

**В. С. Костишин, д-р. техн. наук, проф.; П. О. Курляк**

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДНИХ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЇХ КОМП'ЮТЕРНО-ОРІЄНТОВАНИХ BOND GRAPH МОДЕЛЕЙ**

*Розроблено комп'ютерно-орієнтовану Bond Graph модель електроприводного відцентрового насосного агрегату, яка дає можливість досліджувати його динамічні режими роботи, враховуючи взаємовплив складових підсистем різної фізичної природи. Запропонована модель відрізняється від існуючих аналогів здатністю відображати перетоки енергії між конструктивними елементами реальної машини.*

### **Постановка проблеми**

Для проведення дослідження динамічних режимів роботи електроприводних відцентрових насосних агрегатів (ЕВНА), їх необхідно розглядати, як складні технічні об'єкти, що складаються із взаємопов'язаних підсистем різної фізичної природи, а саме: електричної, механічної та гідравлічної. На сьогоднішній день у світовій практиці досить рідко застосовують комплексний підхід для дослідження та моделювання ЕВНА, як системи в цілому. Традиційно складові пристрої ЕВНА моделюють окремо різними методами, внаслідок чого процес дослідження динамічних режимів їх роботи стає надто трудомістким. Тому виникає необхідність розроблення ефективних комп'ютерно-орієнтованих моделей ЕВНА такими методами моделювання, які б не вимагали спеціальних навиків в області програмування та давали можливість аналізувати взаємовплив складових підсистем різної фізичної природи на динамічну поведінку об'єкта в цілому.

### **Аналіз результатів останніх досліджень**

У роботі [1] авторами розроблена лінійна комп'ютерно-орієнтована Bond Graph модель асинхронного двигуна (АД) з короткозамкненим (КЗ) ротором та проведено дослідження усталених і перехідних режимів його роботи. В роботі [2] розроблено уточнену Bond Graph модель АД з КЗ ротором, яка дає можливість враховувати насичення магнітопроводу та ефект витіснення струму в роторі, внаслідок чого підвищилась точність отриманих результатів моделювання. В роботах [3–5] розроблено Bond Graph модель відцентрового насосу (ВН) і проведено дослідження усталених та енергетичних характеристик режимів його роботи. В роботі [6] встановлено енергетичний зв'язок між Bond Graph моделями АД і ВН згідно з балансом механічної і гідравлічної потужностей та проведено дослідження електромеханічного перехідного процесу насосного агрегату. Однак актуальна задача комплексного дослідження складних електрогідромеханічних перехідних процесів залишилась нерозв'язаною.

### **Задачі досліджень**

Створення комплексної Bond Graph моделі ЕВНА, яка дає можливість досліджувати динамічні режими роботи насосного агрегату в цілому, враховуючи взаємовплив його складових підсистем різної фізичної природи.

### **Виклад основного матеріалу**

Комплексна Bond Graph модель ЕВНА створена на основі загальних концепцій комп'ютерно-орієнтованого методу моделювання Bond Graph. Цей метод оперує з уніфікованим поняттям енергопереносу і енергоперетворення у підсистемах різної фізичної природи, базується на законах збереження енергії та принципах багатопортового моделювання. Динамічну поведінку найскладнішої фізичної системи можна з легкістю охарактеризувати, керуючись законом збереження енергії, оскільки у кожній із складових підсистем можна виділити

аналогічну поведінку функцій енергії, а саме: збереження, незворотне та зворотне її перетворення. Тому саме енергія здатна завжди використовуватись як узагальнена координата для моделювання взаємозв'язаних систем різної фізичної природи.

