

## РОЗРОБЛЕННЯ КОМП'ЮТЕРНО-ОРІЄНТОВАНИХ BOND GRAPH МОДЕЛЕЙ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ З МЕТОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ УСТАЛЕНИХ ТА ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ ЇХ РОБОТИ

В.С.Костишин, П.О.Курляк

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15, тел. (03422) 48003,  
e-mail: p\_kurlyak@ukr.net

*Запропоновано використання комп'ютерно-орієнтованого методу моделювання Bond Graph для дослідження ефективності функціонування електропривідних агрегатів нафтогазової промисловості. Розглянуто сучасний стан Bond Graph моделювання режимів роботи асинхронних електродвигунів. Розроблено уточнену модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, за допомогою якої в оболонці симулятора 20-sim 3.6 07 Professional проведено дослідження усталених та перехідних режимів роботи двигуна BAO2-280.*

Ключові слова: асинхронний двигун, Bond Graph, 20-sim, режими роботи.

*Предложено использование компьютерно-ориентированного метода моделирования Bond Graph для исследования эффективности функционирования электроприводных агрегатов нефтегазовой промышленности. Рассмотрено современное состояние Bond Graph моделирования режимов работы асинхронных электродвигателей. Разработана уточненная модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, при помощи которой в оболочке симулятора 20-sim 4.0 Professional проведено исследование установившихся и переходных режимов работы двигателя BAO2-280.*

Ключевые слова: асинхронный двигатель, Bond Graph, 20-sim, режимы работы.

*For research of the effectiveness of electrodriven aggregates efficiency in oil and gas industry computer oriented method of Bond Graph modeling is offered. Contemporary status of Bond Graph modeling of dissynchronous electromotors operation is viewed. Revised model of dissynchronous motor with squirrel cage rotor is developed. Due to it dissynchronous and constant motor operation regimes of the motor BAO2-280 inside the simulator 20-sim 4.0 Professional are researched*

Keywords: induction motor, Bond Graph, 20-sim, regimes of operation.

**Постановка проблеми.** Електродвигуни знайшли широке застосування серед приводів енергетичного обладнання технологічних комплексів нафтогазової промисловості. Відомо, що основні її об'єкти створювалися в II половині ХХ століття і проектувалися під наявні потреби того часу. За оцінкою експертів в Україні здебільшого експлуатується морально та фізично застарілі електроприводні агрегати з низьким ККД та неефективними режимами роботи. Ефективне використання енергії на виробництві зводиться до зниження втрат у споживачах. Враховуючи те, що основними споживачами електроенергії в нафтогазовій промисловості є електродвигуни, одним із пріоритетних завдань на сьогодні, особливо в умовах сучасного стрімкого зростання цін на енергоносії, є зниження втрат в електроприводі насосів, лебідок, вентиляторів, повітродувок тощо. Низька ефективність функціонування таких агрегатів зумовлена недостатніми науковими дослідженнями енергообмінних процесів, відсутністю відповідних комп'ютерно-орієнтованих моделей, на основі яких можна було б аналізувати як усталені, так і перехідні режими їх роботи. У зв'язку з цим виникає практична необхідність у створенні моделей, здатних адекватно відображати складні фізичні процеси перетворення енергії в електроприводі. Одним із найбільш ефективних методів моделювання, який оперує з потоками енергії в різних фізичних системах, є комп'ютерно-орієнтований метод Bond

Graph, основні положення якого викладені в роботі [1].

**Аналіз результатів останніх досліджень.** Найбільшого поширення серед двигунів електроприводів нафтової промисловості набули асинхронні двигуни (АД) з короткозамкненим (КЗ) ротором, що складають до 90% усього парку машин. Питанням дослідження енергетичної ефективності технічних об'єктів за допомогою відповідних Bond Graph моделей присвячені роботи [1] та [2]. Так, у роботі [1] проводились моделювання енергетичних характеристик електропривода з двигуном постійного струму, а в роботі [2] - магістрального відцентрового насоса. Одержані результати Bond Graph моделювання показали збіжність із результатами, одержаними експериментально. Необхідно зазначити, що двигуни постійного струму методом Bond Graph моделювали впродовж багатьох років як прототип електромеханічних або мехатронних пристроїв. І тільки упродовж останніх років, з появою новітніх мікропроцесорних засобів регулювання режимів роботи асинхронних машин та широкого їх застосування в різноманітних системах електропривода, в літературі почали з'являтися статті різних авторів із Bond Graph моделями АД [3-6]. Проте вони досить різко відрізняються між собою, та не в достатній мірі висвітлюють, а в деяких випадках і нехтують, важливими фізичними властивостями реальних машин. Тому шляхом порівняльного аналізу існуючих моде-

