

3. Florentsev, S. N. Traction Electric Equipment Set for AC Electric Transmission Various Vehicles [Text] / S. N. Florentsev // Proceedings of International Exhibition & Conference «Power Electronics, Intelligent Motion, Power Quality (PCIM-2009)», 12–14 May 2009, Nuremberg, Germany. — P. 625–627.
4. Кулагін, Д. О. Проектування систем керування тяговими електропередачами моторвагонних поїздів [Текст]: монографія / Д. О. Кулагін. — Бердянськ: ФО-П Ткачук О. В., 2014. — 154 с.
5. Ali Emadi. Energy-Efficient Electric Motors: Selection and Applications [Text] / Ali Emadi. — New York: Marcel Dekker, 2004. — Ed. 3. — 424 p.
6. Кулагін, Д. О. Математична модель тягового асинхронного двигуна з урахуванням насичення магнітних кіл [Текст] / Д. О. Кулагін // Науковий вісник НГУ. — 2014. — № 6. — С. 103–110.
7. Кулагін, Д. О. Математична модель тягового асинхронного двигуна з урахуванням насичення [Текст] / Д. О. Кулагін // Технічна електродинаміка. — 2014. — № 6. — С. 49–55.
8. Boldea, I. Induction Machines Handbook [Text] / Ion Boldea, Syed A. Nasar. — CRC Press Boca Raton: London, New York, Washington, D. C., 2002. — 845 p.
9. El-Sharkawi, M. A. Fundamental of electric drivers [Text] / Mohamed A. El-Sharkawi. — Brooks: Cole production, 2000. — 400 p.
10. Stone, G. C. Electrical insulation for rotating machines [Text] / Greg C. Stone, Hussein Dhirani, Edwards A. Boulter, Ian Culbert. — A John Wiley & Sons, inc., 2004. — 392 p.

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ПОДВИЖНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Исследованы особенности выбора тяговых электродвигателей для различных видов и конструкций подвижных электро-

технических комплексов. Проведен анализ практического опыта построения систем тяговых электроприводов на основе выбранного тягового двигателя и обобщена методика определения параметров двигателей при определенных требованиях относительно показателей движения со стороны электротехнического комплекса.

Ключевые слова: тяговый двигатель, электротехнический комплекс, тяговый привод, методика.

Кулагін Дмитро Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, докторант, кафедра електропостачання промислових підприємств, Запорізький національний технічний університет, Україна, e-mail: kulagindo@gmail.com.

Чернецький Богдан Сергійович, аспірант, кафедра електропостачання промислових підприємств, Запорізький національний технічний університет, Україна, e-mail: Bogdan_chernetskiy@yandex.ru.

Кулагин Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент, докторант, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Запорожский национальный технический университет, Украина.

Чернецкий Богдан Сергеевич, аспирант, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Запорожский национальный технический университет, Украина.

Kulagin Dmitry, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine, e-mail: kulagindo@gmail.com.

Chernetskiy Bogdan, Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine, e-mail: Bogdan_chernetskiy@yandex.ru

УДК 004.942:62-83

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.41406

Курляк П. О.

АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТОКІВ У СИСТЕМАХ РІЗНОЇ ФІЗИЧНОЇ ПРИРОДИ ЕЛЕКТРОПРИВОДНИХ ТУРБОМАШИН

Запропоновано спосіб аналізу енергетичних потоків в системах різної фізичної природи електроприводних турбомашин. Для проведення дослідження єдиного електрогідромеханічного процесу комплексним методом встановлено енергетичний зв'язок між Bond Graph моделями асинхронного двигуна і відцентрового насоса. Проаналізовано ефективність перетворення енергії у кожній фізичній області турбомашини та розроблено рекомендації з ефективного використання енергоресурсів.

Ключові слова: Bond Graph, енергетика, асинхронний двигун, відцентровий насос, турбомашина, миттєві потужності.

