

УДК 004.942:62-83

П. О. КУРЛЯК**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**
pkurlyak@gmail.com

ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНО-ОРІЄНТОВАНОГО МЕТОДУ BOND GRAPH ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДНИХ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ

Запропоновано використання комп'ютерно-орієнтованого методу Bond Graph для дослідження перехідних процесів електроприводних відцентрових насосних агрегатів, як засобу для аналізу та ухвалення рішень персоналом з метою покращення керування режимами роботи електромеханічних систем.

Bond Graph метод, асинхронний двигун, відцентровий насос, перехідні процеси.

Постановка проблеми. Вагомою проблемою забезпечення належного рівня експлуатаційних режимів роботи нафтоперекачувальних станцій (НПС) залишається збереження надійності та підвищення ефективності функціонування основного технологічного обладнання, зокрема електроприводних відцентрових насосних агрегатів (ВНА). Складність полягає в тому, що існуюча система магістрального транспорту нафти та нафтопродуктів споруджувалася в 70-х роках ХХ століття і за час експлуатації значна її частина вичерпала свій ресурс та застаріла морально. На сьогодні, за оцінкою експертів, фізичне зношування трубопроводів складає близько 70%, що змушує знижувати робочий тиск та продуктивність, а отже і енергоефективність НПС. Тому, у такій ситуації актуальною стає задача дослідження перехідних процесів, оскільки вона дає можливість прискорити процес аналізу та ухвалення обґрунтованого рішення персоналом і тим самим покращити керування режимами роботи таких систем.

Аналіз результатів останніх досліджень. Сучасні дослідження електроприводних ВНА є комплексним завданням значної технічної складності, що вимагає великої кількості експериментів. Неусталені режими роботи ВНА характеризуються протіканням взаємозв'язаних електромагнітних, механічних і гідравлічних перехідних процесів. Аналіз літературних джерел показав, що специфічна приналежність цієї області досліджень до стику наук – електроенергетики і гідромеханіки – визначила той факт, що із єдиного електрогідромеханічного перехідного процесу електроприводних ВНА спеціалісти-електрики виділяють для розгляду електромеханічні, а спеціалісти-гідромеханіки гідромеханічні складові. Таким чином не враховувався взаємовплив електромагнітних і гідравлічних перехідних процесів. Отже, для реалізації енергоефективних режимів роботи електроприводних ВНА та для швидкого їх відновлення після аварійних ситуацій необхідно вміти правильно проводити аналіз, прогнозування та керування процесами, які виникають при малих та великих збуреннях системи. Для дослідження таких режимів роботи, як правило, використовують математичне та комп'ютерно-орієнтоване моделювання, оскільки проведення експериментальних досліджень незавжди є можливим.

Задачі досліджень. Використання Bond Graph моделей електроприводних відцентрових насосних агрегатів для дослідження перехідних процесів, які виникають при їх експлуатації, з метою покращення керування режимами роботи таких систем.

Виклад основного матеріалу. Існує багато традиційних методів математичного моделювання динамічних систем, які є адаптованими тільки для підсистеми однієї фізичної природи (електричної, механічної, гідравлічної тощо). Однак не в достатній мірі для моделювання таких систем розроблені інструменти програмного моделювання. Більшість алгоритмів і комп'ютерних програм застосовують для числового вирішення рівнянь системи. Крім того, аналіз літературних джерел показав, що спеціалізовані методи моделювання не дають задовільних результатів для інших фізичних підсистем та не дають змоги проводити повне комплексне дослідження складного об'єкту.

Отже, для ефективного керування та оптимізації НПС та для оптимального синтезу диференціальних рівнянь стану таких систем необхідна могутня міждисциплінарна методологія та інструменти програмного моделювання, які охоплюють всі складні енергетичні процеси і математичні моделі фізичних підсистем. Здійснивши порівняльний аналіз сучасних методів моделювання, відзначимо, що для ефективного вирішення поставлених задач досліджень найбільш доцільним є уніфікований метод Bond Graph [1].