лей необхідно синтезувати Bond Graph моделі АД, здатні адекватно із заданою точністю висвітлювати основні енергообмінні процеси, що мають безпосередній вплив на режими роботи електромашин.

**Задачі досліджень.** Метою роботи є розроблення уточнених Bond Graph моделей АД з КЗ ротором для дослідження ефективності функціонування електроприводних агрегатів нафтогазової промисловості.

**Виклад основного матеріалу.** Електричні машини змінного струму (зокрема, асинхронні) є нелінійними багатомірними об'єктами з досить складною структурою, тому їх моделювання практично в усіх випадках пов'язане з попередньою ідеалізацією об'єкта досліджень. Коректність прийнятих допущень повинна бути суворо обґрунтована, а в ряді випадків, залежно від мети досліджень, знехтуванні чинники повинні бути враховані. Саме тому відомі Bond Graph моделі асинхронних машин змінного струму відрізняються одна від одної, перш за все, складом зроблених припущень.

Комп'ютерно-орієнтоване моделювання електричних машин зводиться до чисельного розв'язку системи диференціальних рівнянь, що описують їх поведінку, у результаті чого одержують залежності змінних стану двигуна в функції часу або інших змінних стану об'єкта. Дане моделювання також дає змогу досліджувати аварійні режими роботи машини, що неможливо зробити на експериментальних, і, тим більше, на діючих установках.

Комп'ютерно-орієнтовані моделі переважно створюють як за допомогою алгоритмічних мов високого рівня (Quick Basic, Turbo Pascal, Delphi тощо), так і за допомогою спеціалізованих пакетів (MATLAB, Simulink, MathCAD тощо), що дають змогу користувачеві вводити моделі у вигляді структурних схем, обирати методи розв'язку диференціальних рівнянь і параметри моделювання в діалоговому режимі. Одним із таких спеціалізованих пакетів є симулятор 20-sim, що підтримує Bond Graph моделювання, та для введеної графічної моделі автоматично генерує систему диференціальних рівнянь режимів, записаних у нормальній формі Коші. Bond Graph метод дає змогу уніфікувати процес моделювання систем різної фізичної природи, зокрема асинхронних двигунів та технологічне навантаження на їх валі.

Розв'язуючи задачі моделювання машин змінного струму, дуже часто використовують координатні перетворення з метою представлення їх математичного опису в більш простій формі. Таким чином, модель однієї і тієї ж машини залежно від задач досліджень може відрізнятися системою координат, структурою, складом вхідних і вихідних параметрів та формою опису їх електромеханічних процесів.

У роботах [3], [4] моделі АД представлені складною MultiBond Graph структурою, елементи якої не відповідають елементам досліджуваного об'єкта, внаслідок чого не відображені перетоки енергії між ними. Окрім того, в цих моделях застосовують елементи, які не мають

відповідності серед стандартних Bond Graph елементів бібліотеки симулятора 20-sim. Тому дані моделі, на думку авторів, є надто складними та незрозумілими пересічному досліднику.

У роботі [5] наглядно представлена еквівалентна двофазна Bond Graph модель АД у нерухомих координатах  $\alpha, \beta$ . Електромагнітна взаємодія між статором і ротором змодельована двопортовою індуктивністю  $I$ . Електромеханічне перетворення енергії моделюють гіраторним зв'язком  $MGY$ . Однак, не зважаючи на хорошу візуалізацію основних енергетичних потоків, елементи даної Bond Graph моделі не в достатній мірі деталізують елементи конструкції АД. Запропонована двопортова індуктивність  $I$  немає відповідності серед стандартних елементів бібліотеки симулятора 20-sim. У моделі також не представлений перехід від трифазної системи координат  $a, b, c$  до двофазної  $\alpha, \beta$ .