1. Вступ

В умовах стрімкого росту ціни на енергоносії вкрай необхідним стратегічним завданням є збереження енергетичної незалежності України. Існують багато шляхів виконання даного завдання, одним із яких є впровадження енергоефективних режимів роботи технологічного обладнання всіх галузей промисловості. Велику частку — більше 70 % від загального об'єму електроприводів (ЕП), що використовуються в промисловості займають ЕП змінного струму на базі асинхронних дви-

гунів з короткозамкненим ротором. Особливо слід відмітити електроприводні турбомашини (ЕПТМ), а саме: насоси, вентилятори, компресори, які є найбільш масовими виробничими механізмами. Встановлення у свій час низьких цін на електроенергію призвело до значного підвищення масогабаритних показників приводних електродвигунів, потужність яких при цьому завищувалась в 1,5–2 рази. В результаті більшість з них працює із значним недовантаженням від 30 до 70 %, що викликає суттєве зниження ККД ЕП. Вказані процеси також спричиняють значне погіршення коефіцієнту потужнос-

ті ЕП, що призводить до перевантаження живильних ліній електромереж реактивною потужністю. Крім того існуючі системи ЕПТМ споруджувались в 70–80-х роках ХХ століття і за час експлуатації значна їх частина вичерпала свій ресурс та застаріла морально. На сьогодні, за оцінкою експертів, фізичне зношування турбомашин складає близько 65 %, що призводить до реалізації на них неоптимальних режимів роботи. Тому актуальною постає задача аналізу енергетичних потоків у ЕПТМ, з метою знаходження умов максимальної ефективності їх функціонування.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Для результативного аналізу енергетичних потоків у ЕПТМ, їх необхідно розглядати, як складні технічні об'єкти, що складаються із взаємопов'язаних підсистем різної фізичної природи, а саме: електричної, механічної та гідравлічної (пневматичної). Традиційно складові пристрої ЕПТМ аналізують окремо різними методами, та із єдиного електрогідромеханічного процесу спеціалісти-електрики розглядають електромеханічні [1–3], а спеціалісти-гідравліки — гідромеханічні складові [4–6]. Як наслідок — процес аналізу ефективності перетворення енергії в ЕПТМ стає надто трудомістким.

В роботах [7–12] започатковано розгляд питання комплексного дослідження електроприводних гідромашин. Однак, в даних роботах не приділялась достатня увага аналізу саме енергетичних потоків у різних фізичних підсистемах ЕПТМ засобами обчислювальної техніки, або запропоновані моделі були надто примітивними і не враховували важливі фізичні процеси, які присутні в ЕПТМ. Відомо, що для дослідження енергоефективних режимів роботи та прогнозування аварійних ситуацій, як правило, використовують математичне та комп'ютерно-орієнтоване моделювання, оскільки проведення експериментальних досліджень не завжди є можливим.

3. Об'єкт, ціль та задачі дослідження

Об'єкт дослідження — сукупність динамічних процесів, які виникають в електроприводних турбомашинах електротехнічних комплексів промислових підприємств.

Мета дослідження — розроблення ефективних комп'ютерно-орієнтованих моделей електроприводних турбомашин 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.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- проаналізувати сучасні методи комп'ютерно-орієнтованого моделювання складних технічних об'єктів, які дають можливість враховувати взаємовплив підсистем різної фізичної природи на режими їх роботи;
- обґрунтувати доцільність впровадження міждисциплінарного методу моделювання Bond Graph для дослідження рівня ефективності функціонування ЕПТМ в усіх галузях промисловості;
- розробити ефективні комп'ютерно-орієнтовані Bond Graph моделі ЕПТМ для дослідження взаємопов'яза-

них процесів перетоку енергії між різними фізичними областями об'єкту, з метою знаходження умов (системних властивостей) максимальної ефективності його функціонування.

4. Методи дослідження та моделі

4.1. Обґрунтування доцільності впровадження між-дисциплінарного методу моделювання Bond Graph. Існує багато традиційних методів математичного моделювання динамічної поведінки об'єктів, які є адаптованими тільки для підсистеми однієї фізичної природи (електричної, механічної, гідравлічної тощо). 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 знаходження умов максимальної ефективності функціонування ЕПТМ та для оптимального синтезу диференціальних рівнянь стану таких систем необхідна могутня міждисциплінарна методологія та інструменти програмного забезпечення, які охоплюють всі складні енергетичні процеси і математичні моделі підсистем різної фізичної природи. Здійснивши порівняльний аналіз сучасних методів моделювання, встановлено, що для ефективного вирішення поставлених задач досліджень найбільш доцільним є уніфікований метод Bond Graph [13].

