

**МОДЕЛЬ ПРЯМОГО КЕРУВАННЯ МОМЕНТОМ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА  
У MATLAB**

**В.В. Стьопкін<sup>1</sup>, О.В. Юдін<sup>2</sup>, М.В. Котляр<sup>3</sup>, О.О. Паламарчук<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Національна металургійна академія України, Дніпро, Україна,  
[vasilstopkin@gmail.com](mailto:vasilstopkin@gmail.com), ORCID 0000-0001-5727-8343

<sup>2</sup> Національна металургійна академія України, Дніпро, Україна,  
[regby2018@gmail.com](mailto:regby2018@gmail.com), ORCID 0000-0002-0582-344X

<sup>3</sup> Національна металургійна академія України, Дніпро, Україна,  
[dagakotyar@gmail.com](mailto:dagakotyar@gmail.com), ORCID 0000-0003-0105-680X

<sup>4</sup> Національна металургійна академія України, Дніпро, Україна,  
[palamarchukolya6@gmail.com](mailto:palamarchukolya6@gmail.com), ORCID 0000-0002-8236-040X

**MODEL OF DIRECT CONTROL OF THE TORQUE OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR  
IN MATLAB**

**V. Stopkin<sup>1</sup>, канд. техн. наук, A. Yudin<sup>2</sup>, M. Kotliar<sup>3</sup>, O. Palamarchuk<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> National metallurgical academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine,  
[vasilstopkin@gmail.com](mailto:vasilstopkin@gmail.com), ORCID 0000-0001-5727-8343

<sup>2</sup> National metallurgical academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine,  
[regby2018@gmail.com](mailto:regby2018@gmail.com), ORCID 0000-0002-0582-344X

<sup>3</sup> National metallurgical academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine,  
[dagakotyar@gmail.com](mailto:dagakotyar@gmail.com), ORCID 0000-0003-0105-680X

<sup>4</sup> National metallurgical academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine,  
[palamarchukolya6@gmail.com](mailto:palamarchukolya6@gmail.com), ORCID 0000-0002-8236-040X

**Анотація.**

У статті розглядається актуальність, принцип функціонування та причини виникнення систем прямого керування моментом (DTC) асинхронного двигуна. Авторами виконано дослідження математичної моделі прямого керування моментом асинхронного двигуна у MATLAB, виявлені основні недоліки. Основною задачею, від вирішення якої залежить робота системи прямого керування моментом є ідентифікація потокозчеплення статора. Це вирішується інтегруванням, що призводить до накопичення помилок. Джерелом появи помилок є неточність визначення активного опору статора та його зміни в процесі роботи асинхронного двигуна. У системі DTC присутній недолік, пов'язаний з появою незначних пульсацій моменту та коливань швидкості ротора при малих навантаженнях.

**Ключові слова.**

Асинхронний електропривод, система прямого керування, інвертор, частота комутації, контролер швидкості, спостерігач

**Постановка проблеми та її зв'язок з прикладними дослідженнями**

На теперішній час при розгляданні різних варіантів автоматизованих електроприводів одним з найбільш перспективних є частотно-регульований електропривод асинхронних двигунів (АД) з короткозамкненим ротором. Новим напрямом в галузі розробки високоякісних систем керування асинхронними приводами є системи з прямим керуванням моментом (DTC – direct torque control). Такі системи в реалізації є простішими за класичні системи векторного керування, де необхідне пряме та зворотне перетворення координат електропривода, застосування регуляторів складових струму статора, формування при керуванні за напругою сигналів компенсації внутрішніх перехресних зворотних зв'язків об'єкта. Крім того що системи векторного керування асинхронними двигунами забезпечують гарні показники регулювання, їх функціонування у значній мірі залежить від параметрів двигуна та від точності визначення швидкості обертання ротора. Зміна параметрів двигуна викликає проблему переналадження (адаптації) системи керування.

Фірмою АВВ був запатентований метод прямого керування моментом (DTC). Промислова реалізація методу DTC стала можливою в середині 90-х із появою високоточної швидкодіючої мікропроцесорної техніки запропонованої фірмою АВВ (АВВ, 2003). Так у 1995 році фірма АВВ запропонувала перетворювачі частоти ACS600 з новою системою прямого керування моментом (DTC).