Отже, Bond Graph модель ЕВНА (рис. 1) являє собою позначений і напрямлений граф, вершинами якого є підмоделі фізичних явищ, а стріли символізують енергетичні зв'язки між ними. Такі зв'язки виражають ідеальний потік енергії між двома сполученими підмоделями та представлені двостороннім сигнальним потоком енергетично-спряжених змінних зусилля  $e(t)$  і потоку  $f(t)$ . Добуток цих змінних рівний миттєвій потужності  $P(t)$  у визначений момент часу  $t$ , а величина енергії  $E(t)$ , яка передається через порт елемента, визначена як інтеграл по часу від потужності  $P(t)$ . Енергетичні змінні  $e(t)$  і  $f(t)$  знаходять відповідність у кожній із трьох фізичній підсистемі ЕВНА, а саме: в електричній підсистемі змінною зусилля є напруга  $u(t)$ , а змінною потоку – струм  $i(t)$ , відповідно в механічній – крутний момент  $M(t)$  і кутова швидкість  $\omega(t)$  ротора машини, а в гідравлічній – тиск  $p(t)$  та об'ємний розхід рідини  $Q(t)$ . За допомогою встановлених причинно-наслідкових зв'язків із Bond Graph моделі ЕВНА симулятор 20-sim забезпечує комп'ютерне формування системних диференціальних рівнянь, їх розв'язання та у графічній формі зображає залежності змінних стану агрегату в функції часу чи інших змінних.