Метод моделювання Bond Graph відображає системно-незалежний графічний опис динамічної поведінки систем різної фізичної природи. Він був започаткований професором Пейнтером [14] на початку шістдесятих років ХХ-століття та розроблений його учнями Кернопом і Розенбергом [15]. Bond Graph метод базується на законах збереження енергії та принципах багатопотокового моделювання. В ньому різні фізичні підсистеми (електрична, механічна, гідравлічна тощо) описують аналогічними рівняннями та фізичними поняттями. Об'єкти досліджень зображають у вигляді позначених і напрямлених графів, в яких вершини представляють собою підмоделі, а стріли символізують взаємодію між їхніми енергетичними портами. Такі сполучення називають енергетичними зв'язками (bonds) та зображають суцільною лінією. Енергетичний зв'язок виражає ідеальний потік енергії за одиницю часу між елементами системи у будь-якій фізичній області. Потік виражений добутком двох змінних типу «зусилля» e та «потіку» f , які характеризують миттєве значення потужності:

$$p = \frac{dE}{dt} = e \times f. \quad (1)$$

В основу Bond Graph методу покладено шість узагальнених змінних — зусилля e , потік f , потужність P , момент p , переміщення q і енергія E . Графічний словник методу містить наступні елементи: два типи джерел — зусилля і потоку Se, Sf ; елементи ємності C , інерційності I та опору R ; трансформаторний Tf і гіраторний зв'язок GY ; вузли загального зусилля 0 і потоку 1 . В табл. 1 наведена відповідність узагальнених та спеціалізованих змінних в різних фізичних підсистемах ЕПТМ.

Таблиця 1

Відповідність змінних методу Bond Graph змінним в різних фізичних підсистемах електроприводних турбомашин

Змінні	Підсистеми	Електрична	Механічна (обертowego руху)	Гідравлічна
Зусилля, e		Напруга, U	Обертovий момент, T	Тиск, P_s
Потік, f		Струм, I	Кутова швидкість, ω	Об'ємна витрата, Q
Величина інерції, ρ		Потокозчеплення, ψ	Кінетичний момент, H	Момент тиску, M_p
Величина зміщення, q		Заряд, q_e	Кут переміщення, θ	Об'єм, V

За допомогою встановлених причинно-наслідкових зв'язків даний метод забезпечує можливість комп'ютерного формування системи диференційних рівнянь, перевірку правильності синтезу моделей та у графічній формі подає наглядний опис складних об'єктів. Тому для проведення моделювання необхідно мати програмний пакет, який би підтримував Bond Graph метод та давав змогу генерувати і розв'язувати системи диференціальних рівнянь та 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.

4.2. Розроблення ефективних комп'ютерно-орієнтованих Bond Graph моделей ЕПТМ. Розглянемо ЕПТМ, яка складається з асинхронного двигуна (АД) з короткозамкненим (КЗ) ротором, відцентрового насоса (ВН) та запірної арматури. Згідно концепцій системного підходу розроблено структуру Bond Graph моделі ЕПТМ (рис. 1) у вигляді енергетично сполучених підмоделей різної фізичної природи. До електричної підсистеми входять електромережа та електрична частина АД з КЗ ротором, до механічної відповідно з'єднання між валами АД і ВН, а до гідравлічної – гідравлічна частина ВН та гідромережа.

Шляхом порівняльного критичного аналізу існуючих світових розробок в області Bond Graph моделювання електричних двигунів в [16] синтезовано модель АД з КЗ ротором. Математичний опис Bond Graph моделі АД базується на відомих законах узагальненої теорії електричних машин. Модель містить трифазну обмотку статора, підключену до симетричного джерела напруги. Для спрощення розрахунків у моделі застосовано перехід від трифазної системи координат A, B, C до двофазної α, β . Рівняння рівноваги ЕРС в обмотках статора

і ротора АД 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 $u_{\alpha}^s, u_{\beta}^s$ – α, β складові напруг обмоток статора; $i_{\alpha}^s, i_{\beta}^s, i_{\alpha}^r, i_{\beta}^r$ – α, β 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:

$$\begin{bmatrix} \psi_{\alpha}^s \\ \psi_{\alpha}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\alpha}^s & M \\ M & L_{\alpha}^r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{\alpha}^s \\ i_{\alpha}^r \end{bmatrix},$$

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

де $\psi_{\alpha}^s, \psi_{\beta}^s, \psi_{\alpha}^r, \psi_{\beta}^r$ – α, β складові потокозчеплення відповідно обмоток статора і ротора.

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

$$M_E = \frac{p}{2} \left[i_{\alpha}^r (M i_{\beta}^s + L^r i_{\beta}^r) - i_{\beta}^r (M i_{\alpha}^s + L^r i_{\alpha}^r) \right], \quad (4)$$

де p – число пар полюсів двигуна.

