

УДК 621.314.2

АНАЛІЗ ВАРІАНТІВ ДИСКРЕТНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Г. С. Сергієнко

Донецький національний технічний університет
пл. Шибанкова, 2, м. Красноармійськ, 85300, Україна

С. С. Старостін

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: starostin7@yahoo.de

Виконано порівняльний аналіз дискретних математичних моделей асинхронного двигуна, отриманих на основі неперервних прототипів у нерухомій та обертовій системах координат. Визначено, що модель в обертовій системі є більш складною щодо математичних перетворень та потребує більшого часу для реалізації. Однак з'ясовано, що така модель суттєво краще відповідає прототипу, ніж дискретна модель у нерухомій системі координат.

Ключові слова: асинхронний двигун, дискретна модель, аналіз.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Навантажувальні випробування силових перетворювачів частоти на стадії розробки нових типів та під час серійного виробництва можуть виконуватися шляхом емуляції електричних машин – відтворення їх властивостей за допомогою силових навантажувальних перетворювачів з відповідним керуванням [1–4]. Це здійснюється на основі дискретної математичної моделі електричної машини, яку може бути реалізовано відповідно до різних варіантів. Виникає питання про визначення властивостей моделей щодо часу, необхідного для реалізації, та точності відповідності неперервному прототипу. Отже, мета роботи полягає в порівняльному аналізі основних варіантів дискретних моделей асинхронного двигуна (АД).

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Завдання на фазні струми i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} , формування яких має забезпечити навантажувальний перетворювач, визначаються у функції вимірних середніх величин фазних напруг випробуваного перетворювача \bar{u}_a , \bar{u}_b , \bar{u}_c (рис. 1) з урахуванням дискретної моделі асинхронного двигуна.

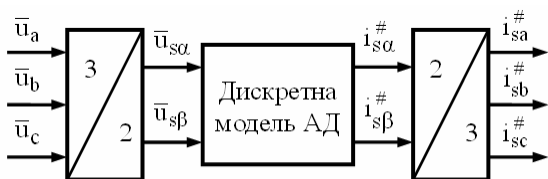


Рисунок 1 – Визначення завдань для системи управління навантажувальним перетворювачем

Синтез дискретної моделі АД виконується на основі неперервного прототипу, який може бути поданий у нерухомій або обертовій системі координат. У попередніх розробках [1–3] основну частину моделі реалізовано в обертовій системі. Між тим фактично вхідні та вихідні величини (рис. 1) відповідають нерухомій системі, що ставить питання щодо доцільності використання обертових координат.

Математичну модель асинхронного двигуна визначаємо у дискретному вигляді, що дозволяє врахувати дискретність функціонування силових перетворювачів та безпосередньо застосувати цю модель

при реалізації алгоритмів керування навантажувальним перетворювачем. При цьому використовуємо підхід, який було розглянуто в [6], приймаючи до уваги неперервний прототип, поданий на рис. 2.

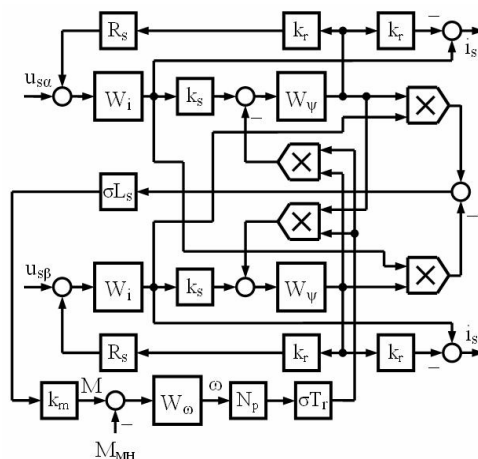


Рисунок 2 – Неперервна математична модель АД у нерухомій системі координат 'α-β'

У структурній схемі (рис. 2) маємо такі передавальні функції та параметри:

$$W_{i(p)} = \frac{1/R_s}{\sigma T_s p + 1}; \quad W_{\psi(p)} = \frac{1}{\sigma T_r p + 1};$$

$$T_s = \frac{L_s}{R_s}; \quad T_r = \frac{L_r}{R_r}; \quad k_r = \frac{1}{1 + \sigma_r}; \quad k_s = \frac{1}{1 + \sigma_s}; \quad (1)$$

$$k_m = \frac{3}{2} N_p k_r; \quad W_{\omega}(p) = \frac{1}{J p},$$

де R_s, L_s – відповідно активний опір та індуктивність статора; R_r, L_r – відповідно активний опір та індуктивність ротора; σ_s, σ_r – відповідно коефіцієнти розсіювання статора та ротора; N_p – число пар полюсів двигуна; J – сумарний момент інерції, зведений до валу двигуна.

Для визначення дискретної моделі виходимо з того, що дискретний вплив силового перетворювача на двигун наближено враховує імпульсна модель перетворювача [6], схему якої зображено на рис. 3.