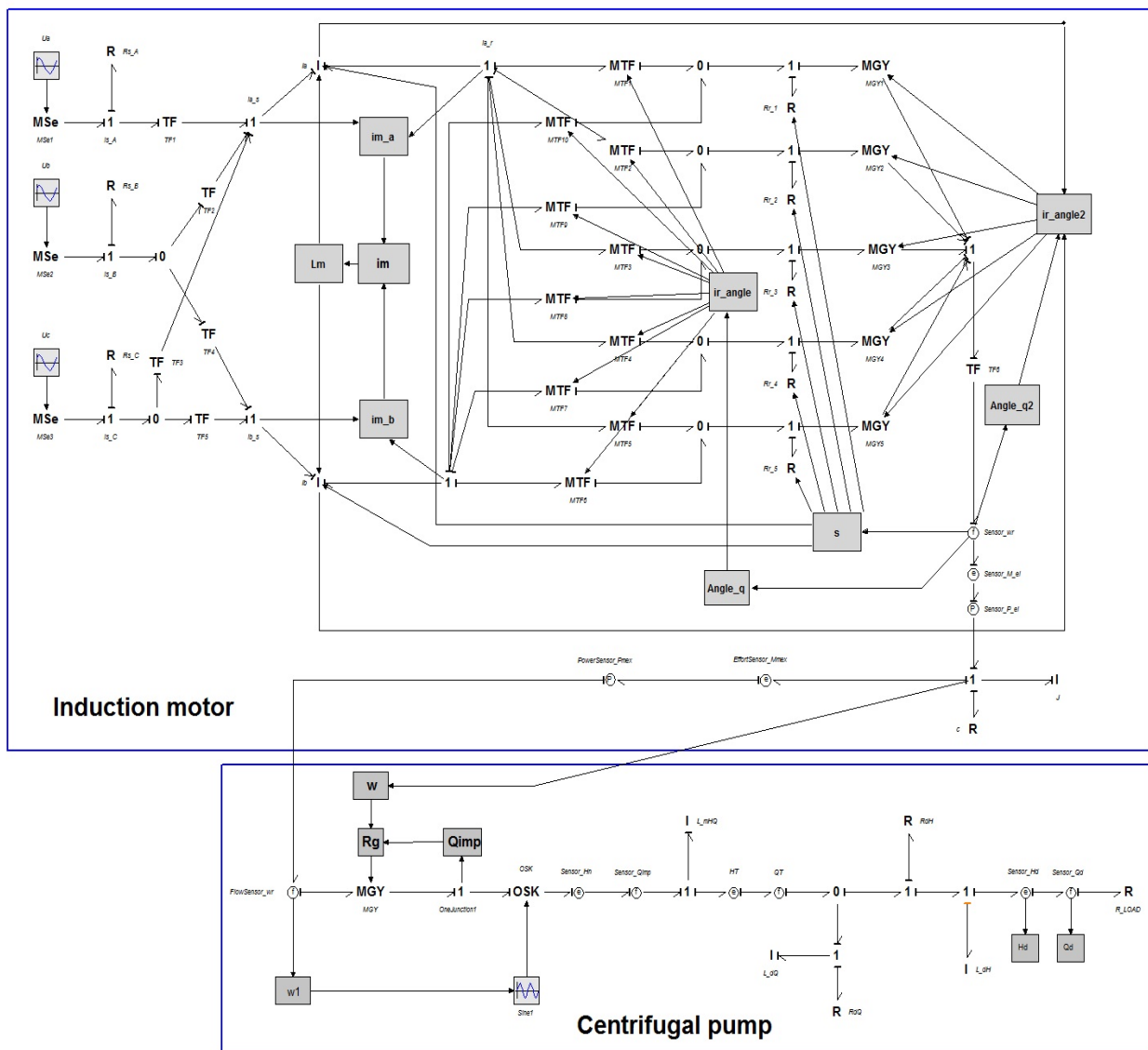


Рис. 1. Bond Graph модель електроприводного відцентрового насосного агрегату

Конструктивно до комплексної Bond Graph моделі ЕВНА (рис.1) входять створені авторами раніше підмоделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором ІМ [2] та відцентрового насоса СР [3]. Підмодель АД з КЗ ротором враховує ефекти насичення магнітопроводу та витіснення струму в роторі двигуна за рахунок зміни її параметрів у перехідних режимах роботи. Підмодель ВН дає змогу на основі каталогових конструктивних даних гідромашини аналізувати її динамічні та усталені режимні параметри у всьому експлуатаційному діапазоні з урахуванням основних властивостей робочої рідини, зокрема її в'язкості. Для відображення взаємозв'язку між даними підмоделями встановлено енергетичний зв'язок згідно з балансом механічної і гідравлічної потужностей за рівнянням Ейлера для гідравлічних машин [6]. Баланс механічної і гідравлічної потужностей насосного агрегату виражаємо співвідношенням

$$M(t)\omega(t) = p(t)Q(t). \quad (1)$$

Рівняння Ейлера для ВН з урахуванням геометричних розмірів робочого колеса має вигляд

$$\rho g H(t) = \rho \omega(t) \left( \omega(t) (R_2^2 - R_1^2) - \frac{Q(t)}{2\pi} \left( \frac{\text{ctg}\beta_2}{b_2} - \frac{\text{ctg}\beta_1}{b_1} \right) \right), \quad (2)$$

де  $H(t)$  – напір рідини, який розвиває ВН,  $\rho$  – густина рідини;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $R_2, R_1$  – зовнішній і внутрішній радіуси робочого колеса;  $b_2, b_1; \beta_2, \beta_1$  – відповідно, ширина і кут нахилу лопаті на виході і вході колеса ВН.

В запропонованій моделі ЕВНА рівняння Ейлера (2) реалізовано за допомогою модульованого гіратора **MGY** із такими конструктивними рівняннями

$$\left. \begin{aligned} e_1(t) &= r f_2(t); \\ e_2(t) &= r f_1(t) \end{aligned} \right\} \text{ або } \left. \begin{aligned} M(t) &= r Q(t); \\ p(t) &= r \omega(t), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де  $r$  – модульований коефіцієнт гірації. Причинно-наслідковий зв'язок **MGY** встановлює перехресні зв'язки між енергетичними змінними стану двигуна і насоса, тобто змінна кутової швидкості двигуна  $\omega(t)$  породжує гідравлічний тиск в насосі  $p(t)$ , а відповідно, об'ємний розхід рідини  $Q(t)$  формує навантаження двигуна – момент  $M(t)$ . Отже, коефіцієнт гірації повинен мати однакову величину і розмірність, тобто необхідно щоб виконувалось співвідношення

$$r = \frac{M(t)}{Q(t)} = \frac{p(t)}{\omega(t)} = \left[ \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{М}^2} \right]. \quad (4)$$