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

$$J \frac{d\omega^r}{dt} = M_E - M_C, \quad (5)$$

де J – момент інерції на валу ЕПТМ, M_E – електромагнітний момент двигуна; M_C – момент ВН, приведений до валу двигуна.

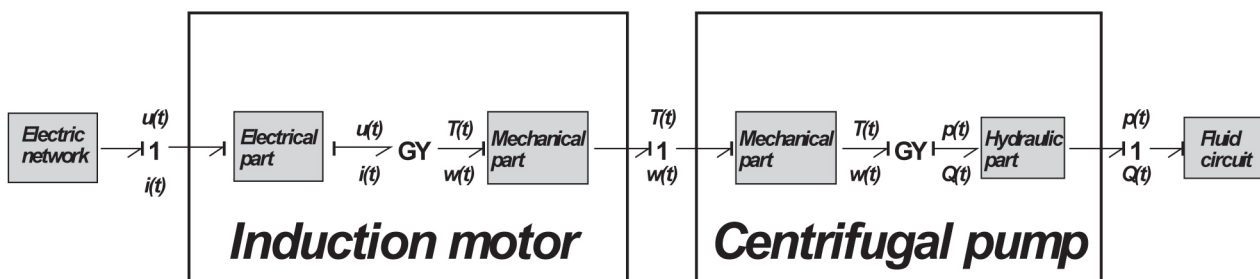


Рис. 1. Структура Bond Graph моделі ЕПТМ

В [17] розроблена Bond Graph модель ВН, до складу якої входять потококорисна сила $\rho g H_0$ — характеризує напір на виході робочого колеса у режимі закритої засувки, та набір активних R й інерційних X опорів. Активні опори R відображають незворотні втрати енергії в довілля у вигляді тепла за рахунок сил в'язкісного тертя між шарами рідини та рідиною і стінками каналу. Інерційні (гідроіндуктивні) опори спричинюються силами інерції, що протидіють зміні витрати ВН:

$$R = 2\rho\vartheta \sum_{j=1}^K \frac{\chi_j^2}{S_j^3} I_j, \quad X = \omega_{imp} L^{hydr} = \omega_{imp} \sum_{j=1}^K \frac{\rho I_j}{S_j}, \quad (6)$$

де ρ — питома густина рідини; ϑ — коефіцієнт кінематичної в'язкості; χ_j — змочений периметр j -ї ділянки гідротракту; S_j — поперечний переріз j -ї ділянки гідротракту; L^{hydr} — індуктивність (інертність) гідравлічного тракту ВН; ω_{imp} — кутова частота витрати, значення якої для спіральної частини відводу рівне кутовій частоті обертання робочого колеса.

Гідравлічні процеси, які мають місце у ВН відображені системою диференціальних рівнянь стану насоса:

$$\begin{cases} \rho g H_E = L_{mHQ} \frac{dQ_T}{dt} + L_{dQ} \frac{dQ_{vol}}{dt} + Q_{vol} R_{dQ} + Q_{mech} R_{mech}, \\ \rho g H_E = L_{mHQ} \frac{dQ_T}{dt} + L_{dH} \frac{dQ_{hydr}}{dt} + Q_{hydr} R_{dH} + Q_{hydr} R_{hydr}, \\ Q_T - Q_{mech} - Q_{vol} - Q_{hydr} = 0; \end{cases} \quad (7)$$

де H_E , Q_E — відповідно значення напору та об'ємної витрати рідини ейлерівського ВН; Q_T , Q_{hydr} , Q_{vol} — відповідно витрати на виході колеса, дифузору та у вітці зворотного зв'язку (об'ємні втрати рідини); ρ — густина рідини; g — прискорення вільного падіння; L_{mHQ} — гідроіндуктивність, яка відображає вплив скінченної кількості лопатей ВН; R_{dH} , L_{dH} ; R_{dQ} , L_{dQ} — активний опір та гідроіндуктивність відповідно віток гідравлічних та об'ємних втрат; R_{hydr} — зовнішній гідравлічний опір напірного тракту гідромережі.

