

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МАГІСТРАЛЬНИХ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ НАФТОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ СТАНЦІЙ

П.О. Курляк

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727172,  
e-mail: p.kurlyak@gmail.com

Сучасні дослідження електроприводних магістральних насосних агрегатів є комплексним завданням значної технічної складності, оскільки їх функціонування характеризується протіканням взаємозв'язаних електромагнітних, механічних і гідравлічних процесів. Швидкий розвиток цифрових обчислювальних машин сприяв розробці нових методів математичного моделювання і розрахунку стаціонарних та перехідних режимів роботи електротехнічних систем. Це дало змогу по-новому підійти до багатьох питань проектування та експлуатації різного роду об'єктів. Одним із таких методів моделювання є уніфікований комп'ютерно-орієнтований метод Bond Graph.

Основна ідея статті полягає у застосуванні швидко прогресуючого методу Bond Graph для проведення комп'ютерного експрес-аналізу енергетичних процесів у електроприводних магістральних насосних агрегатах. Автором розроблено графо-енергетичну Bond Graph модель електроприводного відцентрового насосного агрегату, яка складається з асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, відцентрового насосу та запірної арматури. Запропонована модель відрізняється від існуючих аналогів здатністю відображати у графічній формі перетоки енергії між конструктивними елементами реального агрегату, враховувати ефекти насичення магнітопроводу і витіснення струму в роторі двигуна та в'язкість рідини в насосі.

Об'єктом дослідження вибрано магістральний насосний агрегат нафтоперекачувальної станції «Плецівка» NGK-500/450/100 із електроприводом 4АЗМВ-2500/6000-У2 філії «Магістральні нафтопроводи «Дружба» ПАТ Укртранснафта. Досліджено енергетичні параметри даного агрегату за умови пуску на повністю відкриту напірну засувку. Отримано графічні залежності споживаної електроенергії за час пуску, миттєві значення активної і реактивної потужностей електродвигуна, механічної потужності на його валу та гідравлічної потужності на напірному патрубку насоса. Проведені дослідження енергетичних параметрів динамічних режимів роботи магістральних насосних агрегатів дають змогу аналізувати ефективність перетворення енергії у кожній фізичній області (електричній, механічній та гідравлічній), що в подальшому дозволить розробити та реалізувати енергоефективні режими їх функціонування.

Ключові слова: Bond Graph, енергетика, ефективність, насосний агрегат, нафтоперекачувальна станція.

Современные исследования электроприводных магистральных насосных агрегатов являются комплексной задачей значительной технической сложности, поскольку их функционирование характеризуется протеканием взаимосвязанных электромагнитных, механических и гидравлических процессов. Быстрое развитие цифровых вычислительных машин способствовало разработке новых методов математического моделирования и расчета стационарных и переходных режимов работы электротехнических систем. Это позволило по-новому подойти ко многим вопросам проектирования и эксплуатации различного рода объектов. Одним из таких методов моделирования является унифицированный компьютерно-ориентированный метод Bond Graph.

Основная идея статьи заключается в применении быстро прогрессирующего метода Bond Graph для проведения компьютерного экспрес-анализа энергетических процессов в электроприводных магистральных насосных агрегатах. Автором разработана графо-энергетическая Bond Graph модель электроприводного центробежного насосного агрегата, которая состоит из асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, центробежного насоса и запорной арматуры. Предложенная модель отличается от существующих аналогов способностью отображать в графической форме потоки энергии между конструктивными элементами реального агрегата, учитывать эффекты насыщения магнітопроводу и вытеснения тока в роторе двигателя, а также вязкость жидкости в насосе.

Объектом исследования выбран магистральный насосный агрегат нефтеперекачивающей станции «Плецевка» NGK-500/450/100 с электроприводом 4АЗМВ-2500/6000-У2 филиала «Магистральные нефтепроводы «Дружба» ПАО Укртранснафта. Исследованы энергетические параметры данного агрегата при пуске на полностью открытую напорную задвижку. Получены графические зависимости потребляемой электроэнергии при пуске, мгновенные значения активной и реактивной мощностей электродвигателя, механической мощности на его валу и гидравлической мощности на напорном патрубке насоса. Проведенные исследования энергетических параметров динамических режимов работы магистральных насосных агрегатов позволяют анализировать эффективность преобразования энергии в каждой физической области (электрической, механической и гидравлической), что в дальнейшем позволит разработать и реализовать энергоэффективные режимы их функционирования.

Ключевые слова: Bond Graph, энергетика, эффективность, насосный агрегат, нефтеперекачивающая станция.

Modern studies of the electrically driven main pumping units are considered to be a complex technical issue because their operation is characterized by running of interconnected electromagnetic, mechanical, and hydraulic processes. Rapid development of digital computers contributed to the development of new methods for mathematical modeling and calculating of stationary and transient operation modes of electrical engineering systems. This

allowed us to redefine a new approach to many design and operation issues of various objects. One of such modeling methods is a unified computer-based method of Bond Graph.

