

**О. М. Попович, к. т.н., доц. М. О. Смаглюк, магістрант (ІЕД НАН України)**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ІЗ  
ВНУТРІШНЬОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ  
ІМІТАЦІЙНОГО ТА СТРУКТУРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

**O. M. Popovych, PhD, assoc. prof., M. O. Smahliuk, undergraduate (IED NAS  
of Ukraine)**

**RESEARCH AND DESIGNING OF ASYNCHRONOUS MOTORS WITH  
INTERNAL INDEMNIFICATION WITH USE OF IMITATING AND  
STRUCTURAL MODELLING**

*Показано можливості комплексного дослідження асинхронних двигунів із внутрішньою компенсацією реактивної потужності при застосуванні універсальної моделі асинхронних двигунів електромеханотронних систем для імітаційного та структурного моделювання. Наведено приклад математичної моделі компенсованого двигуна із ізольованою від мережі компенсаційною обмоткою, замкненою на конденсатори.*

**Ключові слова:** *компенсований асинхронний двигун, внутрішня компенсація, імітаційне та структурне моделювання*

*Показаны возможности комплексного исследования асинхронных двигателей с внутренней компенсацией реактивной мощности при использовании универсальной модели асинхронных двигателей электромеханотронных систем для имитационного и структурного моделирования. Приведен пример математической модели компенсированного двигателя с изолированной от сети компенсационной обмоткой, замкнутой на конденсаторы.*

**Ключевые слова:** *компенсированный асинхронный двигатель, внутренняя компенсация, имитационное и структурное моделирование*

*Opportunities of complex research of asynchronous motors with internal indemnification of a reactive power are shown at use of universal model of asynchronous motors of electromechanical systems for imitating and structural modelling. The example of mathematical model of the compensated engine with the compensating field isolated from a network closed on condensers is shown.*

**Key words:** *compensated induction motor, internal indemnification, imitating and structural modeling*

Асинхронні двигуни (АД) є найбільш поширеними електромеханічними перетворювачами енергії завдяки їх високій надійності, конструктивній простоті, прийнятним рівнем енергетичних показників. В умовах енергетичної кризи збільшується жорсткість вимог до енергоефективності електромеханічного обладнання. Внаслідок цього, енергоефективність конструкцій традиційних АД (ТАД), особливо для порівняно невеликих потужностей, у деяких випадках вважають недостатньою, що викликає тенденцію їх заміни, наприклад двигунами з постійними магнітами, вентильно-

індукторними двигунами. Така заміна може бути економічно доцільною для регульованого електроприводу не зважаючи на велику вартість потрібної напівпровідникової перетворювальної частини і зниження надійності. Для стабільних режимів роботи підвищення енергоефективності досягають оптимальним проектуванням АД із розширенням спектру їх конструктивних схем. Одним із напрямків вдосконалення є розробка і застосування компенсованих АД (КАД) та внутрішньою компенсацією реактивної потужності. Корисний ефект при їх застосуванні пояснюють розвантаженням обмоток статора від реактивних струмів, покращенням просторового гармонічного складу МРС при наближенні процесів у КАД до таких, що відповідають шестифазній системі.

Конструктивні відмінності КАД від ТАД полягають в тому, що в пазах статора КАД розміщуються дві трифазні обмотки, рис.1. Одна з обмоток, так звана робоча (РО), підключається до джерела живлення, а інша, так звана компенсаційна (КО), замикається на трифазний конденсатор (С) потрібної ємності. Параметри обмоток і ємність конденсатора визначаються при проектуванні електромагнітної системи КАД. У роботах [1, 2] проектування здійснюється за методикою, що спирається на модифікацію та аналіз наступної схеми АД. У роботі [3] наголошують, що конструкція КАД дозволяє істотно збільшити кількість електромагнітних схем силової частини електроприводу. Обмотки статора можуть підключатися до кількох трифазних джерел живлення, з'єднуватись одна із іншою у різний спосіб. Кожна з обмоток РО та КО може розміщуватись у всіх пазах статора, або виконуватись на базі обмотки серійного асинхронного двигуна, із розподіленням її на дві частини, які просторово зміщенні між собою в пазах осердя статора на заданий кут із з'єднанням за схемою поворотного автотрансформатора на електричну ємність С [4]. З умов технічної простоти та забезпечення ефективної роботи двигуна цей кут приймають рівним  $30^\circ$ , що робиться розподіленням фазної зони  $60^\circ$  обмотки статора базової машини на дві рівні частини. Одна з напівобмоток фази приймається за основну і являє собою первинну обмотку із включенням її на напругу живлення. Друга – додаткова, або вторинна обмотка зміщена відносно первинної на кут  $30^\circ$  проти напрямку обертання поля [4]. Математичне моделювання та порівняльні дослідження КАД ускладнені великою кількістю конструктивних варіантів, проблемами адекватності величини визначених електромагнітних параметрів.