4.3. Встановлення енергетичного взаємозв'язку між моделями двигуна і насоса в структурі ЕПТМ. Для проведення дослідження єдиного електрогідромеханічного процесу ЕПТМ комплексним методом встановлено енергетичний зв'язок між Bond Graph моделями АД і ВН згідно балансу механічної і гідравлічної потужностей.

$$M_c \omega_{imp} = \rho g H_E Q_E. \quad (8)$$

У ВН вплив зовнішніх сил на потік робочої рідини відбувається через лопаті робочого колеса. Таку взаємодію відображають через рівняння моментів кількості руху:

$$M_c = \frac{\rho}{g} Q_E (c_{u2} R_2 - c_{u1} R_1), \quad (9)$$

де c_{u2} , c_{u1} — відповідно середнє значення проєкцій абсолютних швидкостей на кутові швидкості відповідно

на виході і вході лопаті колеса. R_2 , R_1 — зовнішній та внутрішній радіуси робочого колеса.

Перемноживши обидві частини рівняння (9) на кутову швидкість обертання робочого колеса, отримують в значення механічної потужності, затраченої на передавання енергії рідині:

$$M_c \omega_{imp} = \frac{\rho}{g} Q_E (c_{u2} R_2 \omega_{imp} - c_{u1} R_1 \omega_{imp}). \quad (10)$$

Енергетичний зв'язок (10) реалізуємо в Bond Graph моделі ЕПТМ за допомогою гіраторного GY зв'язку із наступними конструктивними рівняннями:

$$\begin{cases} e_1(t) = r f_2(t), \\ e_2(t) = r f_1(t). \end{cases}$$

або

$$\begin{cases} M_c(t) = r Q_E(t), \\ p(t) = r \omega_{imp}(t). \end{cases} \quad (11)$$

де r — коефіцієнт гірації.

Причинно-наслідковий зв'язок GY елемента встановлює перехресні зв'язки між енергетичними змінними стану двигуна і насоса, тобто змінна кутової швидкості обертання вала агрегату $\omega_{imp}(t)$ утворює гідравлічний тиск в насосі $p(t)$, а відповідно об'ємний розхід рідини $Q_E(t)$ формує навантаження двигуна — момент $M_c(t)$. Отже, коефіцієнт гірації повинен мати однакову величину і розмірність, тобто необхідно щоб справджувалось співвідношення:

$$r = \frac{M_c(t)}{Q_E(t)} = \frac{p(t)}{\omega_{imp}(t)} = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{М}^2} \right]. \quad (12)$$

Рівняння Ейлера для ВН встановлює залежність між гідравлічним тиском $p(t)$ та кутовою швидкістю $\omega_{imp}(t)$, з врахуванням геометричних розмірів робочого колеса:

$$\rho g H_E(t) = \rho \omega_{imp}(t) \left(\omega_{imp}(t) (R_2^2 - R_1^2) - \frac{Q(t)}{2\pi} \left(\frac{\text{ctg} \beta_2}{b_2} - \frac{\text{ctg} \beta_1}{b_1} \right) \right), \quad (13)$$

де $H_E(t)$ — напір рідини, який розвиває ВН, b_2 , b_1 ; β_2 , β_1 — відповідно ширина і кут нахилу лопаті на виході та вході робочого колеса ВН.

Відповідно до рівняння (13) коефіцієнт гірації буде рівним:

$$r = \rho \left(\omega_{imp}(t) (R_2^2 - R_1^2) - \frac{Q(t)}{2\pi} \left(\frac{\text{ctg} \beta_2}{b_2} - \frac{\text{ctg} \beta_1}{b_1} \right) \right). \quad (14)$$

У вираз розрахунку коефіцієнта гірації входять дві змінні $\omega_{imp}(t)$, $Q_{imp}(t)$, які залежать від режиму роботи агрегату, тобто коефіцієнт гірації змінний, тому для зв'язку між моделями двигуна і насоса використаний модульований гіратор MGY .

5. Результати досліджень енергетичних потоків в системах різної фізичної природи електроприводних турбомашин

Таблиця 2

Порівняння одержаних результатів імітаційного моделювання ЕПТМ з результатами знятими експериментально

Агрегат НПС «Плещівка» NGK 500/450/100 з приводом асинхронного двигуна 4АЗМВ-2500/6000-У2					
Найменування параметрів, од. вимір.	Пусковий струм статора, I_{st} , А	Усталений струм статора, I_s , А	Кратність пускового струму, k_I	Посадка напруги ΔU , %	Час пуску t , с
Bond Graph модель ЕПТМ	1557,75	178,3	8,73	12,05	2,68
Експеримент	1467,1	186,5	7,87	13,8	2,7
Відносна похибка %	5,81	4,4	9,89	12,7	0,74

Об'єктом дослідження вибрано магістральний насосний агрегат нафтоперекачувальної станції «Плещівка» NGK-500/450/100 із електроприводом 4АЗМВ-2500/6000-У2 філії «Магістральні нафтопроводи «Дружба» ПАТ Укртранснафта. Для даного агрегату розраховано параметри Bond Graph моделі та проведено дослідження динамічних режимів його роботи.