Системи DTC є актуальними для електроприводів, де головним є формування моменту а не стабілізація швидкості. На теперішній час пряме керування моментом є сучасним способом керування частотно-регульованим асинхронним електроприводом з такими перевагами: відсутність необхідності у зворотному зв'язку за швидкістю та положенням двигуна; висока статична та динамічна точність швидкості; оптимальне перемикання транзисторів для кожного циклу керування та відповідність привода вимогам керованого навантаження (Rupert Gouws, 2014; Azhan Ab Rahman, 2010; MathWorks. Help Center, 2018; H.F. Abdul Wahab, et al., 2008). Система DTC може розглядатися як альтернатива скалярному або векторному керуванню. Важливим у системі DTC є ідентифікація параметрів асинхронного двигуна (Pivnyak G.G, et al., 2006).

Теорія DTC заснована на принципах векторного керування. Відмінність її від векторних систем полягає у відсутності контурів регулювання проекцій струму статора, які визначають електромагнітний момент та потік. Принцип керування полягає у визначенні на кожному кроці оптимального стану інвертора напруги, такого, що викликає зміну моменту та потоку статора у необхідну сторону для зведення до нуля помилки між заданими та дійсними значеннями регульованих величин. Необхідність широтно-імпульсного модулятора як окремої ланки відпадає, а використовується гістерезисне керування. Зміна стану інвертора відбувається при перевищенні модуля помилки за моментом або потоком граничного значення. Звісно чим нижча частота комутації транзисторів тим гірше якість керування.

**Результати дослідження**

Принцип реалізації керування DTC розглядається на прикладі нерухомої системи координат (рис.1). Електромагнітний момент асинхронного двигуна знаходиться через векторний добуток потікострумів статора та ротора.

$$M = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_{\Pi} \cdot L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \cdot \psi_s \cdot \psi_r \cdot \sin \gamma, \tag{1}$$

де  $L_s$  – індуктивність статора;  $L_r$  – індуктивність ротора;  $\gamma$  – кут між векторами потоків статора та ротора.

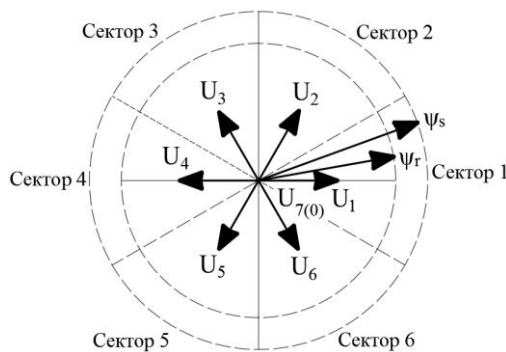
Модуль потоку статора підтримується на постійному рівні. Модуль потоку ротора змінюється повільніше за модуль потоку статора за рахунок великої постійної часу ротора. Регулювання моменту здійснюється шляхом впливу на кут між цими двома векторами. Можливість такого регулювання витікає з формули:

$$\frac{d\psi_s}{dt} = U_s - I_s \cdot R_s \approx U_s, \tag{2}$$

де  $U_s$  – напруга статора;  $I_s$  – струм статора;  $R_s$  – активний опір статора.

Формула (2) спрощується при нехтуванні падінням напруги у статорній обмотці двигуна. Це є припустимим, так як розглядається тільки напрям зміни вектора  $\psi_s$  який має такий самий напрям як і вектор напруги статора  $U_s$ .

Відповідність секторів та векторів напруги нерухомої системи координат наведено на рис.1.



**Рисунок 1 – Відповідність секторів та векторів напруг у нерухомій системі координат**

Вибір оптимального вектору здійснюється наступним чином. Площина розбивається на шість рівних секторів. Розглядається один з них. Якщо вектор статора знаходиться у секторі 1 і необхідно збільшити момент, то слід застосовувати один із випереджуючих векторів  $U_2$  або  $U_3$ . Ці два вектори збільшують кут  $\gamma$  і, як слідство збільшиться момент. Перший вектор застосовується при збільшенні модулю потоку статора, а другий при його зменшенні. Для зменшення моменту застосовується один з нульових векторів  $U_0$  або  $U_7$ .