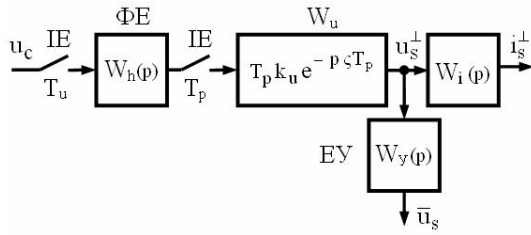


Рисунок 3 – Імпульсна математична модель силового перетворювача

В імпульсній моделі (рис. 3) дискретні властивості перетворювача частоти враховано двома імпульсними елементами ІЕ з періодами: T_u , який дорівнює періоду широтно-імпульсної модуляції перетворювача, та $T_p = T_u / 2$. Параметр k_u відповідає коефіцієнту передачі перетворювача за напругою. Передавальну функцію $W_i(p)$ визначено в (1). Фіксуєчий елемент ФЕ та елемент усереднення ЕУ характеризують передавальні функції:

$$W_h(p) = \frac{1 - e^{-pT_u}}{p}; \quad W_y(p) = \frac{1 - e^{-pT_u}}{T_u p}. \quad (2)$$

На основі методики, розглянутої в [6], з урахуванням модифікованого z-перетворення отримуємо дискретну математичну модель зі структурною схемою відповідно до рис. 2 з передавальними функціями:

$$W_i(z_u) = \frac{k_{Si}}{1 - d_s^2 z_u^{-1}}; \quad W_\psi(z_u) = \frac{k_{\psi 1} z_u^{-1} + k_{\psi 2} z_u^{-2}}{1 - d_r^2 z_u^{-1}}; \quad (3)$$

$$W_\omega(z_u) \cong \frac{k_{J0} + k_{J1} z_u^{-1}}{1 - z_u^{-1}},$$

де $k_{Si} = T_u d_s^\mu (1 - d_s^2) / [2R_s \sigma T_s (1 - d_s)]$;
 $k_{\psi 1} = [2(q_1 - q_2) + d_r^2 q_2 - d_s^2 q_1] / p_0$;
 $k_{\psi 2} = -(q_1 - q_2) / p_0$; $k_{J0} \cong k_{J1} \cong T_u / (2J)$;
 $q_1 = d_r^\mu (1 - d_r^2)(1 - d_s)$; $q_2 = d_s^\mu (1 - d_s^2)(1 - d_r)$;
 $p_0 = d_s^\mu (1 - d_s^2)(1 - d_r)(\sigma T_s - \sigma T_r) / \sigma T_s$;
 $z_u = \exp(pT_u)$ – оператор z-перетворення.

Порівняння отриманої дискретної моделі з моделлю в обертовій системі координат 'd-q', розглянутої в [5], дає результати щодо необхідних математичних операцій для їх реалізації, зведені до табл. 1.

Таблиця 1 – Кількість математичних операцій для реалізації варіантів моделей

Математичні операції	Система координат	
	' α - β '	'd-q'
Додавання / віднімання	21	18
Множення	30	30
Ділення	–	1
Тригонометричні	–	4

Отже, реалізація моделі в обертовій системі координат 'd-q' потребує більш складних математичних перетворень та, відповідно, вимагає більших витрат часу. Це підтверджують експериментальні

дослідження, виконані за допомогою мікропроцесорного контролера DS1104 фірми "dSpace". У результаті визначено, що час реалізації dq-моделі становить 29 мкс. Це в 1,5 разів більше, ніж необхідно при застосуванні моделі в нерухомій системі координат ' α - β '.

Шляхом комп'ютерного моделювання здійснено аналіз відповідності обох варіантів дискретних моделей їх неперервним прототипам. Характерні результати подано на рис. 4, де відображено змінення відносних похибок у дискретні моменти часу kT_u між α - та β -складовими струму статора у неперервному та дискретних варіантах моделей асинхронного двигуна при лінійному зростанні частоти вихідних сигналів силового перетворювача. Відносні похибки визначено за рівнянням

$$\delta i_{\alpha(\beta)} = \frac{i_{s\alpha(\beta)} - i_{s\alpha(\beta)}^\#}{I_{nom}} 100\%, \quad (4)$$

де I_{nom} – номінальний струм двигуна.

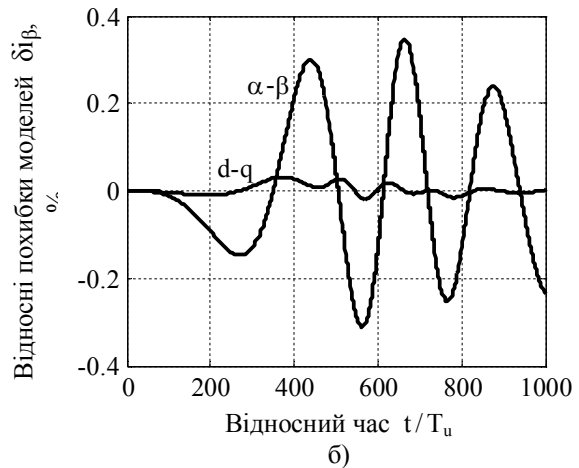
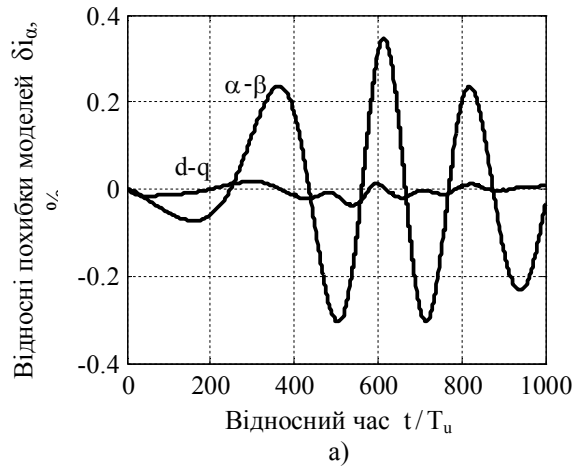