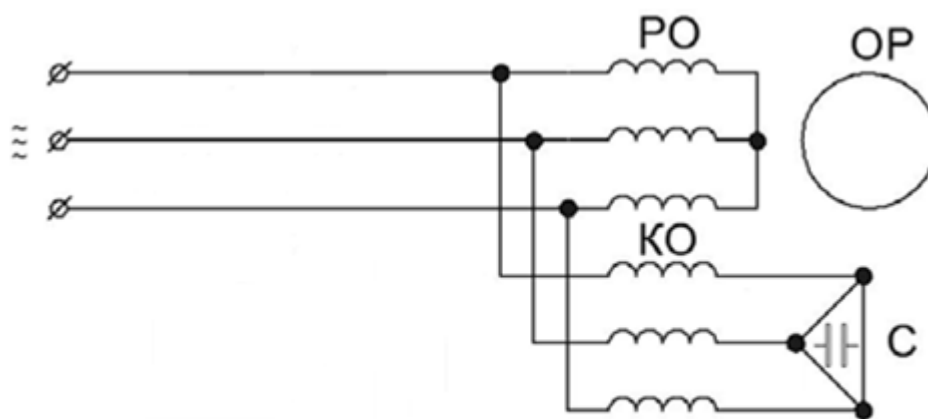


Рис.1. Схема АД із внутрішньою компенсацією

**Метою даної роботи** є вибір, обґрунтування та адаптація універсальних засобів математичного моделювання для цілей дослідження АД із внутрішньою компенсацією, розробка рекомендацій із їх застосування. Задачі дослідження та проектування АД із внутрішньою компенсацією можуть бути ефективно розв'язані при наявності математичних моделей, які враховують особливості даного типу АД. Це багатоваріантні ускладнені структури обмотки статора та системи живлення, підключення додаткових реактивних опорів до виводів всередині АД, збільшений вплив просторових гармонік МРС на ефективність робочих режимів.

Даним вимогам задовольняє математична модель АД електромеханотронних систем [5, 6], яка призначена для дослідження режимів роботи двигунів із короткозамкненим ротором із довільною схемою з'єднання віток обмотки статора між собою та із елементами зовнішньої мережі при врахуванні довільної структури віток, несиметрії та нелінійності параметрів [7], впливу спектру просторових гармонік МРС. Модель призначено для дослідження статичних та динамічних режимів роботи АД у складі електромеханічних систем (ЕМС) засобами імітаційного та структурного моделювання, зокрема системи MATLAB. Стандартні блоки АД у даній системі мають обмежені можливості і не задовольняють вказаним вимогам до моделей КАД. Для використання можливостей системи MATLAB із моделювання ЕМС стосовно КАД, застосовується структурна Simulink-модель АД [6], яку інтегровано до системи імітаційного моделювання.

Вихідною інформацією для математичного моделювання є обмоткові дані базового АД, структура віток обмотки статора із визначенням розподілу секцій обмотки за пазами, їх кількості витків, діаметрів проводів. Схема з'єднання віток між собою при структурному моделюванні задається матрицями включення, які пов'язують залежні та незалежні струми віток за першим законом Кірхгофа і напруги віток та мережі – за другим [5, 6]. Крім того, задаються порядки просторових гармонік МРС, що підлягають врахуванню, параметри підключених реактивних елементів.

Приклад математичної моделі КАД на базі серійного АД 4A200L6УЗ із РО, яку приєднано до мережі і ізолюваною від неї КО, яку приєднано до трифазної батареї конденсаторів із схемою «трикутник» наведено на рис.2.