Одержані результати імітаційного моделювання насосного агрегату під час пуску його на частково відкриту засувку порівнювались з аналогічними результатами знятими експериментально (рис. 2). Експериментальні пускові характеристики записувались за допомогою цифрового осцилографа типу ТЕКТРОНІХ ТЕКСКОPE THS720. Відносна похибка одержаних результатів не перевищувала 5 % для стаціонарних і 15 % для перехідних режимів роботи насосного агрегату (табл. 2).

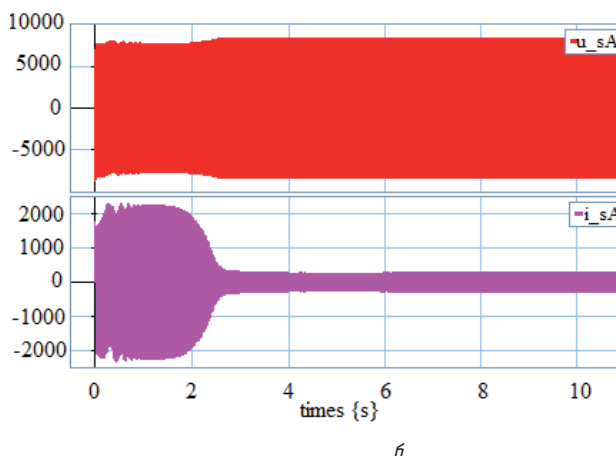
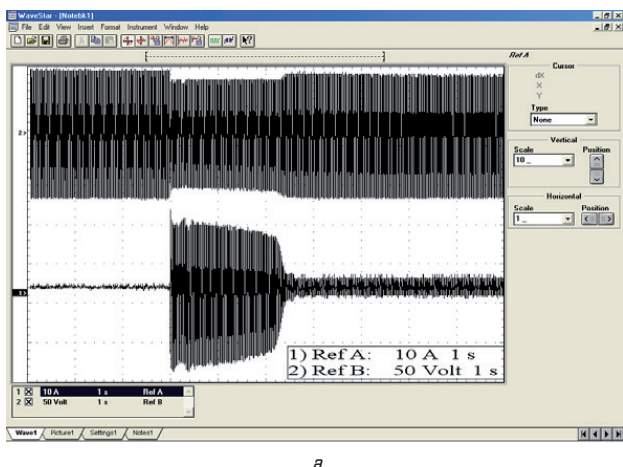


Рис. 2. Порівняння результатів моделювання ЕПТМ з експериментальними кривими: а — експериментальні дані зняті за допомогою промислового осцилографа ТЕКТРОНІХ ТЕКСКОPE THS720; б — результати моделювання за допомогою Bond Graph моделі ЕПТМ

Оскільки Bond Graph модель ЕПТМ відображає миттєву потужність на кожному bond-зв'язку, то аналізування енергетичних потоків не викликає значних труднощів. На будь-якому R елементі відображено втрати енергії в кожній підсистемі машини, а на I елементі відповідно енергоперетворення.

Для аналізу енергетичних потоків між підсистемами різної фізичної природи ЕПТМ у контрольних точках моделі встановлені давачі миттєвих значень потужності. Зокрема в електричній підсистемі давач встановлений в одну із фаз статора двигуна та розрахунок проводиться за наступною формулою:

$$p_{el} = 3 \cdot u_{sa}(t) \cdot i_{sa}(t), \quad (15)$$

де $u_{sa}(t)$, $i_{sa}(t)$ — відповідно миттєві значення напруги та струму на загискачах однієї фази статорної обмотки двигуна; t — час пуску.

В механічній підсистемі давач встановлено на валу гідромашини, а в у гідравлічній підсистемі — на напірному патрубку відцентрового насоса. Миттєві потужності розраховуються відповідно до рівняння балансу (8). Графічні залежності миттєвих потужностей у підсистемах різної фізичної природи ЕПТМ за умови запуску її на відкриту засувку зображено на рис. 3.