Згідно з рівнянням Ейлера (2) модульований коефіцієнт гірації буде рівним

$$r = \rho \left( \omega(t) (R_2^2 - R_1^2) - \frac{Q(t)}{2\pi} \left( \frac{\text{ctg}\beta_2}{b_2} - \frac{\text{ctg}\beta_1}{b_1} \right) \right). \quad (5)$$

Обчислення коефіцієнта гірації (5) у Bond Graph моделі ЕВНА здійснено за допомогою розрахункових модулів  $w, Q_{\text{imp}}$  та  $Rg$ .

Оскільки Bond Graph модель ВН [3] спроектована в обертовій системі координат  $d, q$  жорстко зв'язаній із колесом насоса, а її параметри розраховані в системі відносних одиниць, то в запропонованій Bond Graph моделі ЕВНА розроблено модуль **OSK** функціонального зв'язку між обертовою та нерухомою системами координат, який також дає можливість проводити перерахунок параметрів із іменованих одиниць у відносні і навпаки. Цей модуль оперує з енергетичними змінними стану ВН, не порушуючи їх причинно-наслідковий зв'язок. Його робота базується на тому ж принципі, що і функціонального модуля, запропонованого в роботі [5].

На основі розробленої Bond Graph моделі ЕВНА симулятор 20-sim генерує та розв'язує такі системи диференціальних рівнянь стану насосного агрегату, а саме:

рівняння руху електроприводу

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

систему диференціальних рівнянь АД з КЗ ротором

$$\begin{cases} u_{\alpha}^s = R_{\alpha}^s i_{\alpha}^s + L_{\alpha}^s \frac{di_{\alpha}^s}{dt} + M \frac{di_{\alpha}^r}{dt}; \\ u_{\beta}^s = R_{\beta}^s i_{\beta}^s + L_{\beta}^s \frac{di_{\beta}^s}{dt} + M \frac{di_{\beta}^r}{dt}; \\ 0 = R_{\alpha}^r i_{\alpha}^r + L_{\alpha}^r \frac{di_{\alpha}^r}{dt} + M \frac{di_{\alpha}^s}{dt} + \omega^r (L_{\beta}^r i_{\beta}^r + M i_{\beta}^s); \\ 0 = R_{\beta}^r i_{\beta}^r + L_{\beta}^r \frac{di_{\beta}^r}{dt} + M \frac{di_{\beta}^s}{dt} - \omega^r (L_{\alpha}^r i_{\alpha}^r + M i_{\alpha}^s); \\ T_e = p \left[ i_{\alpha}^r (M i_{\beta}^s + L_{\beta}^r i_{\beta}^r) - i_{\beta}^r (M i_{\alpha}^s + L_{\alpha}^r i_{\alpha}^r) \right]; \end{cases} \quad (7)$$

систему диференціальних рівнянь ВН

$$\begin{cases} \rho g H_{ekv} = L_{mHQ} \frac{dQ_T}{dt} + L_{dQ} \frac{dQ_{\Delta}}{dt} + Q_{\Delta} R_{dQ}; \\ \rho g H_{ekv} = L_{mHQ} \frac{dQ_T}{dt} + L_{dH} \frac{dQ_d}{dt} + Q_{\Delta} (R_{dH} + R_{LOAD}); \\ Q_T - Q_{\Delta} - Q_d = 0, \end{cases} \quad (8)$$