Заслугує уваги робота [6], в якій елементи Bond Graph моделі АД безпосередньо відповідають фізичним елементам реальних машин та відображають енергетичні зв'язки між ними. Математичний опис електромеханічних процесів відображений системою диференціальних рівнянь першого порядку. Однак у даній моделі зв'язок між статором і ротором представлений двопортовою ємністю  $C$ , що призводить до неадекватного розуміння такого енергетичного зв'язку, який має принципово індуктивний характер.

Отже, шляхом порівняльного аналізу існуючих моделей авторами запропонована уточнена Bond Graph модель АД з КЗ ротором (рис. 1), яка дає можливість досліджувати ефективність як усталених, так і перехідних режимів його роботи. Дана модель описує еквівалентну трифазну електричну машину, що живиться від джерела синусоїдної напруги, характеризується відсутністю насичення магнітного кола, гістерезису, відсутністю витіснення струму в обмотках, синусоїдним розподілом у просторі магніторушійних сил і магнітних індукцій, залежністю індуктивних опорів розсіяння обмоток електричних машин від положення ротора, повною симетрією обмоток статора.

Для відображення фізичної відповідності елементів Bond Graph моделі реальним елементам АД введені активні опори  $R_{sa}, R_{sb}, R_{sc}$  кожної із фаз статора (рис. 1). Оскільки обмотки більшості АД є симетричними то активні опори фаз рівні між собою  $R_s = R_{sa} = R_{sb} = R_{sc} = R_s$ . Статорні обмотки моделі АД живляться від трифазного джерела синусоїдної напруги  $u_a, u_b, u_c$ :

$$\begin{aligned} u_a &= U_m \sin(\omega t); \\ u_b &= U_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right); \\ u_c &= U_m \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (1)$$