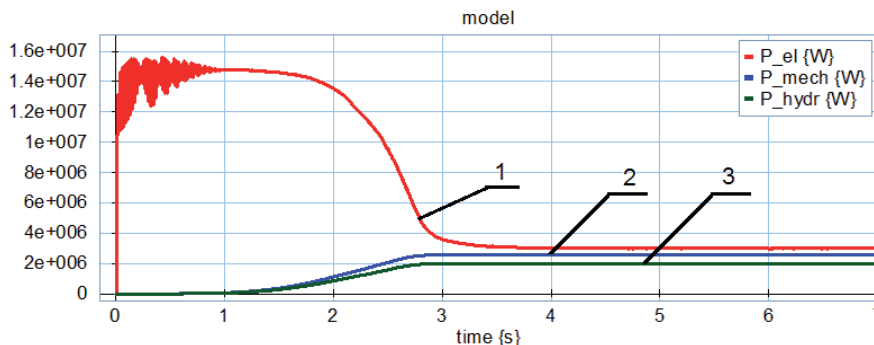


Рис. 3. Графічні залежності миттєвих потужностей у підсистемах різної фізичної природи ЕПТМ: 1 — підведена електрична потужність до двигуна; 2 — механічна потужність на валу; 3 — гідравлічна потужність на напірному патрубку насоса

6. Обговорення результатів дослідження електрогідромеханічного процесу роботи турбомашини

Застосування методу Bond Graph дає змогу враховувати взаємовплив електромагнітних, механічних і гідравлічних процесів на режими роботи ЕПТМ. В результаті проведених досліджень отримано числову множину та графічні залежності миттєвих значень потужності електродвигуна, механічної потужності на валу гідромашини та гідравлічної потужності на напірному патрубку насоса. Спираючись на отримані результати проаналізовано ефективність перетворення енергії у кожній фізичній області турбомашини. Оскільки в моделі використовують миттєві значення потужностей, то за допомогою стандартних алгоритмів доцільно переходити до середніх значень за період і за час перехідного процесу. Середні значення активної і реактивної потужності дають змогу під час вирішення практичних задач використовувати поняття ККД і $\cos\phi$ в динамічних режимах роботи. В подальшому це дасть можливість розробляти і впроваджувати заходи з енергозбереження в електротехнічних комплексах промислових підприємств.

7. Висновки

В результаті проведених досліджень:

Запропоновано спосіб аналізу енергетичних потоків в системах різної фізичної природи електроприводних турбомашин.

Встановлено енергетичний зв'язок між Bond Graph моделями асинхронного двигуна і відцентрового насоса з метою проведення дослідження єдиного електрогідромеханічного процесу комплексним методом.

Отримано графічні залежності миттєвих значень потужності електродвигуна, механічної потужності на валу гідромашини та гідравлічної потужності на напірному патрубку насоса.

Проаналізовано ефективність перетворення енергії у кожній фізичній області турбомашини.