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 статора і ротора;  $L_{\alpha}^s, L_{\beta}^s, L_{\alpha}^r, L_{\beta}^r$  — повні індуктивності обмоток статора і ротора;  $M$  — взаємна індуктивність;  $\omega^r$  — кутова швидкість обертання ротора;  $T_e$  — електромагнітний момент двигуна;  $p$  — кількість пар полюсів;  $J$  — сумарний обертовий момент інерції ротора двигуна і ВН;  $c$  — коефіцієнт тертя вала в підшипниках;  $T_L$  — момент навантаження на валу;  $H_{ekv}$  — значення еквівалентного напору на виході робочого колеса ВН;  $Q_T, Q_d, Q_{\Delta}$  — відповідно витрати на виході колеса, дифузору та у вітці зворотного зв'язку (об'ємні втрати рідини);  $L_{mHQ}$  — інерційність, яка відображає вплив скінченної кількості лопатей ВН;  $R_{dH}, L_{dH}; R_{dQ}, L_{dQ}$  — активний опір та інерційність відповідно віток гідравлічних та об'ємних втрат;  $R_{LOAD}$  — зовнішній гідравлічний опір напірного тракту гідромережі [3].

За допомогою комплексної Bond Graph моделі ЕВНА досліджено пускові режими роботи (рис. 2–4) з номінальним навантаженням насосного агрегату NGK-500/450/100 із приводом АД 4АЗМВ-2500/6000-У2 нафтоперекачувальної станції «Плещівка» філії «Магістральні нафтопроводи «Дружба» ВАТ Укртранснафта.

