

*Ключевые слова:* сети оперативного постоянного тока, изоляция, электрическая станция, метод критерияльного программирования, двойственная задача, регрессионный анализ.

Надійшла 08.06.2014

Received 08.06.2014

УДК 621.311.001.57(063)

О.О. Закладний, канд. техн. наук, доцент;

О.М. Закладний, канд. техн. наук, доцент;

Д.Ю. Могилат; В.Г. Смоляр

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЬНИМ ДВИГУНОМ ЕЛЕКТРОНАВАНТАЖУВАЧА ЗА ДОПОМОГОЮ ФАЗЗИ - НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

*Досліджено дві віртуальні моделі електропривода з вентильним двигуном для електронавантажувача у середовищі MATLAB: перша – з підпорядкованим керуванням та двома регуляторами швидкості та струму, друга – з регулятором на основі фаззи-нейронної мережі. Показано, що для електронавантажувача найбільш доцільним є застосування керування з фаззи-нейронною мережею, яка має кращі динамічні показники та задовольняє вимогам енергоефективності.*

**Ключові слова:** Вентильний двигун, фаззи-нейронна мережа, електронавантажувач, система керування, віртуальна модель електроприводу.

**Вступ.** В останнє десятиліття спостерігається різке посилення вимог до поліпшення умов роботи людей з автотранспортною технікою, наприклад, стосовно рівнів шуму та вібрації, вмісту вихлопних газів, запаху. Ефективно вирішити ці питання дозволяють машини з електроприводом, альтернативи яким в цілому ряді галузей, наприклад, при виробництві та зберіганні харчових продуктів, ліків, у приміщеннях з підвищеною пожежо- і вибухонебезпечністю, не існує. Акумуляторний навантажувач не забруднює навколишнє середовище, а значить – оптимальний для роботи в закритому приміщенні або в недостатньо провітрюваних місцях відкритих майданчиків. Також важливий чинник - кількість енергії, яка споживається двигуном навантажувача. На даний час електронавантажувачі з приводом змінного струму випускаються всіма провідними виробниками навантажувачів.

Вибір тягового електродвигуна в електроприводі електронавантажувача залежить від галузі застосування електронавантажувача і вимог, що ставляться до нього. Тяговий електропривод електронавантажувача, крім загальних, має такі вимоги: високий момент у всьому діапазоні частот обертання, точність регулювання, реверс на ходу, придатність для рекупративного гальмування (з точки зору динаміки) та високий ККД (з точки зору енергоефективності).

**Метою роботи** є побудова та дослідження двох віртуальних моделей електропривода з вентильним двигуном для електронавантажувача - з підпорядкованим керуванням та з регулятором на основі фаззи-нейронної мережі та вибір такої з них, що має кращі динамічні показники й задовольняє вимозі енергоефективності.

**Матеріал та результати досліджень.** Найбільш перспективним для електронавантажувача є електропривод ВД з синхронною машиною з постійними магнітами (СМПМ), який має кращі масогабаритні показники і ККД у порівнянні з іншими системами [1]. Схему електропривода з ВД зображено на рис. 1.

Розглянемо три основні способи керування ВД [2].

*Перший спосіб керування* полягає в підтриманні постійного значення кута випередження  $\beta_0 = \text{const}$ . При цьому джерелом напруги синхронізації служить датчик положення ротора (ДПР). Фазовий зсув між першою гармонікою струму і ЕРС холостого ходу

$$\psi_1 = \varphi + \theta = \beta_0 - \frac{\gamma}{2},$$

де  $\varphi$  - кут зсуву між векторами основної гармоніки струму і фазної напруги;  $\theta$  - кут навантаження СМ;  $\gamma$  - кут комутації.

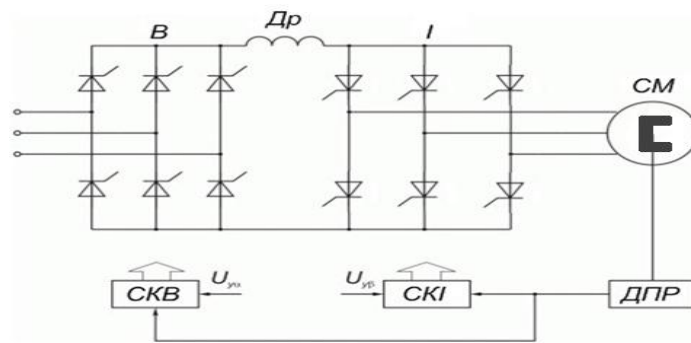


Рис. 1 Схема ВД з СМПМ

У другому способі керування підтримується постійним кут випередження  $\beta = \text{const}$ . Джерелом напруги синхронізації є датчик напруги статора (ДНС). Для цього способу

$$\psi_1 = \beta - \frac{\gamma}{2} + \theta$$

Третій (енергоефективний) спосіб полягає в підтриманні сталої величини кута запасу  $\delta$  на мінімальному рівні

$$\beta_0 = \beta_{\min} = f(\gamma, \theta), \text{ при } \delta = \delta_{\min} = \text{const}$$

$$\beta = \beta_{\min} = f(\gamma), \text{ при } \delta = \delta_{\min} = \text{const.}$$