Нульовий вектор напруги викликає зупинку вектора потоку статора. При цьому потік ротора продовжує обертатися, наздоганяючи потік статора, що призводить до зменшення моменту. При малих частотах обертання двигуна потік ротора рухається повільно, і в цьому випадку не вдається швидко зменшити момент за допомогою нульового вектора напруги. В таких випадках використовується відстаючий вектора напруги  $U_5$  або  $U_6$ .

Ефективність способу керування DTC в роботі продемонстрована на математичній моделі з використанням програми MATLAB.

Модель електропривода AC4-DTC Induction 200 HP Motor Drive наведена на рис.2.

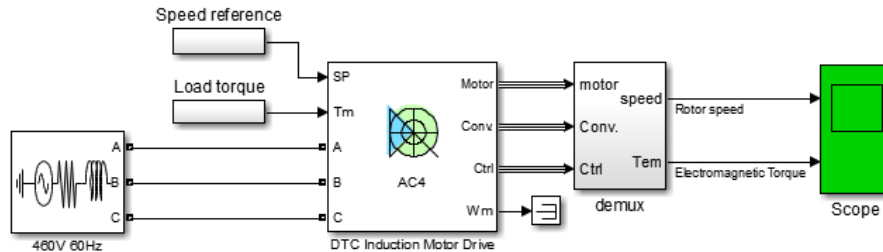


Рисунок 2 – Модель електропривода AC4-DTC Induction 200 HP Motor Drive

Модель на рис. 2 складається з таких модулів: джерело живлення з параметрами 460В, 60Гц; завдання швидкості Speed reference; завдання моменту Load torque; система керування DTC Induction Motor Drive; вилучення компонентів вхідного сигналу demux; осцилограф Scope.

Модель системи керування DTC Induction Motor Drive наведена на рис.3.

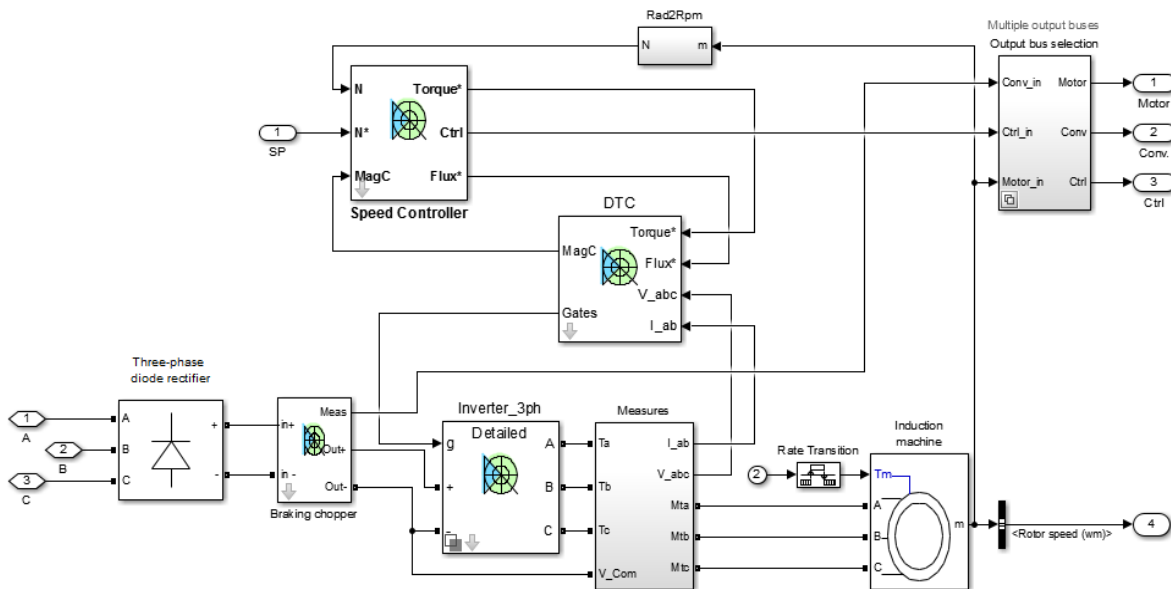
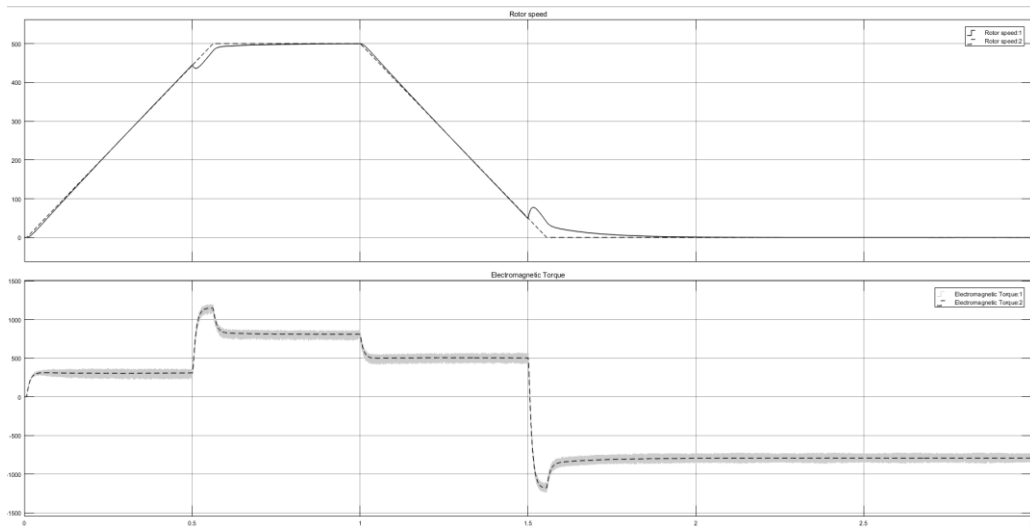