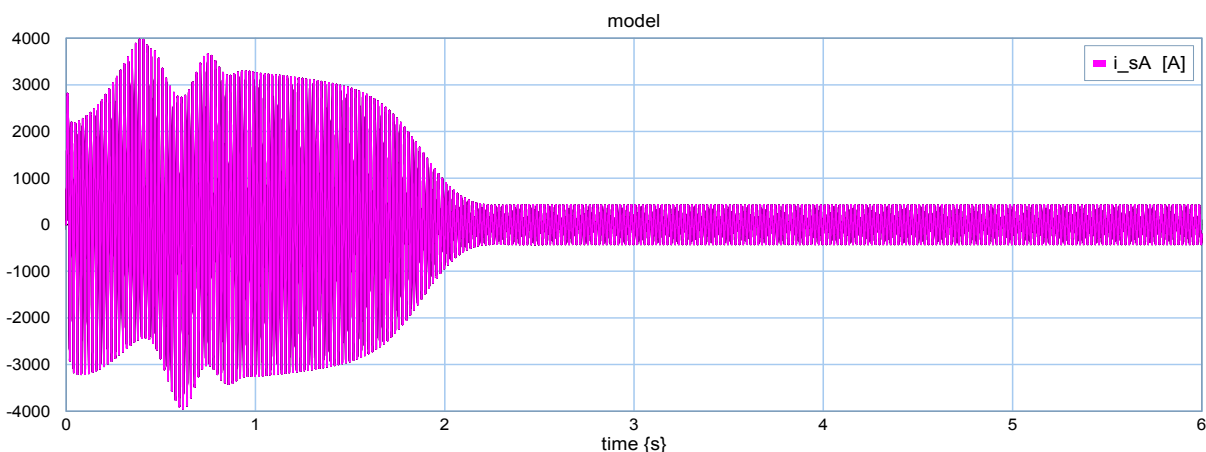


Рис. 2. Зміна струму статора фази А в часі під час пуску агрегату

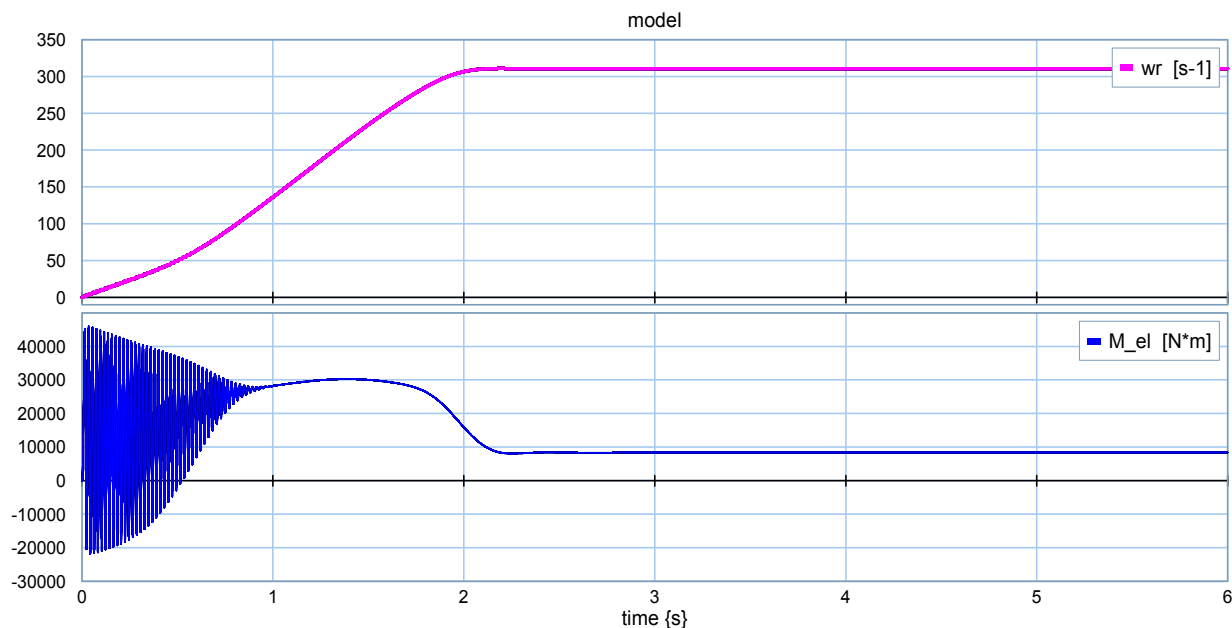


Рис. 3. Зміна кутової швидкості обертання ротора агрегату і електромагнітного моменту двигуна під час пуску