При цьому

$$\psi_1 = \frac{\gamma}{2} \varphi + \delta_{\min} + \theta.$$

Останній спосіб керування вимагає наявності датчиків кутів комутації та навантаження, а також системи імпульсно-фазового управління (СІФУ), синхронізованої від ДПР або ДНС. При такому керуванні електропривод буде енергоефективним за будь якого значення навантаження. Але параметри системи для підтримання постійної величини кута запасу  $\delta$  на мінімальному рівні змінюються залежно від навантаження. Якщо для реалізації такого способу використати стандартну систему автоматичного керування (САК) з усталеними настройками регуляторів, то вона забезпечить тільки середній рівень динамічних показників. Для їх підвищення необхідно застосувати адаптивну систему, в якій параметри регуляторів будуть змінюватися в залежності від навантаження.

Дослідимо дві моделі САК ВД з СМПМ, розроблених у середовищі MATLAB.

У першій моделі управління ВД реалізовано за принципом підпорядкованого регулювання. Однократноінтегруюча САК складається з двох контурів - швидкості та струму. Кожен контур містить свій регулятор (наприклад, регулятор швидкості - пропорційний, струму - пропорційно-інтегральний) і негативний зв'язок за контрольованою змінною. На вхід системи подається сигнал з датчика інтенсивності (рис.2).

На рис.3 наведено графіки зміни заданої і дійсної швидкості, моменту ВД, отримані в результаті комп'ютерного моделювання:

- а)  $\beta = 0^\circ$  при  $M_C = 0$ ;
- б)  $\beta = 30^\circ$  при  $M_C = 0,5 M_H$ ;
- в)  $\beta = 60^\circ$  при  $M_C = M_H$  и  $U_3 = 30\%$ ;
- г)  $\beta = 60^\circ$  при  $M_C = M_H$  и  $U_3 = 50\%$ .

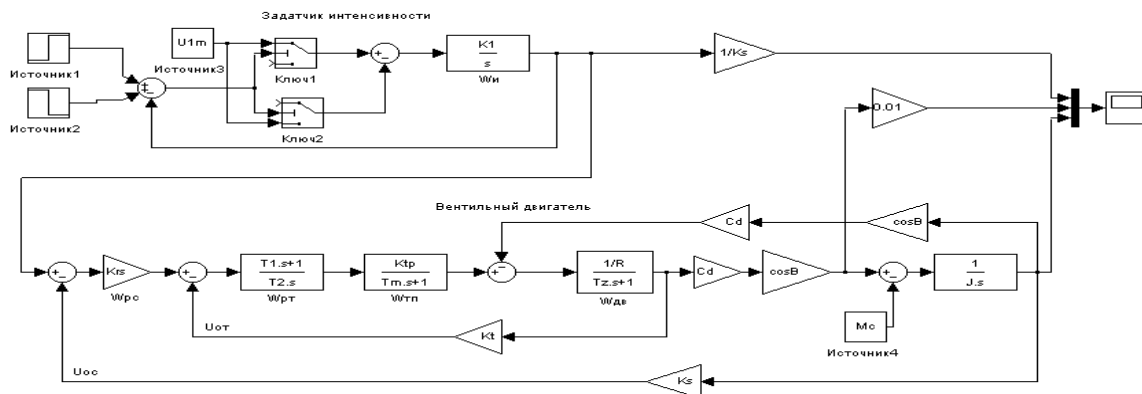


Рис. 2 Схема замкнутої САК підпорядкованого регулювання ВД з СМПМ

Результати комп'ютерного моделювання ВД показали високу збіжність з експериментальними даними, отриманими на лабораторному стенді. Але за умови реалізації енергоефективного способу САК з усталеними настройками регуляторів забезпечить тільки середній рівень динамічних показників.