Метод моделювання Bond Graph відображає системно-незалежний графічний опис динамічної поведінки систем різної фізичної природи. Він був започаткований професором Пейнтером [2] на початку шістдесятих років ХХ-століття та розроблений його учнями Кернопом і Розенбергом [3]. Bond Graph метод – це могутній інструмент для дослідження складних технічних систем, який базується на законах збереження енергії та принципах багатопортового моделювання. При використанні даного методу різні фізичні підсистеми (електричну, механічну, гідравлічну тощо) описують аналогічними рівняннями та фізичними поняттями. Більше того, для опису будь-якої системи використовують набір із дев'яти основних стандартних елементів. Моделі

Bond Graph є ієрархічними, тобто, можуть складатись із інших підмоделей, і так аж до найпростіших стандартних елементів. За допомогою встановлених причинно-наслідкових зв'язків даний метод забезпечує можливість комп'ютерного формування системних рівнянь, перевірку правильності синтезу моделей та у графічній формі подає наглядний опис складних систем. Тому для проведення моделювання одного методу замало. Необхідно мати програмний пакет, який би підтримував Bond Graph метод та давав змогу аналізувати створені моделі досліджуваних об'єктів, генерувати та розв'язувати системи диференціальних рівнянь і отримувати залежності миттєвих параметрів режиму роботи об'єкта у функції часу або інших координат. Таким програмним продуктом є симулятор 20-sim розроблений лабораторією автоматизованого керування нідерландського університету Твенте. Автору вдалося отримати ліцензовану версію програми 20-sim 3.6 07 Professional. Визначальні концептуальні положення методу Bond Graph та симулятора 20-sim викладені в роботі [1]. Основним недоліком методу Bond Graph є те, що він не знайшов широкого застосування серед науковців нашої країни та країн СНД. Проте в країнах Західної Європи, США та Канаді він є широкоживаним та досить популярним.

На засадах основних концепцій компютерно-орієнтованого методу моделювання Bond Graph було створено моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором [4] та відцентрового насосу [5], параметри елементів яких розраховуються відповідно за методиками [6], [7].

Математичний опис Bond Graph моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором базується на відомих законах узагальненої теорії електричних машин. Модель містить трифазну обмотку статора, підключену до симетричного джерела напруги u_a, u_b, u_c

$$u_a = U_m \sin(\omega t); \quad u_b = U_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}); \quad u_c = U_m \sin(\omega t + \frac{4\pi}{3}), \quad (1)$$

де U_m - амплітудне значення фазної напруги джерела живлення.

Рівняння рівноваги ЕРС в обмотках статора і ротора асинхронного двигуна базуються на другому законі Кірхгофа та записані в системі координат α, β

$$\begin{bmatrix} u_\alpha^s \\ u_\beta^s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_\alpha^s + \frac{d}{dt} L_\alpha^s & 0 & \frac{d}{dt} M & 0 \\ 0 & R_\beta^s + \frac{d}{dt} L_\beta^s & 0 & \frac{d}{dt} M \\ \frac{d}{dt} M & M\omega^r & R_\alpha^r + \frac{d}{dt} L_\alpha^r & L_\beta^r \omega^r \\ -M\omega^r & \frac{d}{dt} M & -L_\alpha^r \omega^r & R_\beta^r + \frac{d}{dt} L_\beta^r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_\alpha^s \\ i_\beta^s \\ i_\alpha^r \\ i_\beta^r \end{bmatrix}, \quad (2)$$

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; $L_\alpha^s, L_\beta^s, L_\alpha^r, L_\beta^r, M$ - власні та взаємна індуктивності обмоток, ω^r - кутова швидкість обертання валу двигуна.

Електромагнітна взаємодія між статором і ротором описується законом Ампера, який зв'язує потокозчеплення обмоток із струмами, що протікають в них

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

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

Динамічні властивості механічної частини електропривода представлені в моделі рівнянням руху згідно другого закону Ньютона, який відображає рівновагу моментів на валу машини

$$J \frac{d\omega^r}{dt} = M_E - M_C, \quad (4)$$

де J - момент інерції на валу машини, який враховує інерційність як самої машини, так і зведену до валу інерційність робочого механізму, M_E - електромагнітний момент двигуна; M_C - момент робочого механізму, приведений до валу двигуна.

