lag of the squirrel-cage induction motor's supply voltage one phase connecting on the limitation of electromagnetic torque oscillation under starting of electric drive have been analyzed in the paper.

Key words: induction motor starting.

Стаття надійшла до редколегії 03.01.2004
Прийнята до друку 01.06.2004