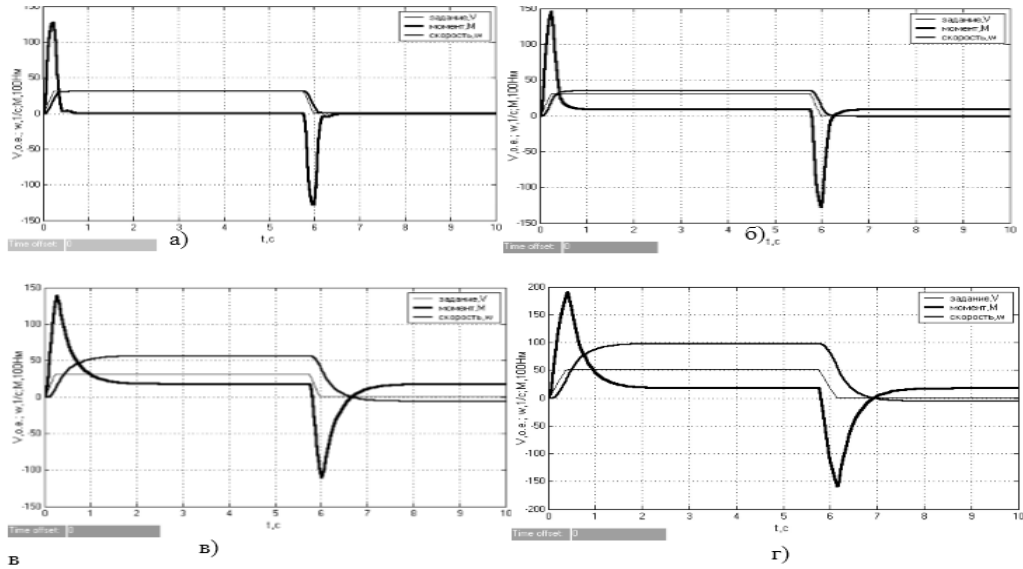


Рис. 3 Результати комп'ютерного моделювання режимів пуску та гальмування замкнутої САК ВД

Розглянемо віртуальну модель, у якій використовується регулятор з фаззи-нейронною мережею (ФНМ) для привода з ВД з СМПМ (рис. 4) [3].

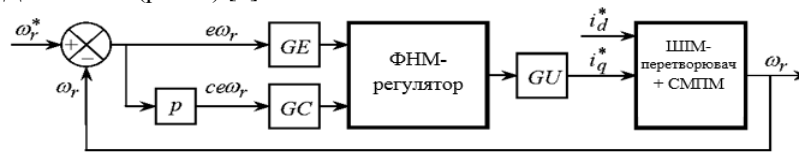


Рис. 4 Структурна схема ФНМ-регулятора

Фаззи-регулятор виконаний у вигляді обчислювальної структури нейронної мережі. Попередні та наступні частини правила "якщо – то" побудовані на базі багатоварової нейронної мережі з нелінійністю і функцією навчання. На рис. 5 показано пропоновану конфігурацію ФНМ-регулятора, де дві вхідні змінні:  $e$  – помилка швидкості і  $ce$  – помилка зміни швидкості, і один вихід – керуюча змінна  $u^*$ .

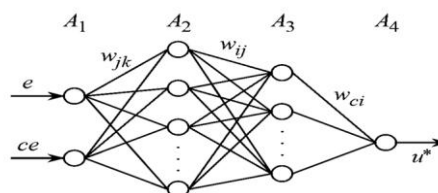


Рис. 5 Конструкція ФНМ-регулятора

На рис. 6 показано САК ВД з ФНМ. Регулятор забезпечує ефективні показники для системи разом із варіаціями параметрів і робочих точок (АЦП – аналого-цифровий перетворювач затримки), а для оцінки швидкості використовується штучна нейронна мережа (ШНМ).

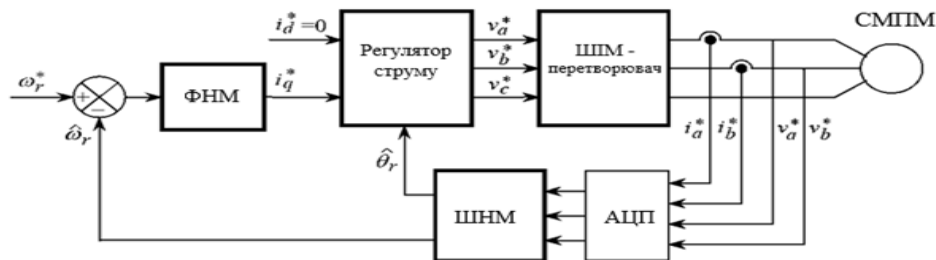


Рис. 6 САК ВД з адаптивною ФНМ

Для дослідження використаємо СМПМ з робочими параметрами:  $U = 220\text{В}$ ;  $P = 2,2\text{кВт}$ ;  $f = 60\text{Гц}$ ;  $L_d = 9,1\text{мГн}$ ;  $L_q = 18,82\text{мГн}$ ;  $I_{am} = 15\text{А}$ ,  $n = 750 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$ .  $p = 4$ ;  $R_s = 0,98\ \text{Ом}$ ;  $\varphi_a = 0,147\text{Вб}$ .

