

УДК 62-5

**М.А. Мельничук**, аспірант,  
**А.О. Лозинський**, д. т. н., проф.

### СИНТЕЗ АЛГОРИТМУ ПРЯМОГО КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ РОЗРИВНОГО КЕРУВАННЯ

*Анотація.* Наведено огляд та аналіз систем прямого керування моментом асинхронного двигуна. Запропоновано використання модернізованих таблиць перемикань, що дозволяє зменшити пульсації струмів та моменту асинхронного двигуна. Проведено дослідження математичної моделі в програмному забезпеченні Simulink MatLAB.

*Ключові слова:* таблиця перемикань, асинхронний двигун, система керування, математична модель, розривне керування, пульсації моменту, годограф.

**М.А. Мельничук**, аспірант,  
**А. О. Лозинский** д.т. н., проф.

### СИНТЕЗ АЛГОРИТМА ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ РАЗРЫВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

*Аннотация.* Приведен обзор и анализ систем прямого управления моментом асинхронного двигателя. Предложено использование модернизированных таблиц переключений, что позволяет уменьшить пульсации токов и момента асинхронного двигателя. Проведено исследование математической модели в программном обеспечении Simulink MatLAB.

*Ключевые слова:* таблица переключений, асинхронный двигатель, система управления, математическая модель, разрывное управления, пульсации момента, годограф.

**М.А. Melnychuk**, postgraduate,  
**А.О. Lozynsky**, PhD., Professor.

### DIRECT TORQUE CONTROL BASED ON THE THEORY OF SLIDING MOD CONTROL SYNTHESIS ALGORITHM

*Abstract.* The review and analysis of direct torque control for induction motor have been investigated in this article. Proposed to use upgraded switching tables, which reduces the current and torque ripple of induction motor. Have been investigated mathematical model in software Simulink MatLAB.

*Keywords:* switches table, induction motor, control system, mathematical model, sliding mod control, torque ripple, hodograph.

#### 1. Аналіз існуючих алгоритмів системи DTC.

Сучасний етап розвитку промисловості характеризується широким застосуванням частотно-регульованого електроприводу змінного струму на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Хоч асинхронний двигун є доволі простим електромеханічним перетворювачем, синтез систем керування електроприводом на його основі є доволі складною задачею. Використання методів класичної теорії керування ускладнене як наявністю нелінійностей, так і необхідністю враховувати взаємний вплив між контурами регулювання. Для забезпечення високих динамічних та статичних характеристик системи виникає необхідність одночасного регулювання декількох взаємозв'язаних величин. В багатьох системах векторного

керування це моменто- та потокоутворююча складові струму, а в системі прямого керування моментом (DTC) – момент та потік.

Система прямого керування моментом електроприводом змінного струму, завдяки високим динамічним властивостям у поєднанні з відносною простотою алгоритму, є однією з найбільш перспективних систем керування при створенні електроприводів машин, механізмів та технологічних комплексів. Електроприводи на основі DTC мають ряд переваг, зокрема в роботах [1,3,6,8] відзначені такі як: можливість регулювання моменту при низьких швидкостях обертання двигуна; висока точність відпрацювання заданої швидкості обертання; якісні динамічні характеристики при різкій зміні моменту навантаження; простота алгоритму керування. Проте в даній системі керування, як за-

значено в роботах [7,9], є і ряд недоліків, зокрема: зміна частоти перемикачів залежно від швидкості обертання двигуна і ширини петель гістерезисних регуляторів моменту і потоку; наявність пульсацій значних пульсацій моменту, особливо на низьких швидкостях; висока частота перемикачів IGBT- транзисторів. Усунення згаданих недоліків шляхом застосування просторово-векторної модуляції [9] приводить до підвищення частоти перемикачів, що в свою чергу негативно впливає на експлуатаційні властивості електродвигуна. На нашу думку, можливим шляхом покращення характеристик системи прямого керування моментом без підвищення частоти перемикачів є адаптація таблиці перемикачів до умов роботи двигуна, тобто формування відповідних векторів напруги залежно від швидкості обертання та величини навантаження на валу асинхронного двигуна.