Рисунок 4 – Змінення відносних похибок дискретних моделей у системах координат ' α - β ' і 'd-q' для α -компоненти (а) і β -компоненти (б) струмів статора

ВИСНОВКИ. 1. Дискретна математична модель асинхронного двигуна в обертовій системі координат потребує більш складних математичних перетворень і

часу реалізації в 1,5 рази більшого, ніж модель у нерухомій системі координат.

2. Точність відповідності дискретної моделі неперервному прототипу є суттєво вищою у моделі в обертовій системі координат, що надає підстави для її практичного використання за допомогою програмованого контролера з достатніми обчислювальними можливостями.

ЛІТЕРАТУРА

1. Trabelsi S., Schumacher W., Tolksdorf A. Design of a Real-Time Load Simulator Based on an In-Parallel Connected PWM Voltage Source Converter Structure // 9th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2001, Austria, Graz, 27–29 August 2001). – 9 p.

2. Trabelsi S. Umrichterprüfung mit Hardware-in-the-Loop und Einsatz einer neuartigen schnellen überschwingungsarmen Leistungsendstufe. – Düsseldorf: VDI Verlag, 2004. – 184 p.

3. Калашніков В.І., Передерій О.В., Старостін С.С. Керування установкою для навантажувальних випробувань перетворювачів частоти // Вісник

Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Тем. випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика". – Харків: НТУ "ХПІ", 2008. – Вип. 30 – С. 404–405.

4. Сергієнко Г.С., Старостін С.С. Навантажувальні випробування силових перетворювачів частоти на основі емуляції електричних машин // Технічна електродинаміка. – 2014. – Вип. 4. – С. 120–122.

5. Старостін С.С., Передерій О.В. Дискретна математична модель асинхронного двигуна // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2007. – Вип. 1. – С. 53–56.

6. Старостін С.С. Урахування дискретних властивостей силових перетворювачів електроенергії при синтезі електромехатронних систем // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Тем. випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика". – Харків: НТУ "ХПІ", 2008. – Вип. 45. – С. 404–405.

VARIANTS ANALYSIS OF DISCRETE-TIME MATHEMATICAL MODEL FOR ASYNCHRONOUS MOTOR

G. Sergiienko

Donetsk National Technical University
pl. Shibankova, 2, Krasnoarmysk, 85300, Ukraine

S. Starostin

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: starostin7@yahoo.de

The comparative analysis of discrete-time mathematical models of asynchronous motor is carried out based on continuous prototypes in stationary and rotating frames. There are defined that the model in a rotating frame is more complex and requires more time to implement. However, it is found that such model significantly better meet the prototype than discrete-time model in a stationary frame.

Key words: asynchronous motor, discrete-time model, analysis.

REFERENCES

1. Trabelsi, S., Schumacher, W. and Tolksdorf, A. (2001), Design of a Real-Time Load Simulator Based on an In-Parallel Connected PWM Voltage Source Converter Structure, *9th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2001, Austria, Graz, 27–29 August 2001)*, 9 p.

2. Trabelsi, S. (2004), "Umrichterprüfung mit Hardware-in-the-Loop und Einsatz einer neuartigen schnellen überschwingungsarmen Leistungsendstufe", VDI Verlag, Düsseldorf.

3. Kalashnikov, V.I., Perederii, O.V. and Starostin, S.S. (2008), "Control of the setup for the load testing of frequency converters", *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universitetu "Kharkivskii politekhnichnyi instytut"*, Vol. 30, pp. 404–405. (in Ukrainian)

4. Sergiienko, G.S. and Starostin, S.S. (2014), "Load testing of power frequency converters based on the emulation of electrical machines", *Tekhnichna elektrodynamika*, Vol. 4, pp. 120–122. (in Ukrainian)

5. Starostin, S.S. and Perederii, O.V. (2007), "Discrete-time mathematical model of asynchronous motor", *Elektromekhanichni i enerhozberigaiuchi systemy*, Vol. 1, pp. 53–56. (in Ukrainian)

6. Starostin, S.S. (2005), "Taking into account of the power converters discrete-time properties at the synthesis of electromechatronics systems", *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universitetu "Kharkivskii politekhnichnyi instytut"*. *Tematychnyi vypusk "Problemy avtomatyzovanoho elektropryvida. Teoriia i praktyka"*, Vol. 45, pp. 348–351. (in Ukrainian)