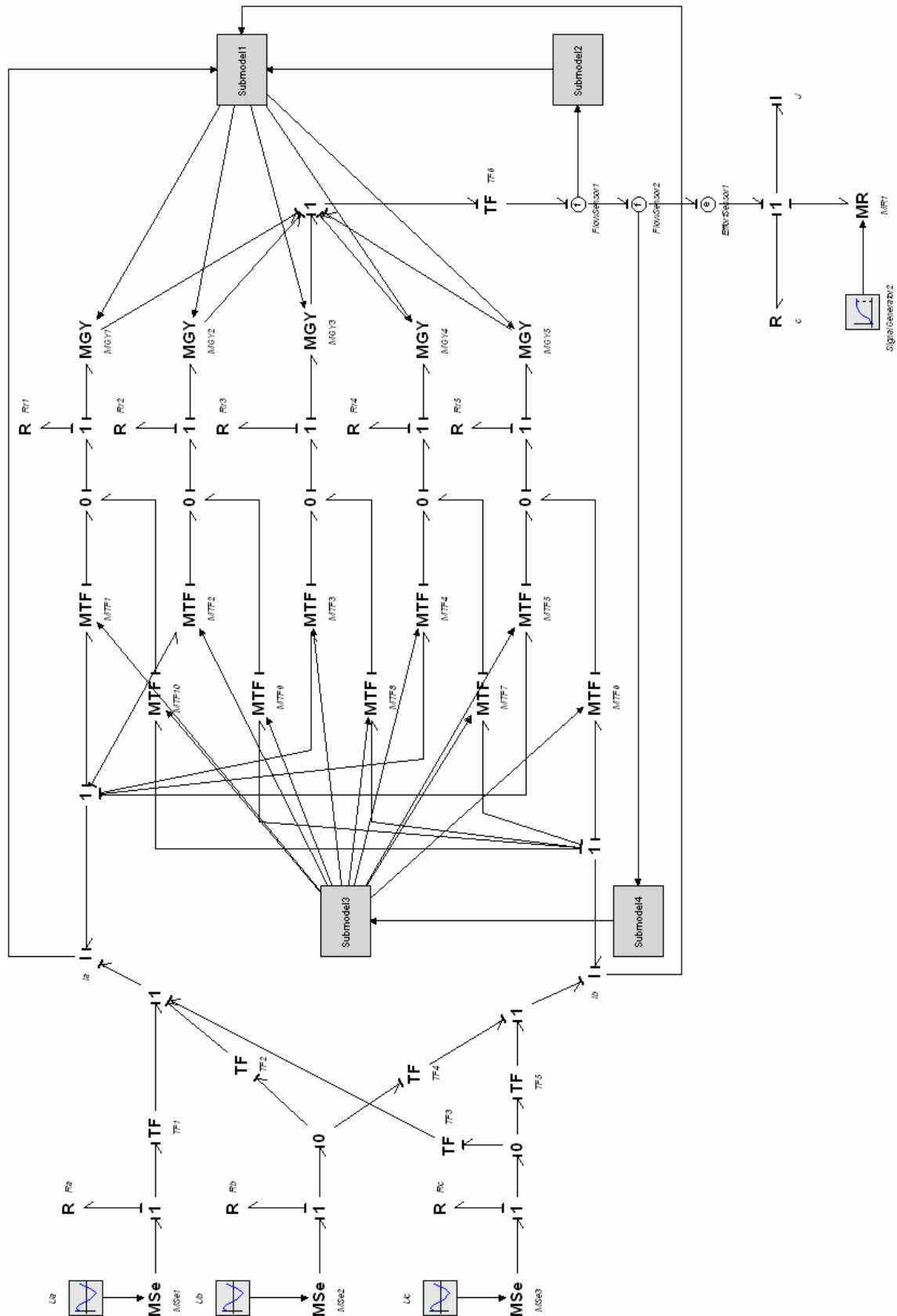


Рисунок 1 – Bond Graph модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Координатний перехід від трифазної системи  $a, b, c$  до двофазної  $\alpha, \beta$  виконується за допомогою  $TF1-TF5$  елементів (рис. 1) та виражається наступним співвідношенням:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos \frac{2\pi}{3} & \cos \frac{4\pi}{3} \\ \sin 0 & \sin \frac{2\pi}{3} & \sin \frac{4\pi}{3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Електромагнітна взаємодія між статором і ротором в узагальненій Bond Graph моделі АД з КЗ ротором виражена через багатопортову індуктивність  $I_a, I_b$ :

$$\begin{bmatrix} \Psi_\alpha^s \\ \Psi_\alpha^r \end{bmatrix} = I_a \times \begin{bmatrix} i_\alpha^s \\ i_\alpha^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_\alpha^s & M \\ M & L_\alpha^r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_\alpha^s \\ i_\alpha^r \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_\beta^s \\ \Psi_\beta^r \end{bmatrix} = I_b \times \begin{bmatrix} i_\beta^s \\ i_\beta^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_\beta^s & M \\ M & L_\beta^r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_\beta^s \\ i_\beta^r \end{bmatrix},$$

де  $\Psi_\alpha^s, \Psi_\beta^s, \Psi_\alpha^r, \Psi_\beta^r$  -  $\alpha, \beta$  складові потокозчеплення відповідно обмоток статора і ротора.

Процеси електромеханічного перетворення енергії в Bond Graph моделі АД описуються системою рівнянь рівноваги напруг (4) у колах її обмоток, рівнянням електромагнітного моменту двигуна (5) як функції струмів статора і ротора та рівнянням руху (6) [7]:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha^s \\ u_\beta^s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_\alpha^s + \frac{d}{dt}L_\alpha^s & 0 & \frac{d}{dt}M & 0 \\ 0 & R_\beta^s + \frac{d}{dt}L_\beta^s & 0 & \frac{d}{dt}M \\ \frac{d}{dt}M & M\omega^r & R_\alpha^r + \frac{d}{dt}L_\alpha^r & L_\beta^r\omega^r \\ -M\omega^r & \frac{d}{dt}M & -L_\alpha^r\omega^r & R_\beta^r + \frac{d}{dt}L_\beta^r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_\alpha^s \\ i_\beta^s \\ i_\alpha^r \\ i_\beta^r \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$T_e = \frac{p}{2} [i_\alpha^r (Mi_\beta^s + L^r i_\beta^r) - i_\beta^r (Mi_\alpha^s + L^r i_\alpha^r)], \quad (5)$$