На рис. 7 показано результати порівняння швидкості та струму осі  $q$  ПІ-регулятора, а також регулятора з ФНМ. Розрахункова швидкість  $1800\text{об/хв}$ , досягнута через  $0,2\ \text{с}$ , а момент навантаження зростає до  $3\ \text{Нм}$  на інтервалі з  $0,6\ \text{с}$  до  $0,8\ \text{с}$ .

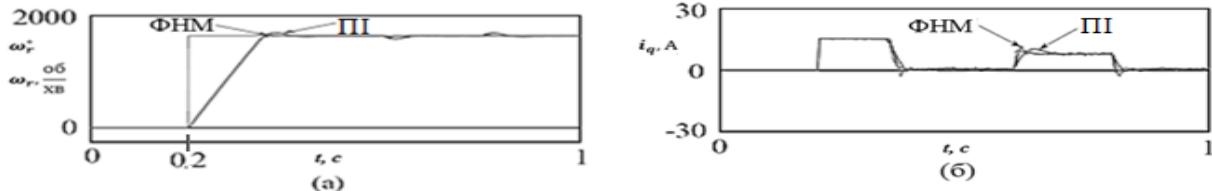


Рис. 7 Порівняння характеристик швидкодії з ПІ-регулятором, та регулятором з ФНМ

Рис. 8 є розширенням рис. 7. На рис. 8(а) швидкість ФНМ регулятора досягає усталеного значення значно швидше та з меншим відхиленням, ніж з ПІ регулятором. На рис. 8(б) ФНМ регулятор на моменті навантаження також спрацьовує швидше за ПІ регулятор.

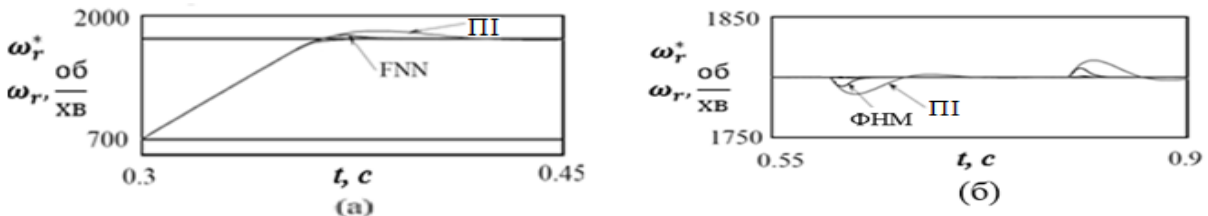


Рис. 8 Порівняння характеристик швидкодії з ПІ-регулятором, та регулятором з ФНМ

#### Висновки.

Показано, що при керуванні ВД з СМПМ за умови підтримання сталої величини кута запасу на мінімальному рівні електропривод працює енергоефективно за будь якого значення навантаження.

Запропоновано віртуальні моделі ВД з СМПМ з підпорядкованим керуванням (з двома регуляторами швидкості та струму) та з використанням регулятора на основі фаззи-нейронної мережі. У разі реалізації енергоефективного способу керування ВД з СМПМ САК з підпорядкованим керуванням з усталеними настройками регуляторів забезпечить лише середній рівень динамічних показників. Результати дослідження доводять, що для підвищення динамічних показників необхідно застосувати адаптивну систему на основі фаззи-нейронної мережі, в якій параметри регулятора змінюються в залежності від навантаження.

#### Список літератури

1. Закладний О.М., Закладний О.О., Бронницький В.О., Могилат Д.Ю. Енергоефективний електропривод електронавантажувача // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2013. №1. С. 36-41.
2. Закладний О.М., Закладний О.О. Вплив способів керування інвертором вентильного двигуна на встановлену потужність електрообладнання // *Інформаційний збірник «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро*. 2008. №4. С. 20-25.
3. Hong-Gyun Lee, Jung-Chul Lee, Su-Myeong Nam, Jung-Sik Choi, Jae-Sub Ko, Dong-Hwa Chung, "The Speed Control and Estimation of IPMSM using Adaptive FNN and ANN", ICCAS2005, June 2-5 2012, KINTEX, Gyeonggi-Do, Korea.