The main idea of the article consists in utilization of rapidly progressing Bond Graph method for conducting computer express analysis of energy processes in the electrically driven main pumping units. The author developed a graphical energy Bond Graph model of the electrically driven centrifugal pumping unit, which consists of an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor, centrifugal pump, and valves. The proposed model differs from the existing analogues by the ability to display energy overflows between the structural elements of the real unit in a graphical form and take into account the effects of magnetic saturation and current displacement in an engine rotor, as well as the fluid viscosity in a pump.

The main pumping unit of the oil pumping station "Pleshchivka" NGK-500/450/100 with an electric drive 4AZMV-2500/6000-U2 of the PJSC Ukrtransnafta Branch "Main Oil Pipelines "Druzhba" was chosen as a study object. The studies of the unit energy parameters during starting-up when the block valve is fully opened were carried out. Graphical dependencies of consumed electricity, instantaneous active and reactive power values of the electric motor, mechanical power on its shaft, and hydraulic power on the ascending nipple were obtained during starting-up procedure. The conducted studies of energy parameters of the main pumping units dynamic operation modes allow to analyze the efficiency of energy conversion in each individual area (electrical, mechanical, and hydraulic), which will further provide a possibility to elaborate and realize energy-efficient modes of their operation.

Keywords: Bond Graph, energy, efficiency, pumping unit, oil pumping station.

**Вступ.** Трубопровідний транспорт – це найбільш економічний вид транспортування нафти, рідкого палива, пального і технологічного газу. Електроприводні магістральні насосні агрегати (ЕМНА) є основним технологічним обладнанням нафтоперекачувальних станцій. Масовість, велика потужність та довготривалий режим роботи ЕМНА визначають їх значну питому вагу в енергетичному балансі країни, тому неоптимальні режими функціонування гідромашин призводять до значних енергетичних втрат. Ефективність роботи ЕМНА значною мірою залежить від рівня забезпечення електромеханічного та гідравлічного режимів, тобто від раціонального узгодження характеристик усіх складових підсистем ЕМНА, а саме: електроприводних двигунів – насосів та насосів і гідравлічної мережі. У зв'язку з цим особливо актуальною є задача визначення енергетичних параметрів функціонування ЕМНА в технологічному процесі нафтоперекачувальних станцій.

**Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій.** Сучасні дослідження ЕМНА є комплексним завданням значної технічної складності, оскільки їх функціонування характеризується протіканням взаємозв'язаних електромагнітних, механічних і гідравлічних процесів. Аналіз літературних джерел свідчить [1–11], що специфічна належність даної області досліджень до стику наук – електроенергетики і гідромеханіки – визначила той факт, що із єдиного електрогідромеханічного процесу спеціалісти-електрики виділяють для розгляду електромеханічні, а спеціалісти-гідравліки гідромеханічні складові. Так, дослідженням енергоефективних режимів роботи електроприводів присвячено публікації Чермалиха В.М., Закладного О.М. [1]; Чорного О.П., Родькіна Д.І. [2,3]; Бурбелі М.Й. [4]; Браславського І.Я. [5]; Ільїнського Н.Ф. [6]; Фіраго Б. І. [7] та ін. Проблемам експлуатації та ефективної роботи насосних агрегатів присвячені роботи Гумерова А.Г. [8], Сулейманова Р.Н. [9], Кутукова С.Е. [10], Мамедова А.И. [11] та ін.

В роботах Грабка В.В. [12], Бур'яна С.О. [13], Раяна Ратліффа [14], Джі-Хун Чоя [15], Пітера Мостермана [16], Дафера Мезганні [17]

та ін. висвітлюються питання комплексного дослідження електроприводних насосних агрегатів, однак, не приділялась увага аналізу саме енергетичних параметрів ЕМНА як складних технічних об'єктів з єдиними електрогідромеханічними режимами роботи. Отже, для реалізації енергоефективних режимів роботи ЕМНА та для швидкого відновлення післяаварійних ситуацій необхідно вміти правильно проводити аналізування, прогнозування та керування процесами, які виникають при малих та великих збуреннях. Для дослідження таких режимів роботи, як правило, використовують математичне та комп'ютерно-орієнтоване моделювання, оскільки проведення експериментальних досліджень є не завжди можливим.

**Завдання досліджень.** Визначення енергетичних параметрів магістральних насосних агрегатів нафтоперекачувальних станцій з врахуванням взаємозв'язаних електромагнітних, механічних і гідравлічних процесів, що мають місце в складних технічних об'єктах різної фізичної природи.