## 2. Застосування теорії розривного керування до синтезу прямого керування моментом асинхронного двигуна.

Для синтезу закону перемикачів керуючих впливів  $u_A$ ,  $u_B$ ,  $u_C$  алгоритму прямого керування моментом залежно від умов роботи використаємо, запропонований в [4] підхід. Згідно з таким підходом у просторі станів системи реалізується ковзний режим по поверхнях, рівняння яких визначають відхилення від заданого режиму. У випадку системи прямого керування моментом: електромагнітний момент асинхронного двигуна  $M$  рівний заданому  $M_z$ ; виконуються вимоги щодо підтримки амплітуди вектора потокочеплення на заданому рівні. Додаткове рівняння формується для забезпечення відсутності нульової складової струму статора. Сформовані функції, що характеризують відхилення від бажаного режиму, мають вигляд:

$$S_1 = C_1(M - M_z); \quad (1)$$

$$S_2 = C_2(\Psi - \Psi_z); \quad (2)$$

$$S_3 = -\int_0^t (u_A + u_B + u_C) d\lambda. \quad (3)$$

Для ефективної роботи двигуна необхідно забезпечити рівність нулеві виразів  $S_1, S_2, S_3$ , тобто за допомогою тримірної век-

тора керування, компонентами якого є розривні фазні напруги, необхідно реалізувати ковзний режим на перетині поверхонь  $S_1=0$ ,  $S_2=0$ ,  $S_3=0$ . На основі запропонованого в роботі [4] підходу, сформований вектор керуючих впливів матиме вигляд відображений у формулі (4). За аналогією з алгоритмом прямого керування моментом DTC, підставляючи значення сигналів на виході гістерезисних регуляторів потоку  $d\Psi$  та моменту  $dm$  при визначених вагових коефіцієнтах  $C_1$  та  $C_2$  розраховуються відповідні вектори напруги, які в результаті сформуєть таблицю перемикачів. Зокрема, у випадку  $C_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot C_2 \cdot \mu}{g}$

отримується наступна таблиця перемикачів (табл. 1). Дана таблиця за винятком рядків  $dm=0$ , аналогічна стандартній таблиці перемикачів DTC (табл.2). В стандартній системі DTC застосовуються нульові вектори напруги при значенні вихідного сигналу гістерезисного регулятора моменту  $dm=0$ , на відміну від отриманого при застосуванні теорії розривного керування алгоритму керування, в якому нульові вектори не застосовуються.

Аналіз, отриманих для різних значень вагових коефіцієнтах  $C_1$  та  $C_2$  таблиць перемикачів, дає змогу стверджувати, що зміна співвідношення коефіцієнтів  $C_1$  та  $C_2$  призводить до зміни меж секторів до яких належать відповідні вектори напруги. Зокрема, для зміщення сектора на  $+30^\circ$  (табл. 3) необхідно змінити коефіцієнти  $C_1$  та  $C_2$  таким чином, щоб співвідношення набуло вигляду:

$$C_1 = \frac{C_2 \cdot \mu}{\sqrt{3} \cdot g}, \text{ а для зміщення сектора на } +45^\circ$$

$$\text{(табл. 4): } C_1 \cdot v = C_2 \cdot \mu = \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

Проблемою зсуву секторів є те, що при значенні вихідного сигналу гістерезисного регулятора  $dm=0$ , для кожного сектора виникає необхідність застосовувати по два вектора напруги протягом відповідного їм значення кута  $\gamma$ . Можливим рішенням такої проблеми стало застосування вектора, який має максимальну тривалість виконання у відповідному секторі.