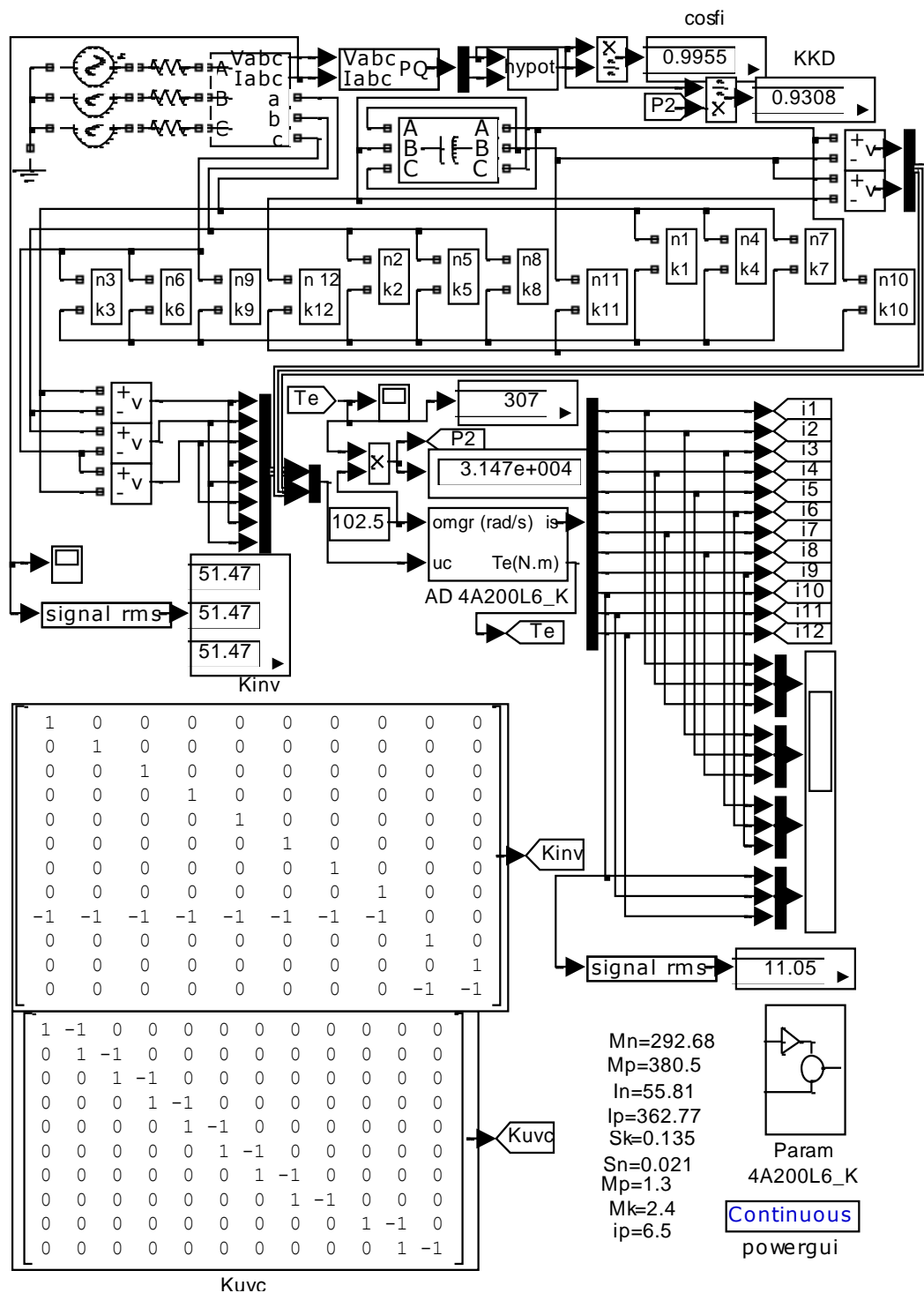


Рис. 2. Розрахункова модель КАД у системі імітаційного

Дану модель призначено до застосування у системі MATLAB із використанням засобів бібліотеки SimPowerSystems. Для інтегрування до даного середовища імітаційного моделювання модель КАД розроблено

засобами структурного моделювання [6] і представлено на рис.2 Simulink-моделлю (блок AD 4A200L6\_K) і дванадцятьма блоками, що імітують вітки обмотки статора із позначеннями  $n$  та  $k$  для їх початків та кінців. Обмотку РО представлено дев'ятьма блоками віток (1 – 9, три паралельні вітки, як у серійного АД), які з'єднано за схемою «зірка» і приєднано до мережі, а обмотку КО представлено трьома блоками (10 – 12, одна паралельна вітка), з'єднано за схемою «зірка» і приєднано до конденсаторів. Блок першої вітки показано на рис.3, де представлено джерело струму, яке керується струмом першої вітки  $i_1$  за результатом розрахунку у блоці AD 4A200L6\_K, а також вихідні дані про номери пазів із першими та другими сторонами секцій вітки ( $n_1$ ,  $n_2$ ), кількість витків ( $w_1$ ) для розрахунку величини одичної МРС вітки ( $f_{nu}$ ) [5].