Електромагнітний момент двигуна описується за законом Ленца. Цей закон зв'язує величину моменту із струмами в обмотках статора і ротора

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

де p - число пар полюсів двигуна.

Короткозамкнена обмотка асинхронного двигуна у Bond Graph моделі представлена окремими стержнями зі з'єднаними на кінцях роторними кільцями. Враховуючи те, що ротор у процесі роботи двигуна обертається, струми в кожному стержні залежать від його кутової позиції θ відносно статора. Залежність струмів у стержнях ротора від струмів α, β складових має вигляд

$$i_k^r = m \left[i_\alpha^r \cos \left(\theta + \frac{2(k-1)\pi}{n} \right) + i_\beta^r \sin \left(\theta + \frac{2(k-1)\pi}{n} \right) \right], \quad (6)$$

де $\theta = \int_0^t \omega^r dt$; $m = \sqrt{\frac{2}{n}}$, n - кількість стержнів обмотки ротора; $k = 1, 2, \dots, n$.

Структура Bond Graph моделі відцентрового насосу (ВН) відображена в роботі [5]. Вона базується на основі просторової будови гідромашини, та складається з трьох взаємозв'язаних частин: підводу, робочого колеса та відводу рідини в гідромережу. Модель ВН представлена джерелом H_0 , яке створює напір на виході робочого колеса в режимі закритої засувки та набором активних R та інерційних X опорів, які символізують втрати та перетворення енергії в машині. Активні опори відображають незворотні втрати (дисипацію) енергії в довкілля у вигляді тепла за рахунок сил в'язкісного тертя між шарами рідини. Інерційні опори спричинюються силами інерції, що протидіють зміні витрати в насосі. Зокрема вітка R_{mech}, X_{mech} відтворює механічні енергетичні процеси гідравлічного гальмування, дискового тертя та тертя в підшипниках і сальниках. Вплив скінченної кількості лопатей робочого колеса на напір і витрату машини відображають відповідно опори X_{mH}, X_{mQ} . Вітка зворотного зв'язку R_{dQ}, X_{dQ} представляє витоки рідини через ущільнення і байпаси ВН, а вітка R_{dH}, X_{dH} - рух рідини у спіральному відводі ВН. Елемент R_{load} символізує зовнішній гідравлічний опір напірного тракту гідромережі, в той час як X_r - внутрішній опір ідеалізованого насоса [7].

Для проведення дослідження єдиного електрогідромеханічного перехідного процесу електроприводних ВНА комплексним методом встановлено енергетичний зв'язок між Bond Graph моделями асинхронного двигуна **AD** і відцентрового насоса **CP** згідно балансу механічної і гідравлічної потужностей (7), який відображається рівнянням Ейлера (8) для гідравлічних машин.

Баланс механічної і гідравлічної потужностей насосного агрегату

$$M_C \omega_m = \rho g H_\infty Q_\infty, \quad (7)$$

де H_∞ — напір ідеального ВН, який відображає питому енергію, що передається від колеса з нескінченною кількістю лопатей ідеальній рідині для її переміщення; ρ - густина рідини; g - прискорення вільного падіння; Q_∞ - об'ємна витрата рідини ВН ω_m - кутова частота обертання робочого колеса насоса (при жорсткому з'єднанні валів двигуна і насоса $\omega_m = \omega^r$).

Рівняння Ейлера для ВН з врахуванням геометричних розмірів робочого колеса

$$\rho g H_\infty = \rho \omega_m \left(\omega_m (R_2^2 - R_1^2) - \frac{Q_\infty}{2\pi} \left(\frac{ctg \beta_2}{b_2} - \frac{ctg \beta_1}{b_1} \right) \right), \quad (8)$$

де 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.