Дослідження поведінки отриманих алгоритмів прямого керування моментом проведено методом математичного моделювання.

$$u = u_0 \text{sign} \left[ \frac{1}{3} \begin{bmatrix} v \cdot \sin(\gamma) & \mu \cdot \cos(\gamma) \\ v \cdot \left( \frac{-\sqrt{3}}{2} \cos(\gamma) - \frac{1}{2} \sin(\gamma) \right) & \mu \cdot \left( \frac{-1}{2} \cos(\gamma) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\gamma) \right) \\ v \cdot \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\gamma) - \frac{1}{2} \sin(\gamma) \right) & \mu \cdot \left( \frac{-1}{2} \cos(\gamma) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\gamma) \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_1 \cdot (M_z - M) \\ c_2 \cdot (\Psi_z - |\Psi|) \\ -\int_0^t (u_A + u_B + u_C) d\lambda \end{bmatrix} \right] \quad (4)$$

де

$$v = \frac{-2 \cdot (L_s \cdot L_r - L_m^2)}{L_m \cdot p_n \cdot |\Psi|}, \quad \mu = \frac{3 \cdot (L_s \cdot L_r - L_m^2)}{2 \cdot L_m \cdot r_r}, \quad \cos(\gamma) = \frac{\Psi_\alpha}{|\Psi|}, \quad \sin(\gamma) = \frac{\Psi_\beta}{|\Psi|}$$

Таблиця 1 - Запропонована таблиця перемикачів векторів напруги системи DTC.

$\gamma$		-30...30	30...90	90...150	150...210	210...270	270...-30
dΨ=1	dm=1	101	100	110	010	011	001
	dm=0	100	110	010	011	001	101
	dm=-1	110	010	011	001	101	100
dΨ=1	dm=1	001	101	100	110	010	011
	dm=0	011	001	101	100	110	010
	dm=-1	010	011	001	101	100	110

Таблиця 2 - Класична таблиця перемикачів векторів напруги системи DTC.

$\gamma$		-30...30	30...90	90...150	150...210	210...270	270...-30
dΨ=1	dm=1	101	100	110	010	011	001
	dm=0	000	111	000	111	000	111
	dm=-1	110	010	011	001	101	100
dΨ=1	dm=1	001	101	100	110	010	011
	dm=0	111	000	111	000	111	000
	dm=-1	010	011	001	101	100	110

Таблиця 3 - Таблиця перемикачів векторів напруги системи DTC з зсувом сектора на +30°.

$\gamma$		0...60	60...120	120...180	180...240	240...300	300...0
dΨ=1	dm=1	101	100	110	010	011	001
	dm=0	100/110	110/010	010/011	011/001	001/101	101/100
	dm=-1	110	010	011	001	101	100
dΨ=1	dm=1	001	101	100	110	010	011
	dm=0	011/001	001/101	101/100	100/110	110/010	010/011
	dm=-1	010	011	001	101	100	110

Таблиця 4 - Таблиця перемикачів векторів напруги системи DTC з зсувом сектора на +45°.

$\gamma$		15...75	75...135	135...195	195...255	255...315	315...15
dΨ=1	dm=1	101	100	110	010	011	001
	dm=0	110/010	010/011	011/001	001/101	101/100	100/110
	dm=-1	110	010	011	001	101	100
dΨ=1	dm=1	001	101	100	110	010	011
	dm=0	001/101	101/100	100/110	110/010	010/011	011/001
	dm=-1	010	011	001	101	100	110