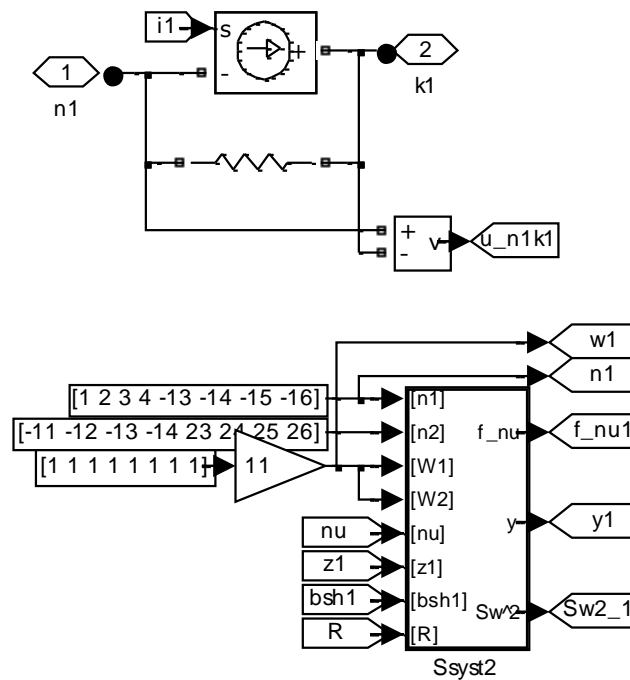


Рис.3. Імітаційна модель вітки обмотки статора

На рис.2 наведено матрицю  $K_{inv}$  для перетворення матриці незалежних струмів віток (1 – 8, 10, 11) до матриці струмів усіх віток, а також матрицю  $K_{inv}$  для перетворення матриці напруг віток до відомих напруг мережі  $u_c$ . На дисплеї та осцилографі моделі виводяться результати розрахунку струмів віток ( $i_s$ ), електромагнітного моменту ( $T_e$ ), потужності на валу ( $P_2$ ), ККД при нехтуванні втратами у сталі, механічними та додатковими (ККД) та коефіцієнту потужності ( $\cos\phi_i$ ) для усталеного режиму роботи із частотою обертання ротора  $\omega_{gr}=102.5$  rad/s. Визначення величини електромагнітних параметрів здійснюється за допомогою блоку Param 4A200L6\_K за обмотковими даними двигуна.

Наведена модель дозволяє ефективно проводити дослідження КАД при варіюванні величинами конструктивних параметрів. Варіант схемної реалізації

на рис.2 передбачає можливість підвищення коефіцієнту потужності, зниження струму РО і відповідного зменшення площі пазу під неї. Площа пазу, що звільнюється заповнюється КО. Результати чисельного експерименту з порівняльного дослідження залежностей величин енергетичних коефіцієнтів від величини корисної потужності для серійного АД 4А200L6У3 і КАД на його базі наведено на рис. 4. Дослідження виконано при варіюванні частотою обертання ротора, величині ємності конденсаторів  $C = 4$  мкФ, кількості витків КО – 11. При даних параметрах та практично однакових величинах ККД коефіцієнт потужності КАД помітно вищий. Особливостями схеми КАД на рис.2 є можливість суттєвого зменшення величини потрібної ємності (порівняно із іншими схемами КАД) завдяки збільшенню кількості витків КО.

Застосування наведеної математичної моделі КАД дозволяє проводити широкий спектр досліджень з урахуванням особливостей робочих режимів електромеханічного обладнання, знаходити оптимальні співвідношення величин конструктивних параметрів КАД і формувати рекомендації з підвищення енергоефективності асинхронного електроприводу.