Співвідношення (8) представлено в Bond Graph моделі ВНА (рис.1) модульованим гіраторним зв'язком, який відтворює баланс механічної і гідравлічної потужностей з коефіцієнтом гірації k_{GY}

$$k_{GY} = \rho \left(\omega_m (R_2^2 - R_1^2) - \frac{Q_\infty}{2\pi} \left(\frac{ctg \beta_2}{b_2} - \frac{ctg \beta_1}{b_1} \right) \right). \quad (9)$$

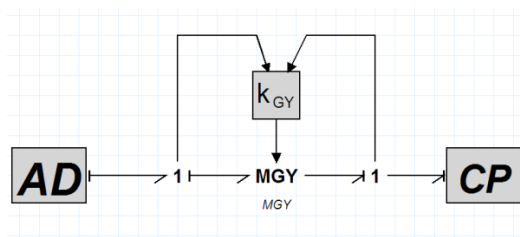
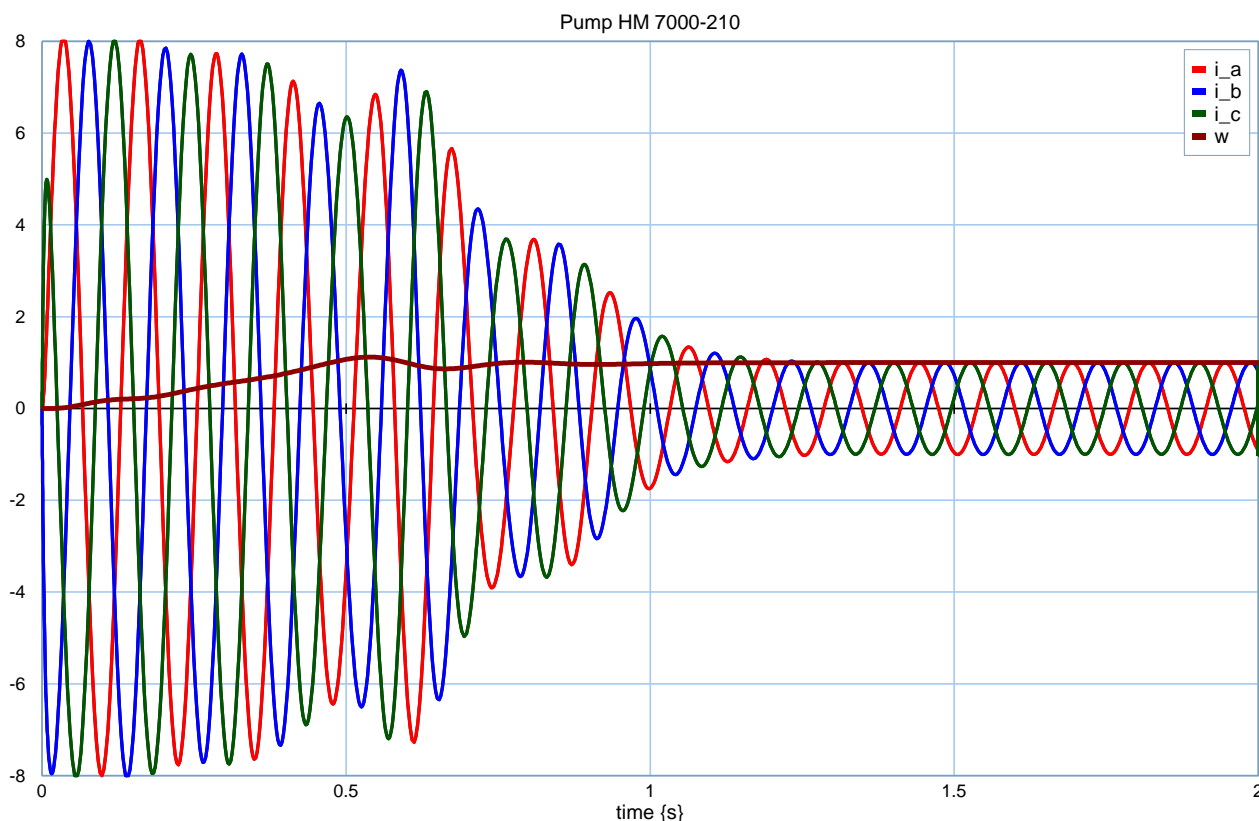