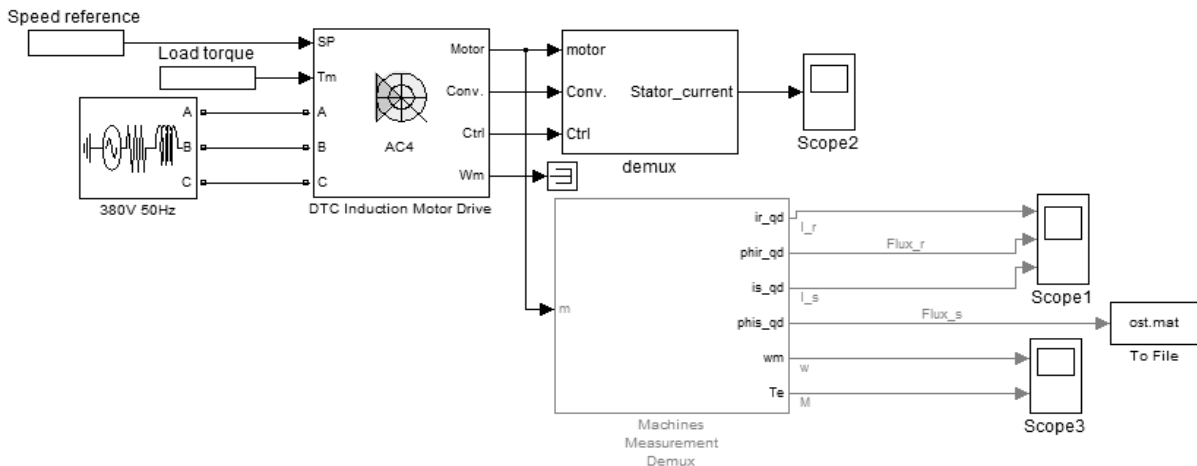


Рис.1. Модель системи DTC

### 3. Модель електроприводу змінного струму з DTC.

Для проведення досліджень використовуємо модель системи DTC (Рис.1) пакета розширення SimPowerSystem програмного середовища MATLAB. Дана модель реалізує систему керування швидкістю асинхронного двигуна при застосуванні алгоритму прямого керування моментом.

Для реалізації запропонованих алгоритмів керування з ненульовими векторами напруг при  $dm=0$  в існуючій моделі необхідно змінити параметри блока налаштувань таблиці перемикачів вектора напруги, які задаються в блоках Flux=1 (рис.2) та Flux=-1. Кожному числу відповідає вектор напруги, а порядок запису чисел в рядок Table data, визначає послідовність векторів напруги в таблиці перемикачів для  $dm=-1$ ,  $dm=0$ ,  $dm=1$ .

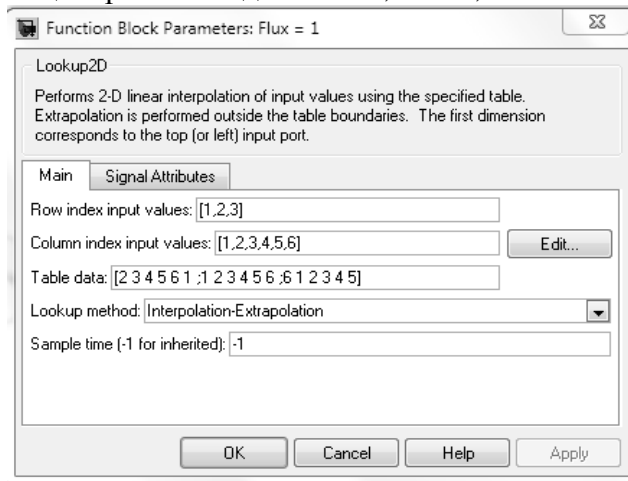


Рис.2 Налаштування параметрів блоку Flux=1.

Для реалізації зміщення сектора при зміні співвідношення коефіцієнтів  $C_1$  та  $C_2$  не-

обхідно відредагувати блок Flux\_angle sector, стандартні налаштування якого відображені на рис. 3, а штрих-пунктирною лінією виділено можливий зсув на  $+30^\circ$ .

Таким чином зміни внесені в стандартну модель приводу з DTC дають змогу виконувати дослідження алгоритмів керування, отриманих при різних співвідношення вагових коефіцієнтів  $C_1$  та  $C_2$ .