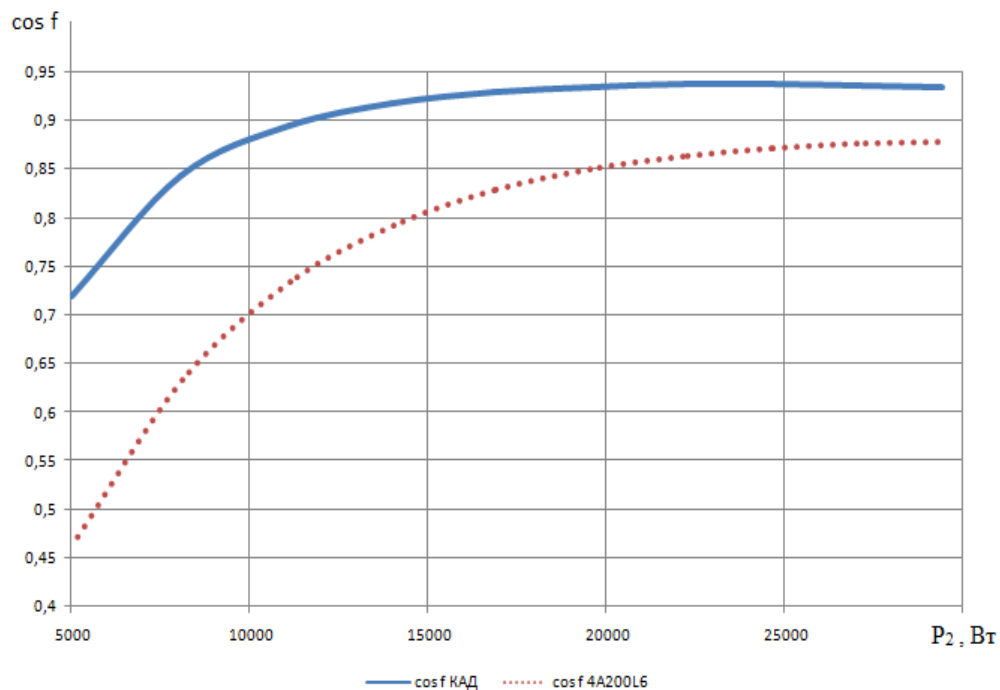


Рис.4. Розрахункові залежності коефіцієнтів потужності КАД і ТАД

### Список використаних джерел

1. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. К проектированию энергоберегающего асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // *Jelektromehaničeskie i jelektromagnitnye preobrazovateli*

energii i upravljajemye jenergomexanicheskie sistemy: tr. III Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. – Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2007. – S. 77–80.

2. Mugalimov R.G., Kosmatov V.I., Mugalimova A.R. Metod i algoritm proektirovaniya kompensirovannogo jenergosberegajushhego asinhronnogo dvigatelja // Sb. mat-lov V Mezhdunar. (XVI Vseros.) nauch. konf., 18–21 sentjabrja 2007 g. – SPb., 2007. – S. 281–284.

3. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R., Mugalimova M.R. Perspektivy primenenija asinhronnyh dvigatelej s individualnoj kompensaciej reaktivnoj moshhnosti v

4. Mishyn V.I. Kaplun V.V. Chuyenko R.M. ta in. Kompensovani asynkhronni mashyny // monohrafiya. – K.: KNUTD, 2012. – 221 s.

5. Popovych O.M. Matematychna model dlya doslidzhennya rezhymiv asynkhronnykh mashyn elektromexanotronnykh system//Tekhn. elektrodynamika. – 2010. – N 4. – S. 25 – 32.

6. Popovych O.M. Matematychna model asynkhronnoyi mashyny elektromexanotronnoyi systemy dlya imitatsiynoho ta strukturnoho modelyuvannya // Pr. In-tu elektrodynamiky NAN Ukrayiny: Zb. nauk. prats'. – 2010. – Vyp.25. – S.89 – 97.

7. Popovych O.M., Holovan I.V. Vyznachennya parametriv zastupnoyi skhemy asynkhronnoho dvyhuna ta yikh neliniynykh zalezhnostey za rezultatamy pol'ovoho analizu// Pr. In-tu elektrodynamiky NAN Ukrayiny: Zb. nauk. prats'. – 2012. – Vyp.31. – S.38 – 48.

*Стаття надійшла до редакції 23.05.2014 р.*

УДК 62-529

**А. В. Торопов, к.т.н., Л. В. Торопова, асп.(НТУУ «КПІ»)**

**ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ  
РОТОРНОГО КОЛЕСА НА БАЗЕ ПЛК С ПРИМЕНЕНИЕМ  
КОНЦЕПЦИИ МЕТОДА ПИРСОНА**

---

**A. V. Toropov, Ph.D, L. V. Toropova, postgraduate (NTUU «KPI»)**

**IMPLEMENTATION OF PLC-BASED OPTIMAL CONTROL SYSTEM  
OF ROTOR WHEEL MOTORS WITH THE CONCEPT OF PEARSON  
METHOD**

*Рассмотрена возможность реализации оптимального управления электродвигателем роторного колеса при использовании программируемых логических контроллеров. Выбран функционал качества, при котором обеспечивается высокое качество регулирования скорости и существенно упрощается процедура аналитического конструирования. Синтезирован закон оптимального управления методом динамического программирования с*