$$T_e = J \frac{d\omega^r}{dt} + c\omega^r + T_L, \quad (6)$$

де:  $u_\alpha^s, u_\beta^s$  -  $\alpha, \beta$  складові напруг обмоток статора;

$i_\alpha^s, i_\beta^s, i_\alpha^r, i_\beta^r$  -  $\alpha, \beta$  складові струму відповідно в обмотках статора і ротора;

$R_\alpha^s, R_\beta^s, R_\alpha^r, R_\beta^r$  - активні опори обмоток;

$L_\alpha^s, L_\beta^s, L_\alpha^r, L_\beta^r$  - власні індуктивності обмоток;

$M$  - взаємна індуктивність;

$\omega^r$  - кутова швидкість обертання ротора;

$T_e$  - електромагнітний момент двигуна;

$p$  - число пар полюсів.

$J$  - обертовий момент інерції ротора;

$c$  - коефіцієнт тертя вала в підшипниках;

$T_L$  - момент навантаження на валі.

Число стержнів короткозамкнутого ротора залежить здебільшого від потужності та розмірів АД. Для спрощення Bond Graph моделі розглядаємо КЗ ротор, що вміщує п'ять стержнів з активними опорами  $R1-R5$  (рис. 1). Кожний стержень на кінцях з'єднаний роторними кільцями. Струми, які індукуються обертовим магнітним полем, проходять через кожен стержень і замикаються на кільцях. Таким чином, у п'яти стержнях протікають п'ять струмів ротора, що відображено у Bond Graph моделі. Враховуючи те, що ротор у процесі роботи двигуна обертається, струми в кожному стержні залежать від його кутової позиції  $\theta$  відносно статора. Залежність струмів у стержнях ротора від струмів  $\alpha, \beta$  складових має вигляд [8]:

$$i_k^r = m \left[ i_\alpha^r \cos \left( \theta + \frac{2(k-1)\pi}{n} \right) + i_\beta^r \sin \left( \theta + \frac{2(k-1)\pi}{n} \right) \right], \quad (7)$$

де:  $m = \sqrt{\frac{2}{n}}$ ;  $n$  - кількість стержнів ротора;  $k = 1, 2, \dots, n$ .

У Bond Graph моделі АД співвідношення (7) представлене двома 1-з'єднаннями ( $i_\alpha^r, i_\beta^r$ ), трансформаторами  $MTF1-MTF10$  із модульованими коефіцієнтами трансформації (Submodel3), які відповідають виразам

$$t_k = m \cos \left( \theta + \frac{2(k-1)\pi}{n} \right) \text{ та } t_{k+n} = m \sin \left( \theta + \frac{2(k-1)\pi}{n} \right), \quad (8)$$

та 0-з'єднаннями, на яких здійснюється сумування струмів ротора по осях  $\alpha, \beta$ .

1-з'єднання описують також сумування потокозчеплень

$$\lambda_\alpha^r + t_1\lambda_1 + t_2\lambda_2 + t_3\lambda_3 + t_4\lambda_4 + t_5\lambda_5 = 0, \quad (9)$$

$$\lambda_\beta^r + t_6\lambda_6 + t_7\lambda_7 + t_8\lambda_8 + t_9\lambda_9 + t_{10}\lambda_{10} = 0.$$

Рівняння струмів ротора в матричній формі має вигляд:

$$\begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \\ i_{r4} \\ i_{r5} \end{bmatrix} = m \times \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{5} \right) & \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{5} \right) \\ \cos \left( \theta + \frac{4\pi}{5} \right) & \sin \left( \theta + \frac{4\pi}{5} \right) \\ \cos \left( \theta + \frac{6\pi}{5} \right) & \sin \left( \theta + \frac{6\pi}{5} \right) \\ \cos \left( \theta + \frac{8\pi}{5} \right) & \sin \left( \theta + \frac{8\pi}{5} \right) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_\alpha^r \\ i_\beta^r \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Обертовий електромагнітний момент двигуна, із врахуванням роторних струмів, рівний:

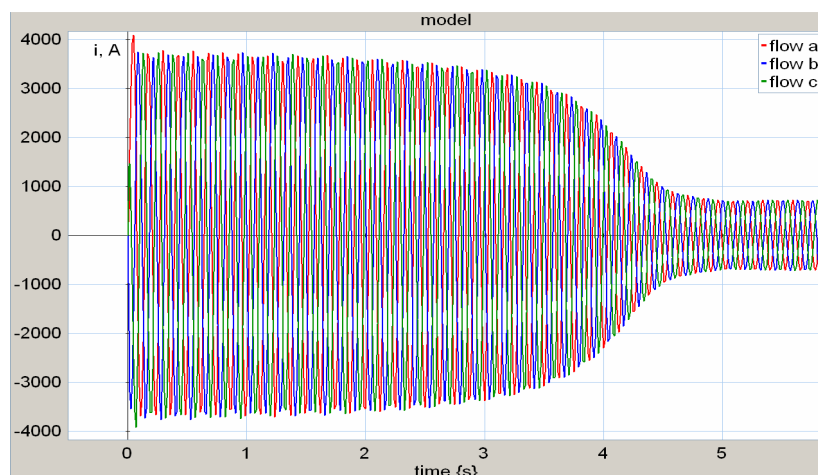


Рисунок 2 - Залежності зміни струмів обмоток статора в трифазній системі координат  $a, b, c$  під час пуску двигуна

$$T_e = \sum_{k=1}^n T_k = \frac{P}{2} \times \quad (11)$$

$$\times \sum_{k=1}^n m \cdot \left[ \psi_\beta^r \cos\left(\theta + \frac{2(k-1)\pi}{n}\right) - \psi_\alpha^r \sin\left(\theta + \frac{2(k-1)\pi}{n}\right) \right]$$

У моделі Bond Graph дане співвідношення представлено гідраторами  $MGY1-MGY5$  із модульованими коефіцієнтами гірації (Submodell1), що відповідають виразу:

$$r_k = m \times \quad (12)$$

$$\times \left[ \psi_\beta^r \cos\left(\theta + \frac{2(k-1)\pi}{n}\right) - \psi_\alpha^r \sin\left(\theta + \frac{2(k-1)\pi}{n}\right) \right]$$

За допомогою даної моделі та програми 20-sim 4.0 Professional проведені дослідження перехідних і усталених режимів роботи АД ВАО2-280 S4, що використовується у приводі відцентрових насосних агрегатів НГВУ "Долинанафтогаз". Числові значення основних елементів Bond Graph моделі розраховані аналітично за методикою [9] на основі каталогових даних АД. На рисунках 2-4 зображено результати моделювання. Зокрема на рисунку 2 - залежності зміни струмів обмоток статора в трифазній системі координат  $a, b, c$  під час пуску двигуна. На рисунках 3, 4 - механічні характеристики АД  $\omega = f(M)$  (а) та перехідні залежності обертового моменту  $M = f(t)$  (б) і кутової швидкості  $\omega = f(t)$  (в) відповідно під час зниження напруги відносно номінального значення та різних значень частоти мережі.

### Висновки

1. Розроблено уточнену модель АД з КЗ ротором, в якій індуктивний зв'язок між статором і ротором представлений двоपोर्टовою індуктивністю  $I$ , а не ємністю  $C$ , що призводить до адекватного фізичного розуміння енергетичних процесів між ними.

2. Розроблено та доповнено бібліотеку стандартних елементів симулятора 20-sim новим Bond Graph елементом - двоपोर्टовою індуктивністю  $I$ .