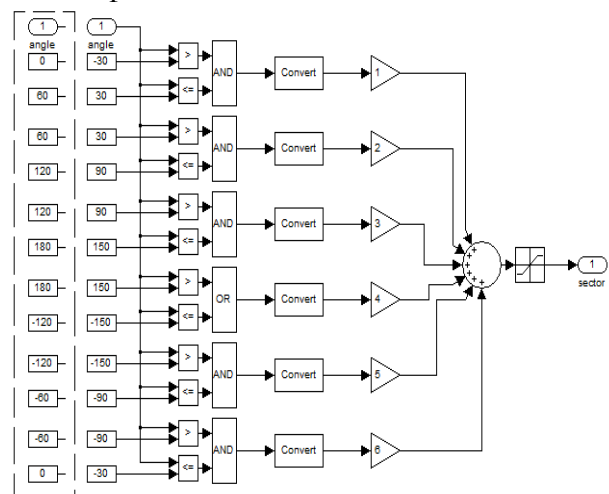


Рис.3 Блок завдання секторів

### 4. Результати проведеного дослідження.

Дослідження проводилися для різних алгоритмів керування при заданні різних комбінацій швидкості обертання ротора АД та навантаження на валу двигуна. Зокрема, досліди виконувалися для двох величин сигналу завдання швидкості обертання:  $\omega=100[\text{рад/с}]$ ,  $\omega=10[\text{рад/с}]$  та трьох значень моменту навантаження:  $M=28[\text{Н*м}]$ ,  $M=18[\text{Н*м}]$ ,  $M=8[\text{Н*м}]$ .

На рис. 4 наведено отримані годографи потоку при класичному алгоритмі керування DTC та алгоритмі керування, наведеному в табл.1. На рис. 5 наведено зміну електромагнітного моменту при швидкості обертання  $\omega \approx 100$  [рад/с] і застосуванні класичного алгоритму керування DTC та отриманого при співвідношенні коефіцієнтів  $C_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot C_2 \cdot \mu}{g}$ ,

зміна моменту відбувалася скачкоподібно. На рис. 6а та 6б – фазні струми асинхронного двигуна на одному періоді при роботі в усталеному режимі при різних моментах навантаження.

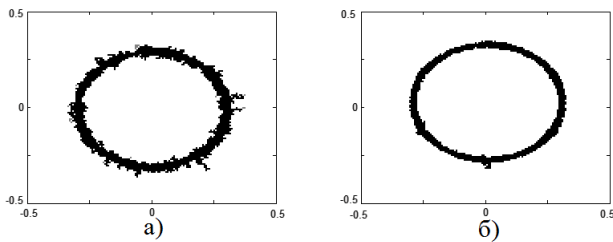


Рис. 4. Годографи потоку при швидкості обертання  $\omega \approx 100$  [рад/с] та різних значеннях моменту навантаження при а) класичному алгоритмі керування DTC; б) алгоритмі керування, наведеному в табл. 1.

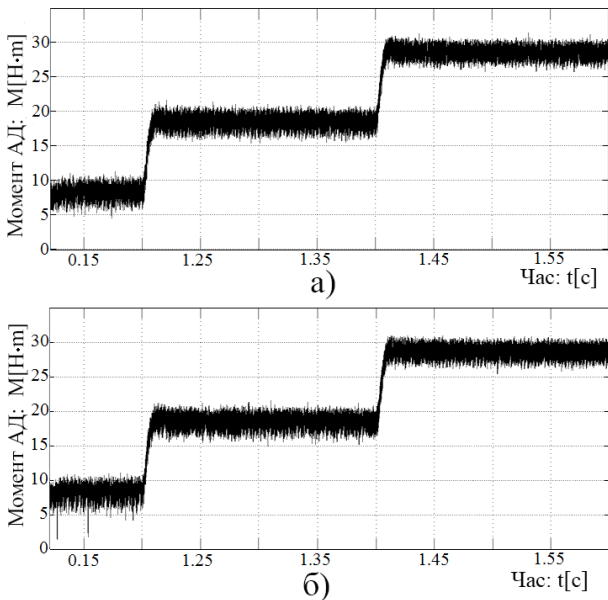


Рис. 5. Зміна електромагнітного моменту двигуна при швидкості обертання  $\omega \approx 100$  [рад/с] при а) класичному алгоритмі керування DTC; б) алгоритмі керування, наведеному в табл. 1.