Література

- Мехович, С. А. Электропривод как энергосберегающий фактор в промышленности и ЖКХ Украины [Текст] / С. А. Мехович, В. А. Барский, А. С. Бешта, Н. В. Горбачев, М. В. Загирняк, В. Б. Клепиков, О. Ю. Лозинский, А. В. Пересада, А. В. Садовой, О. И. Толочко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. — 2013. — № 9(115). — С. 2–11.
- Мехович, С. А. Экономический, энергоресурсосберегающий и экологический аспекты экономии электроэнергии в Украине [Текст] / С. А. Мехович, В. Б. Клепиков, С. В. Клепикова // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. — 2010. — № 12(82). — С. 43–47.
- Клепиков, В. Б. О роли электропривода в решении проблемы энергоресурсосбережения в Украине [Текст] / В. Б. Клепиков, В. Ю. Розов // Вестник НТУ «ХПИ». Серия «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». — 2010. — № 28. — С. 18–21.
- Костишин, В. С. Оптимізація режимів роботи нафтоперекачувальних станцій за критерієм мінімального електроспоживання [Текст] / В. С. Костишин, І. І. Сорохтей // Вісник КДУ імені Михайла Остроградського. — 2010. — № 3(62). — С. 15–17.
- Мамедов, А. И. Упрощенный численный метод расчета переходных процессов в магистральном нефтепроводе при пуске насосного агрегата на режим [Электронный ресурс] / А. И. Мамедов, Э. Я. Алиев // Проблемы энергетики. — 2007. — № 2. — 7 с. — Режим доступа: [www/URL: http://www.elm.az/physics/PowerEng/2007/v2article/art21.pdf](http://www.elm.az/physics/PowerEng/2007/v2article/art21.pdf)
- Сулейманов, Р. Н. Эффективность работы насосных агрегатов [Текст] / Р. Н. Сулейманов, А. С. Галеев, Г. И. Бикбулатова. — Уфа: УГНТУ, 2004. — 100 с.
- Бур'ян, С. О. Дослідження моделі відцентрового насоса у пакеті SIMHYDRAULICS [Електронний ресурс] / С. О. Бур'ян, С. В. Ульянченко, О. В. Кононський. — Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 2010. — Режим доступу: www/URL: http://so-buryan.edu.kpi.ua/attachments/stud_2010_1.pdf
- Коренькова, Т. В. Методология энергоресурсосбережения в электрогидравлических комплексах [Текст] / Т. В. Коренькова // Электротехнические и компьютерные системы. — 2014. — № 15(91). — С. 114–120.
- Ratliff, R. Modeling of vertical centrifugal pumps for failure analysis and redesign [Text]: Thesis Master of Science in Engineering / Ryan Ratliff. — Austin: The University of Texas at Austin, 1993. — 158 p.
- Choi, J. Model based diagnostics of motor and pumps [Text]: The Dissertation Doctor of Philosophy / Ji-Hoon Choi. — Austin: The University of Texas at Austin, 2006. — 90 p.
- Mosterman, P. Hybrid Dynamic Systems: a Hybrid Bond Graph Modeling Paradigm and its Application in Diagnosis [Text]: The Dissertation Doctor of Philosophy / Pieter J. Mosterman. — Nashville: The University of Vanderbilt, 1997. — 233 p.
- Mezghanni, D. Linearizing control of a photovoltaic structure and stability by Lyapunov directly on Bond Graph [Electronic resource] / D. Mezghanni, M. Ellouze, I. Cabani, A. Mami // Journal of Electrical Systems. — 2007. — Vol. 3. — P. 189–203. — Available at: [www/URL: http://journal.esrgroups.org/jes/papers/3_4_1.pdf](http://journal.esrgroups.org/jes/papers/3_4_1.pdf)
- Костишин, В. Створення комп'ютерно-орієнтованих моделей електроприводних агрегатів нафтогазової промисловості [Текст] / В. Костишин, П. Курляк // Нафтогазова енергетика. — 2007. — № 1(2). — С. 50–56.
- Paynter, H. M. Analysis and Design of Engineering Systems [Text] / H. M. Paynter. — Cambridge, MA.: M.I.T. Press, 1961. — 268 p.
- Rosenberg, R. C. Introduction to physical system dynamics [Text] / R. C. Rosenberg, D. C. Karnopp. — New York, NY: McGraw Hill, 1983. — 176 p.
- Костишин, В. Bond Graph модель асинхронного двигуна з врахуванням насичення магнітопроводу та ефекту витіснення струму в роторі [Текст] / В. Костишин, П. Курляк // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. — 2011. — № 4(30). — С. 32–37.
- Костишин, В. Bond Graph модель магістральних відцентрових насосів нафтоперекачувальних станцій [Текст] / В. Костишин, П. Курляк // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. — 2007. — № 1(22). — С. 56–63.

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ В СИСТЕМАХ РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ ТУРБОМАШИН

Предложен способ анализа энергетических потоков в системах различной физической природы электроприводных турбомашин. Для проведения исследования единого электрогидромеханического процесса комплексным методом установлена энергетическая связь между Bond Graph моделями асинхронного двигателя и центробежного насоса. Проанализирована эффективность преобразования энергии в каждой физической области турбомашини и разработаны рекомендации по эффективному использованию энергоресурсов.

Ключевые слова: Bond Graph, энергетика, асинхронный двигатель, центробежный насос, турбомашини, мгновенные мощности.

Курляк Петро Омелянович, кандидат технічних наук, кафедра електропостачання та електрообладнання промислових підприємств, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна, e-mail: pkurlyak@gmail.com.

Курляк Петр Емельянович, кандидат технических наук, кафедра электроснабжения и электрооборудования промышленных предприятий, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина.

Kurlyak Peter, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine, e-mail: pkurlyak@gmail.com