Рисунок 3 – Модель системи керування DTC Induction Motor Drive

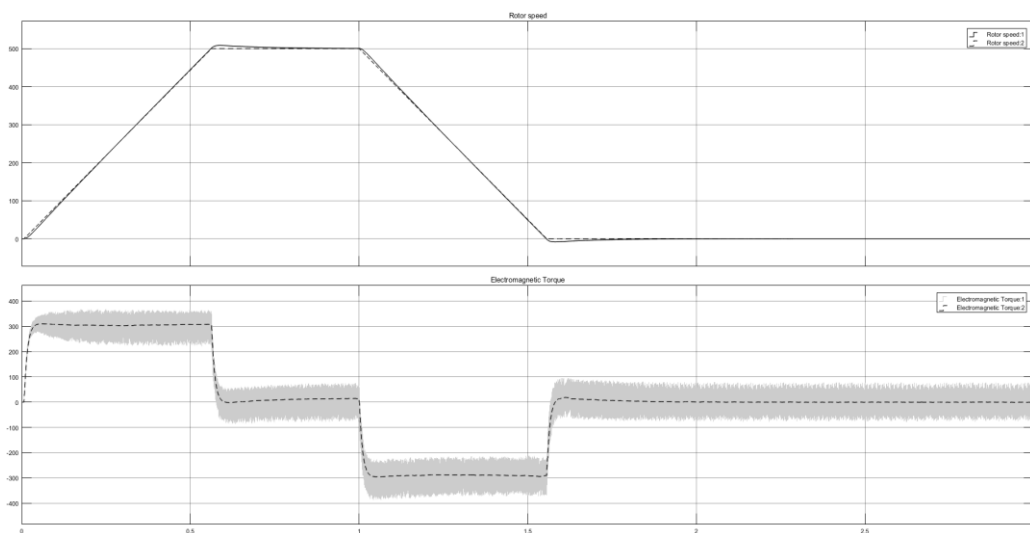
До складу моделі прямого керування моментом DTC входять такі модулі: трифазний діодний випрямляч Three-phase diode rectifier; гальмівний переривач Braking chopper; трифазний інвертор Inverter\_3ph; вимірювальний блок Measures; асинхронний двигун Induction machine; контур прямого керування моментом DTC; контур швидкості з регулятором Speed Controller. Система DTC використовує трифазний інверторний міст до складу якого входять шість комутуючих пристроїв, здійснюючих 8 видів перемикачів стану із отриманням різниці у  $60^\circ$  між просторовими векторами і нульовими (два) векторами напруги.