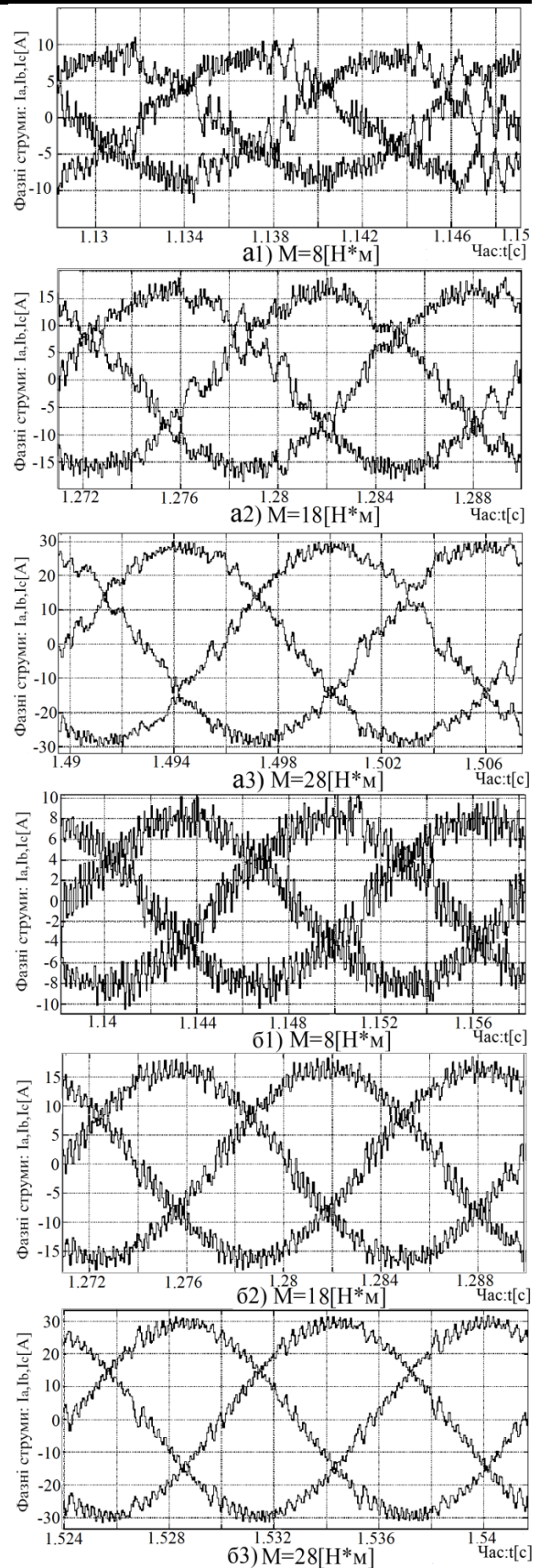


Рис. 6. Фазні струми асинхронного двигуна при різних значеннях моменту навантаження при а) класичному алгоритмі керування DTC; б) алгоритмі керування, наведеному в табл. 1.

На рис. 7-9 наведені фазні струми асинхронного двигуна при швидкості обертання  $\omega \approx 10$  [рад/с] і застосуванні класичного алгоритму керування DTC та алгоритму, при найбільш ефективному співвідношенні коефіцієнтів  $C_1$  та  $C_2$  для відповідної величини навантаження на валу двигуна.