Рисунок 1- Структура Bond Graph моделі електроприводного ВНА

Реалізація Bond Graph моделі електроприводного ВНА за допомогою спеціалізованої програми комп'ютерного імітаційного моделювання 20-sim 3.6 07 Professional дало можливість провести дослідження електромеханічного перехідного процесу насосного агрегату НМ-7000-210 із приводом асинхронного двигуна АТД-5000. Результати моделювання (рис.2) електромеханічного перехідного процесу пуску насосного агрегату

HM 7000-210 для наглядності зображені у вигляді сумішених характеристик зміни пускових струмів в обмотках статора двигуна та кутової швидкості обертання валу ВН у системі відносних одиниць.



i_a ; i_b ; i_c – пускові струми у обмотках статора двигуна в системі відносних одиниць;
 w - кутова швидкість обертання валу насосного агрегату в системі відносних одиниць.

Рисунок 2- Суміщені характеристики електромеханічного перехідного процесу насосного агрегату HM 7000-210

Висновки. Застосування комп'ютерно-орієнтованого методу Bond Graph для дослідження перехідних процесів електроприводних відцентрових насосних агрегатів дає можливість значно спростити та прискорити процес аналізу, прогнозування та ухвалення рішення персоналом і тим самим покращити керування режимами роботи електромеханічних систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Костишин В.С. Створення комп'ютерно-орієнтованих моделей електроприводних агрегатів нафтогазової промисловості / Костишин В.С., Курляк П.О. // Нафтогазова енергетика. – 2007. – №1 (2) – С. 50-56.
2. Paynter H.M. Analysis and Design of Engineering Systems / Paynter H. M. // The M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts. – 1961. – 268 p.
3. Rosenberg R.C. Introduction to physical system dynamics / Rosenberg R.C., Karnopp D.C. // McGraw Hill, New York, NY. – 1983. – 176 p.
4. Костишин В.С. Розроблення комп'ютерно-орієнтованих Bond Graph моделей асинхронних електродвигунів з метою дослідження усталених та перехідних режимів їх роботи / Костишин В.С., Курляк П.О. // Нафтогазова енергетика. – 2009. – №2(11). – С. 88-93.
5. Костишин В.С. Bond Graph модель магістральних відцентрових насосів нафтоперекачувальних станцій / Костишин В.С., Курляк П.О. // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ – 2007. – №1 (22) – С. 56-63.
6. Matlab & Toolboxes. – [Електр. ресурс] – Режим дост.: http://matlab.exponenta.ru/simpower/book1/1_7.php.
7. Костышин В.С. Моделирование режимов работы центробежных насосов на основе электрогидравлической аналогии / Костышин В.С. – Ивано-Франковск: Факел, 2000. – 164 с.

П.Е.КУРЛЯК

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

Применение компьютерно-ориентированного метода bond graph для исследования переходных процессов электроприводных центробежных насосных агрегатов. Предложено использование компьютерно-ориентированного метода Bond Graph для исследования переходных процессов электроприводных центробежных насосных агрегатов, как средства для анализа и принятия решений персоналом с целью улучшения управления режимами работы электромеханических систем.

Bond Graph метод, асинхронный двигатель, центробежный насос, переходные процессы.

P. KURLYAK

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

Application of Computer-Oriented Bond Graph Method for Researching Transitional Processes of Electrodriven Centrifugal Pump Units. The use of computer-oriented Bond Graph method for researching transitional processes of electro driven centrifugal pump units as the means for personnel analysis and decision making in order to improve electromechanical systems operation control are suggested in the following article.

Bond Graph method, induction motor, centrifugal pump, transitional processes.