3. За допомогою Bond Graph моделі АД з КЗ ротором проведено імітаційне моделювання усталених та перехідних режимів роботи двигуна ВАО2-280 S4, що використовується у приводі відцентрових насосних агрегатів НГВУ "Долинанафтогаз"

4. Представлений комп'ютерно-орієнтований метод дослідження режимів роботи асинхронних двигунів відкриває шлях до значного енергозощадження і зниження втрат в електроприводах нафтогазової промисловості.

### Література

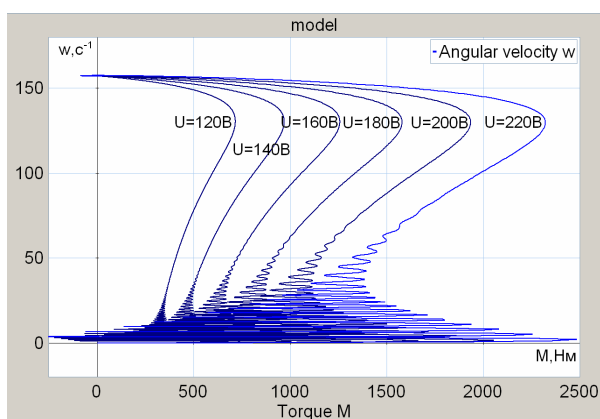
1 Костишин В.С. Створення комп'ютерно-орієнтованих моделей електроприводних агрегатів нафтогазової промисловості [Текст] / Володимир Костишин, Петро Курляк // Нафтогазова енергетика. – 2007. – №1(2). – С.50-56.

2 Курляк П.О. Дослідження енергетичних характеристик магістрального відцентрового насоса НМ 7000-210 за допомогою симулятора 20-sim [Текст] / Петро Курляк // Нафтогазова енергетика. – 2007. – №3(4). – С.60-65.

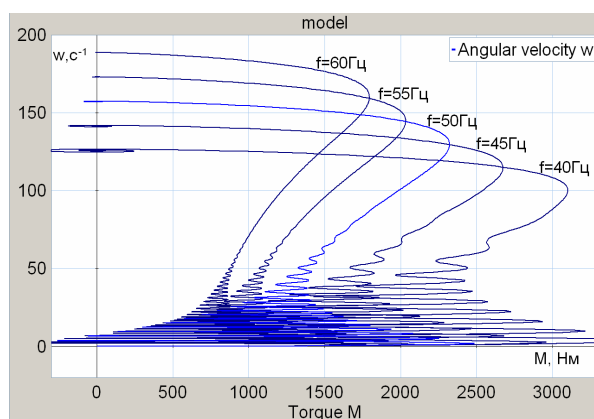
3 Coelingh H.J. Modeling three phase induction machines with rotor skin-effect [Текст] / H.J. Coelingh, P.C. Breedveld, J. van Dijk // 2nd IMACS International Multiconference CESA'98, Nabeul-Hammamet, Tunisia. – 1998. – April. – P.535-540.

4 Breedveld P.C. A Generic Dynamic Model of Multiphase Electromechanical Transduction In Rotating Machinery [Текст] / Peter Breedveld // Proceedings WESIC 2001, University of Twente, Enschede, The Netherlands. – 2001. – June. – P.381-394.

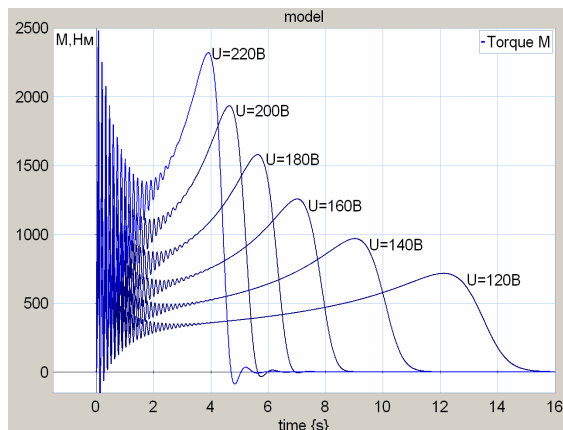
5 Karnopp D. Understanding Induction Motor State Equations Using Bond Graphs [Текст] / Dean Karnopp // Proc. International Conference on Bond Graph Modeling ICBGM'03, Orlando. – 2003. – P.269-273.