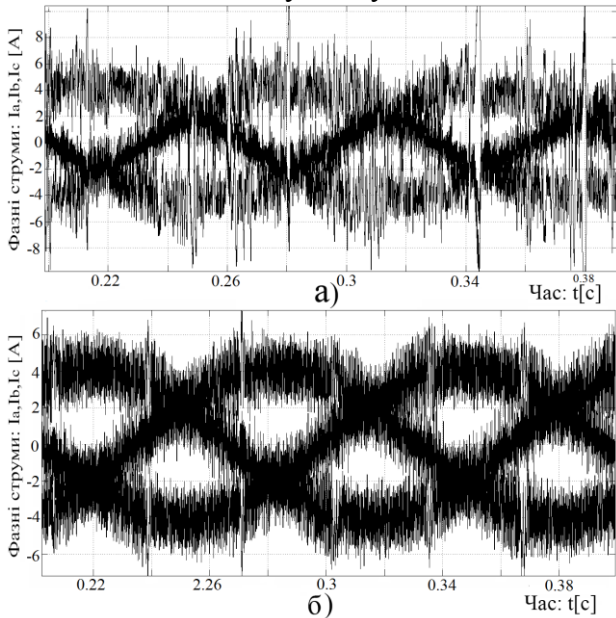


Рис. 7. Фазні струми асинхронного двигуна при швидкості обертання  $\omega \approx 10$  [рад/с] і моменті навантаження  $M \approx 8$  [Н·м] при застосуванні а) класичного алгоритму керування DTC, б) алгоритму керування, наведеного в табл. 1.

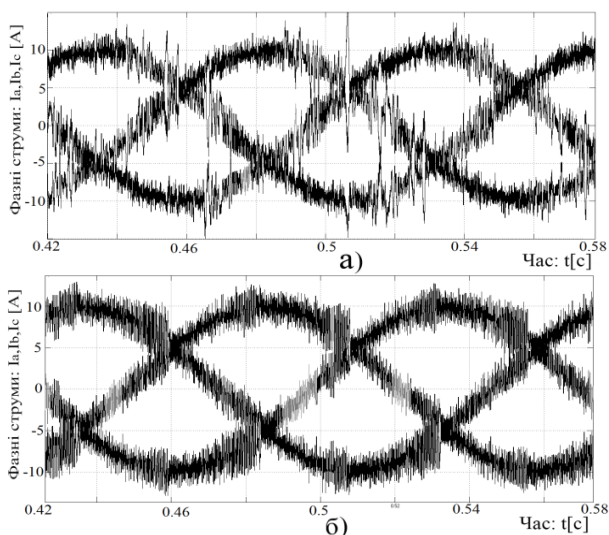


Рис. 8. Фазні струми асинхронного двигуна при швидкості обертання  $\omega \approx 10$  [рад/с] і моменті навантаження  $M \approx 18$  [Н·м] при застосуванні а) класичного алгоритму керування DTC, б) алгоритму керування, наведеного в табл. 3.

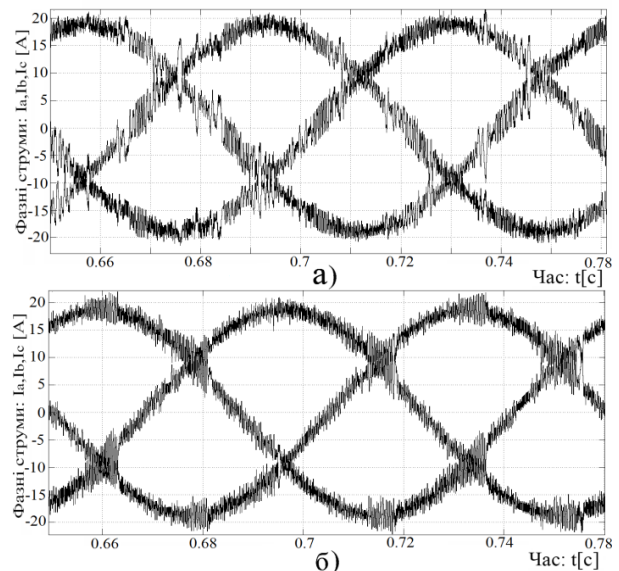


Рис. 9. Фазні струми асинхронного двигуна при швидкості обертання  $\omega \approx 10$  [рад/с] і моменті навантаження  $M \approx 28$  [Н·м] при застосуванні а) класичного алгоритму керування DTC, б) алгоритму керування, наведеного в табл. 4.

Наведені результати демонструють, що при збільшенні навантаження асинхронного двигуна при номінальній швидкості обертання доцільно переходити від класичного алгоритму керування DTC до алгоритму керування, що відповідає табл.1. На низьких швидкостях обертання доцільно використовувати різні алгоритми керування, в залежності від навантаження на валу двигуна.