#### О.О. Zakladnyi, O.M. Zakladnyi, D.Yu. Mogylat, V.G. Smolyar National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute» CONTROL OF ELECTRIC BRUSHLESS MOTOR OF FORKLIFT USING FUZZY - NEURAL NETWORK

*Two virtual models of the electric drive with VM for electric forklift in MATLAB were proposed: the first has a subordinate control and two controllers of speed and current, the second has controller, based on fuzzy-neural network (FNN). It is shown that for electric is the most appropriate use of the model with fuzzy neural network, which has better dynamic performance and satisfies the energy efficiency.*

**Keywords:** Valve motor, fuzzy neural network, electric forklift, control system, the virtual model of the drive.

1. Zakladnyi O.O., Zakladnyi O.M., Bronytskyi V.O., Mogylat D.Yu. Energoefektivnyy elektropryvod Electronavantaguvacha // *Energetyka: ekonomika, tehnologiya, ekologiya*. 2013. №1. S. 36-41.

2. Zakladnyi O.M., Zakladnyi O.O.. Vplyv sposobiv keruvannya invertorom ventyl'nogo dvyguna na vstanovlenu potugnist' elektroobladnannya// Informatsiynyy zbirnyk «Promyslova elektroenergetyka ta elektrotehnika» Promelektro. 2008. №4. S. 20-25.

3. Hong-Gyun Lee, Jung-Chul Lee, Su-Myeong Nam, Jung-Sik Choi, Jae-Sub Ko, Dong-Hwa Chung, "The Speed Control and Estimation of IPMSM using Adaptive FNN and ANN", ICCAS2005, June 2-5 2012, KINTEX, Gyeonggi-Do, Korea.

УДК 621.311.001.57(063)

**О.А. Закладной**, канд. техн. наук, доцент;

**А.Н. Закладной**, канд. техн. наук, доцент;

**Д.Ю. Могилат, В.Г. Смоляр**

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»  
УПРАВЛЕНИЕ ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ЭЛЕКТРОПОГРУЗЧИКА С ПОМОЩЬЮ  
ФАЗЗИ-НЕЙРОННОЙ СЕТИ**

*Исследованы две виртуальные модели электропривода с вентильным двигателем для электропогрузчика в среде MATLAB: первая – с подчиненным управлением и двумя регуляторами – скорости и тока, вторая – с регулятором на основе фаззи-нейронной сети. Показано, что для электропогрузчика наиболее целесообразным является использование управления фаззи-нейронной сетью, которая имеет лучшие динамические показатели и удовлетворяет условиям энергоэффективности.*

**Ключевые слова:** вентильный двигатель, фаззи-нейронная сеть, электропогрузчик, система управления, виртуальная модель электропривода.

Надійшла 26.08.2014

Received 26.08.2014

УДК 622.531: 004.4

**Л.К. Лістовщик**, канд. техн. наук

**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОБОЙКОВОЇ УДАРНОЇ СИСТЕМИ В  
СЕРЕДОВИЩІ SOLIDWORKS SIMULATION**

*Наведено математичну модель двобойкової ударної системи, в якій один бойок є керованим, а інший – некерованим, інерційним. Визначена умова ефективного використання такої ударної системи з точки зору найбільш повної передачі енергії деформації в породу. Метою роботи є визначення міцнісних характеристик ударних мас при генерації ними ударного навантаження в залежності від швидкості стівудару та масово-геометричних показників за допомогою програмної оболонки SolidWorks Simulation. Отримані за допомогою моделювання деформації та механічні напруження в елементах ударної системи дозволяють зробити висновки щодо раціонального вибору швидкісних та масових параметрів ударної системи, підібрати матеріал бойків та значно скоротити матеріальні і часові витрати на моделювання і випробування.*

**Ключові слова:** удар, силова імпульсна система, SolidWorks Simulation, напруження, деформації.

**Вступ**

Машини ударної дії широко використовуються в промисловості для руйнування порід, валунів, негабаритів. Такі машини забезпечують високу концентрацію навантаження на локальній ділянці і по енергоємності руйнування (17-25 Дж/см<sup>3</sup>) поступають лише вибухові (6 Дж/см<sup>3</sup>) [1]. Перевагами ударних машин є універсальність, здатність руйнувати міцні матеріали при малій масі і габаритах, що обумовлює їх високу мобільність. Застосування таких машин у вугільній, гірничорудній, будівельній, металообробній та інших галузях промисловості дозволяє механізувати багато трудомістких технологічних процесів і збільшити в 1,5...2 рази продуктивність у порівнянні з ручною працею при одночасному підвищенні якості робіт.

В останні десятиліття інтенсивно ведуться науково-дослідні і проектно-конструкторські роботи зі