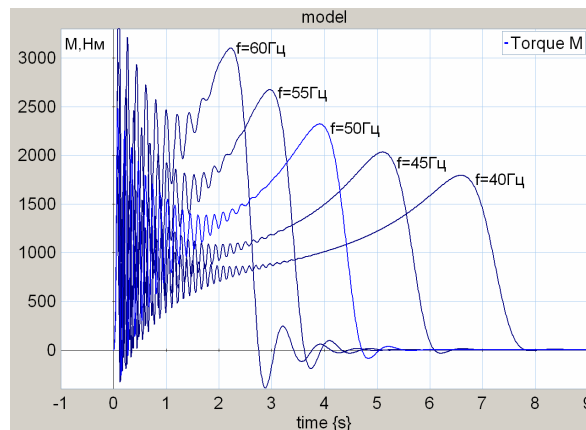
а)



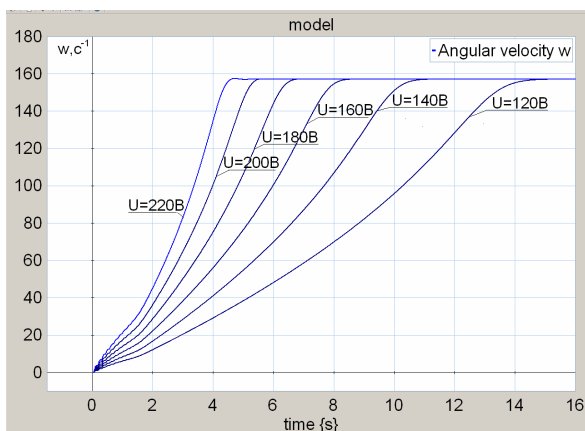
а)



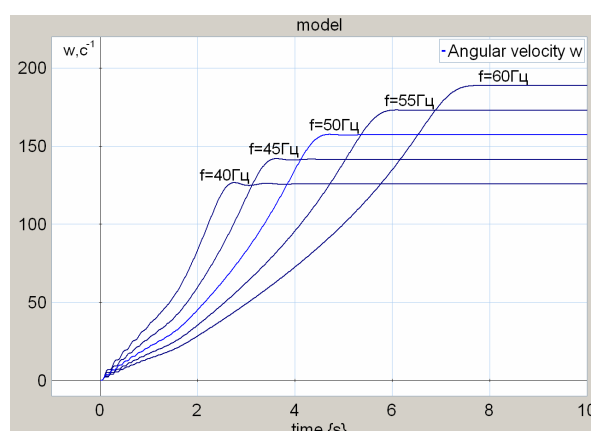
б)



б)



в)



в)

**Рисунок 3 – Усталені механічні характеристики АД  $\omega = f(M)$  (а) та перехідні залежності обертового моменту  $M = f(t)$  (б) і кутової швидкості  $\omega = f(t)$  (в) під час зниження напруги мережі живлення**

6 Jongbaeg K. Bryant Michael D. Bond graph model of a squirrel cage induction motor with direct physical correspondence / Kim Jongbaeg, Michael Bryant // Journal of dynamic systems, measurement, and control.–2000.– vol. 122, n 3.– P. 461-469.

7 Копылов И.П. Электрические машины [Текст] : Учебник для вузов. / И.П. Копылов. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.

**Рисунок 4 – Усталені механічні характеристики АД  $\omega = f(M)$  (а) та перехідні залежності обертового моменту  $M = f(t)$  (б) і кутової швидкості  $\omega = f(t)$  (в) за різних значень частоти мережі**

8 Hancock N. N. Matrix Analysis of Electrical Machinery [Текст] :2nd ed., / N. N. Hancock.– New York: Per-gamon Press, 1974. –280 p.

9 Інтернет: [http://matlab.exponenta.ru/simpower/book1/1\\_7.php](http://matlab.exponenta.ru/simpower/book1/1_7.php)

Стаття надійшла до редакційної колегії  
18.11.09  
Рекомендована до друку профессором  
М.І. Горбійчуком