**Висновки.** Застосування теорії розривного керування до синтезу алгоритму прямого керування моментом дає змогу розглядати класичний алгоритм керування DTC як частковий випадок, отриманий при певному співвідношенні коефіцієнтів при сформованих функціях, що характеризують відхилення від бажаного режиму.

Зміна співвідношення коефіцієнтів при сформованих функціях, що характеризують відхилення від бажаного режиму, призводить до зміни секторів в алгоритмі керування. Отримані результати досліджень дають змогу стверджувати, що покращення характеристик в системах прямого керування моментом можна досягнути шляхом адаптації таблиці перемикачів до умов роботи приводу, зокрема швидкості обертання та моменту навантаження.

Список використаної літератури:

1. Лозинський А. О. Зменшення пульсацій електромагнітного моменту асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в системах прямого керування за моментом / А. О. Лозинський // Вісник НТУ"ХП" "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика". –2002. –Вип.12. –Т.1. – С.48-50.

2. Перльмутер В.М., «Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока».–Харків: –2004р., 210с.

3. Рудаков В.В., Козярук А.Е., «Системы управления электроприводов», –Санкт-Петербург: –2007р. –75с.

4. Уткин В.И., «Скользющие режимы в задачах оптимизации и управления». Москва: –1981р. –367 с.

5. Тетюшева Е.С., Волков В.Ю., «Исследование методов организации прямого управления моментом асинхронного двигателя». –2007 р.

6. Alfeu J., Filho S., Ruppert E., «The takagi-sugeno fuzzy controller based direct torque control with space vector modulation for three-phase induction motor».

7. Casadei D., Profumo F., Serra G., Tani A., «FOC and DTC: Two viable schemes for induction motors torque control», IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 17, NO. 5, SEPTEMBER 2002.

8. Giuseppe S. Buja, Kazmierkowski M. «Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors-A survey», IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 51, NO. 4, AUGUST 2004.

9. Vas P., «Sensorless Vector And Direct Torque Control», Oxford University Press. 1998. –725р.

2. Perlmuter V.M., «Direct torque and current control of AC motors». –Harkiv: – 2004y., 210p. (In Russian).

3. Rudakov V.V., Kozyaruk A.E., «Electric drive systems», – St. Petersburg: –2007y. – 75p. (In Russian).

4. Utkin V.I., «Sliding modes in problems of optimization and control». Moscow: –1981y. –367 p. (In Russian).

5. Tetiusheva E.S., Volkov V.U., «Research of methods organization of direct torque control of the induction motor». –2007y. (In Russian).

6. Alfeu J., Filho S., Ruppert E., «The takagi-sugeno fuzzy controller based direct torque control with space vector modulation for three-phase induction motor» (In English).

7. Casadei D., Profumo F., Serra G., Tani A., «FOC and DTC: Two viable schemes for induction motors torque control», IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 17, NO. 5, SEPTEMBER 2002 (In English).

8. Giuseppe S. Buja, «Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors-A survey», IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 51, NO. 4, AUGUST 2004 (In English).

9. Vas P., «Sensorless Vector And Direct Torque Control», Oxford University Press. 1998. –725p. (In English)

Лозинський



Андрій Орестович,  
д.т.н., професор кафедри  
електричних машин і апаратів,  
директор Інституту енергетики та систем керування Нац. університету «Львівська політехніка».  
Тел.:050-371-37-31  
[andriy.o.lozynskyy@lpnu.ua](mailto:andriy.o.lozynskyy@lpnu.ua)

Мельничук



Михайло Анатолійович,  
аспірант  
Національного університету «Львівська політехніка».  
Тел.: 063-382-11-09  
[MelnichukMyhailo@gmail.com](mailto:MelnichukMyhailo@gmail.com)

Отримано 06.04.2016

References:

1. Lozynskyy A. O. Electromagnetic torque ripple reducing of induction motor with squirrel cage in direct torque control systems. / A. O. Lozynskyy // Automated electric drive problems. Theory and practice. –2002.–V.1. – P.48-50 ([In Ukrainian]).