Графіки перехідних процесів відпрацювання завдань за швидкістю та моментом при навантаженому двигуні та без навантаження наведені на рис.4,а,б відповідно. На графіках перехідних процесів присутні коливання моменту в наслідок чого може знижуватися точність регулювання моменту. Відпрацювання за швидкістю здійснюється із незначним пере регулюванням практично без статичної помилки. Помилка за регулюванням моменту в такій системі буде присутньою та є пропорційною до інтервалу дискретності

системи. Коливання моменту будуть зменшуватися при зменшенні дискретності. Зростає необхідний запас автономного інвертора напруги за частотою. Період дискретності у спроектованій системі не може бути зміненим, тому покращення показників якості здійснюється за рахунок зменшення ширини гістерезису в регуляторі моменту (див. рис.3 блок DTC до складу якого входить гістерезисний регулятор).



а)



б)

Рисунок 4 – Графіки перехідних процесів відпрацювання завдань за швидкістю та моментом при навантаженому двигуні (а) та без навантаження (б)

**Висновки**

Досліджена модель систем прямого керування моментом (DTC) асинхронного двигуна на прикладі математичної моделі у MATLAB. Основною перевагою є простота реалізації та універсальність для усіх типів асинхронних двигунів. Основним недоліком є коливальність моменту, що знижує точність його регулювання. Усунути недолік можна шляхом розробки алгоритмів вибору стану ключів інвертора. Система DTC може виступати альтернативою векторному або скалярному керуванню для електроприводів де головним є формування моменту а не стабілізація швидкості.

**Список джерел посилань**

1. ABB. DTC (2015). A motor control technique for all seasons. Retrieved from <https://new.abb.com/drives/dtc>.
2. Rupert Gouws (2014). Efficiency analysis of an induction motor with direct torque and flux control at a hot rolling mill. Paper presented at the Industrial & Commercial Use of Energy Conference (ICUE), 3,111–115.

3. Azhan Ab Rahman (2010). Simulation on Simulink AC4 Model (200hp DTC Induction Motor Drive) using Fuzzy Logic Controller. International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics (ICCAIE 2010), 553–557.
4. MathWorks. Help Center (2018). AC4 - DTC Induction 200 HP Motor Drive. MathWorks. Help Center. Retrieved from <https://la.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/ac4-dtc-induction-200-hp-motor-drive.html>.
5. H.F. Abdul Wahab and H. Sanusi (2008). Simulink Model of Direct Torque Control of Induction Machine. American Journal of Applied Sciences, 5, 1083–1090.
6. Pivnyak G.G and Volkov A.V. (2006). Suchasni chastotno-rehulovani asynkhronni elektropryvody z shyrotno-impulsnoiu moduliatsiieiu. Monohrafiia [Modern frequency-regulated asynchronous electric drives with pulse-width modulation. Monograph], Dnipro, NMU, 470.

#### **АННОТАЦИЯ.**

В статье рассматривается актуальность, принцип функционирования и причины возникновения систем прямого управления моментом (DTC) асинхронного двигателя. Авторами выполнено исследование математической модели прямого управления моментом асинхронного двигателя в MATLAB, выявлены основные недостатки. Основной задачей, от решения которой зависит работа системы прямого управления моментом, является идентификация потокосцепления статора. Это решается интегрированием, что приводит к накоплению ошибок. Источником появления ошибок является неточность определения активного сопротивления статора и его изменения в процессе работы асинхронного двигателя. В системе DTC присутствует недостаток, связанный с появлением незначительных пульсаций момента и колебаний скорости ротора при малых нагрузках.

*Ключевые слова* Асинхронный электропривод, система прямого управления, инвертор, частота коммутации, контроллер скорости, наблюдатель

#### **ABSTRACT**

The article discusses the relevance, the principle of operation and the reasons for the emergence of direct torque control (DTC) systems of an induction motor. The authors carried out a study of the mathematical model of direct torque control of an induction motor in MATLAB, and identified the main disadvantages. The main task, on the solution of which the operation of the direct torque control system depends, is the identification of the stator flux linkage. This is solved by integration, which leads to the accumulation of errors. The source of errors is the inaccuracy of determining the active resistance of the stator and its change during the operation of the induction motor. There is a disadvantage in the DTC system associated with the appearance of minor torque ripples and rotor speed fluctuations at low loads.

*Keywords.* Asynchronous electric drive, direct control system, inverter, switching frequency, speed controller, observer

**Рекомендовано до друку: к-том техн. наук, доцентом Ципленковим Д.В.**