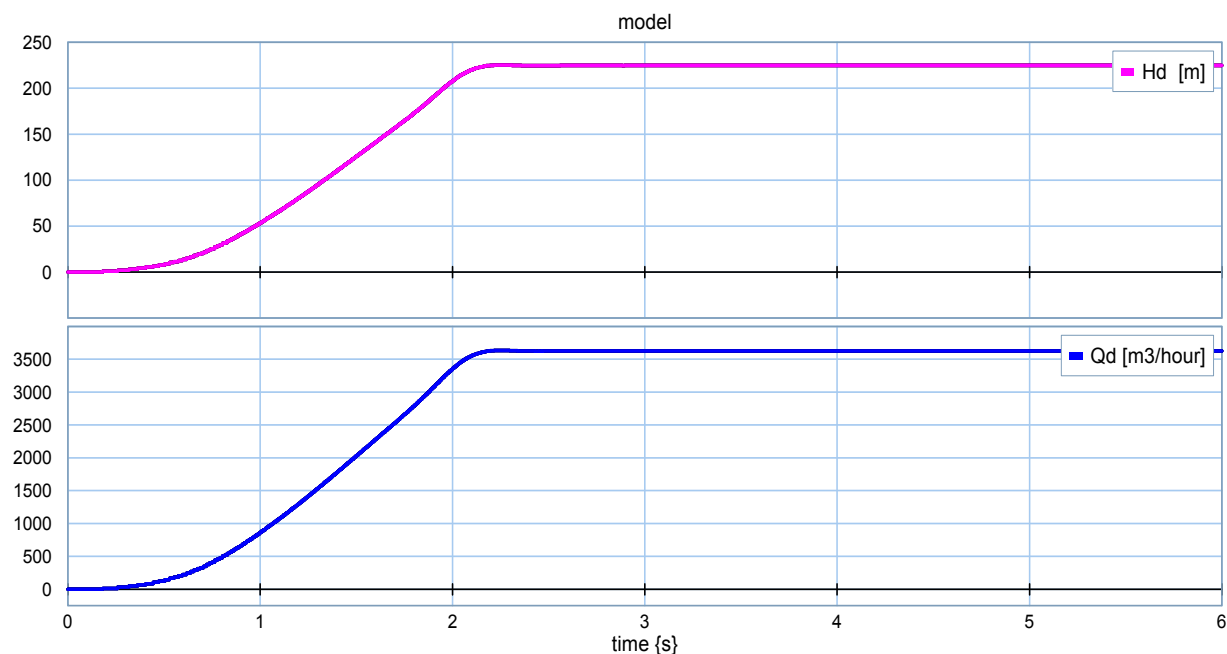


Рис. 4. Зміна напору та витрати рідини на виході відцентрового насосного агрегату під час його пуску

Для відображення адекватності моделі отримані результати моделювання порівнювались із результатами заводських випробувань. Відносна похибка отриманих результатів не перевищувала 5 % для стаціонарних і 10–15 % для перехідних режимів роботи насосного агрегату.

### Висновки

1. Розроблено комп'ютерно-орієнтовану Bond Graph модель ЕВНА, яка дає можливість досліджувати його динамічні режими роботи, враховуючи взаємовплив складових підсистем різної фізичної природи.

2. За допомогою Bond Graph моделі ЕВНА проведено імітаційне моделювання пускових режимів роботи насосного агрегату NGK-500/450/100 із приводом АД 4А3МВ-2500/6000-У2 нафтоперекачувальної станції «Плещівка» філії «Магістральні нафтопроводи «Дружба» ВАТ Укртранснафта.

3. Використання комп'ютерно-орієнтованих Bond Graph моделей для дослідження динамічних режимів ЕВНА дає можливість значно спростити та прискорити процес аналізу і прогнозування режимів роботи агрегатів з метою подальшого синтезу оптимальних законів керування ними.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Костишин В. С. Розроблення комп'ютерно-орієнтованих Bond Graph моделей асинхронних електродвигунів з метою дослідження усталених та перехідних режимів їх роботи [Текст] / Володимир Костишин, Петро Курляк // Нафтогазова енергетика. — 2009. — № 2(11). — С. 88—93.
2. Костишин В. С. Bond Graph модель асинхронного двигуна з врахуванням насичення магнітопроводу та ефекту витіснення струму в роторі [Текст] / Володимир Костишин, Петро Курляк // Нафтогазова енергетика — 2011 : міжнар. наук.-техн. конф. , Івано-Франківськ, 10—14 жовтня 2011 р. : тези доп. і повідомл. — Івано-Франківськ, 2011. — 61 с.
3. Костишин В. С. Bond Graph модель магістральних відцентрових насосів нафтоперекачувальних станцій / Володимир Костишин, Петро Курляк // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. — 2007. — № 1 (22). — С. 56—63.
4. Костишин В. С. Побудова напірних характеристик магістрального відцентрового насосу 16НД-10\*1 при різних частотах обертання робочого колеса за допомогою симулятора 20-sim [Текст] / Володимир Костишин, Петро Курляк // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. — 2007. — № 4 (25). — С. 101—107.
5. Курляк П. О. Дослідження енергетичних характеристик магістрального відцентрового насосу НМ-7000-210 за допомогою симулятора 20-sim [Текст] / Петро Курляк // Нафтогазова енергетика. — 2007. — № 3 (4). — С. 60—65.
6. Курляк П. О. Застосування комп'ютерно-орієнтованого методу Bond Graph для дослідження перехідних процесів електроприводних відцентрових насосних агрегатів [Текст] / Петро Курляк // Наукові праці Донецького національного технічного університету. — 2011. — № 11 (186). — С. 221—225.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті

Стаття надійшла до редакції 10.02.12  
Рекомендована до друку 14.02.12

**Костишин Володимир Степанович** — завідувач кафедри, **Курляк Петро Омелянович** — асистент.

Кафедра електропостачання та електрообладнання промислових підприємств, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