**Виклад основного матеріалу.** Швидкий розвиток комп'ютерних наук сприяв розробленню нових методів математичного моделювання і розрахунку стаціонарних та перехідних режимів роботи електротехнічних та енергетичних систем. Це дало змогу по-новому підійти до багатьох питань проектування та експлуатації різного роду об'єктів. Одним із таких методів є уніфікований комп'ютерно-орієнтований метод моделювання Bond Graph, запропонований Пейнтером [18] та розроблений його учнями Кернопом і Розенбергом [19].

Основна ідея статті полягає у застосуванні швидко прогресуючого методу Bond Graph для проведення комп'ютерного експрес-аналізу енергетичних процесів у ЕМНА. Метод моделювання Bond Graph дає змогу досліджувати режими роботи складних технічних об'єктів різної фізичної природи, використовуючи єдину систему понять та позначень. Він оперує з уніфікованими поняттями енергопереносу і енергоперетворення у мультидоменних системах, 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. За допомогою встановлених причинно-наслідкових зв'язків метод Bond Graph забезпечує можливість формування системних рівнянь, перевірку правильності синтезу моделей, та у графічній формі подає наглядний опис мультидоменних систем. На відміну від інших методів, застосування Bond Graph забезпечує візуалізацію не тільки сигнальних, але й енергетичних потоків.

Мультидоменні системи відображають методом Bond Graph у вигляді позначених і спрямованих графів, в яких вершини є підмоделями, а стрілки вказують на взаємодію між їхніми енергетичними портами. Такі сполучення називають енергетичними зв'язками (bonds) та зображають суцільною лінією. Енергетичний зв'язок виражає ідеальний потік енергії між двома сполученими підмоделями. Він представлений двостороннім сигнальним потоком енергетично-спряжених змінних зусиль  $e$  (effort) та потоку  $f$  (flow). Під енергетичним портом розуміють контактну точку підмоделі, яку з'єднують ідеальним зв'язком. Позитивний напрям потоку енергії між елементами системи та причинно-наслідковий зв'язок між енергетично-спряженими змінними позначають відповідно половиною стрілки та перпендикулярним штрихом на кінці зв'язку.

В основу Bond Graph методу покладено шість фундаментальних фізичних понять – зусилля  $e$ , потік  $f$ , потужність  $P$ , момент  $p$ , переміщення  $q$  і енергія  $E$ . Графічний словник методу містить наступні елементи: два типи узагальнених джерел – зусилля і потоку  $Se$ ,  $Sf$ ; ємність  $C$ , інерційність  $I$  та опір  $R$ ; трансформатор  $TF$  і гіратор  $GY$ ; вузли загального зусилля  $\theta$  і потоку  $I$ . Аналогії для всіх елементів мови Bond Graph існують практично в будь-якій відомій людству фізичній області. Найголовнішим тут те, що спосіб формування рівнянь з Bond Graph моделі є комп'ютерно-генеруючим за рахунок використання специфічних продуктів програмного забезпечення, одним із яких є симулятор 20-sim. Крім того, даний спосіб гарантує представлення рівнянь в явній формі Коші – фактично це означає простоту рішення їх машинним способом.

Розроблено графо-енергетичну Bond Graph модель електроприводного відцентрового насосного агрегату [20], яка складається з асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, відцентрового насоса та запірної арматури (рис. 1). Запропонована модель відрізняється від існуючих аналогів здатністю відображати у графічній формі перетоки енергії між констру-

ктивними елементами реального агрегату, враховувати ефекти насичення магнітопроводу і витіснення струму в роторі двигуна та в'язкість рідини в насосі. Це – позначений і спрямований граф, перетоки енергії між елементами якого позначені стрілками. Такі зв'язки представлені двостороннім потоком енергетично-спряжених змінних зусилля  $e(t)$  і потоку  $f(t)$ . Енергетичні змінні  $e(t)$  і  $f(t)$  знаходять відповідність у кожній із трьох фізичних підсистемах ЕМНА, а саме: в електричній підсистемі змінною зусилля є напруга  $u(t)$ , а змінною потоку – струм  $i(t)$ , відповідно в механічній – крутний момент  $\tau(t)$  і кутова швидкість  $\omega(t)$  ротора машини, а в гідравлічній – тиск  $p(t)$  та об'ємний розхід рідини  $Q(t)$ . 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 за часом від потужності  $P(t)$ .

За допомогою встановлених причинно-наслідкових зв'язків із Bond Graph моделі ЕМНА симулятор 20-sim генерує та розв'язує наступні системи лінійних та диференціальних рівнянь стану насосного агрегату, а саме: диференціальні рівняння рівноваги напруг за другим законом Кірхгофа (1) та рівняння електромагнітного моменту двигуна за законом Ленца (2); механічний та механіко-гідравлічний взаємозв'язки між двигуном і насосом представлені відповідно рівнянням руху насосного агрегату (3), рівнянням балансу механічної і гідравлічної потужностей (4) та рівнянням Ейлера для гідромашин (5); гідравлічні процеси, які мають місце у відцентровому насосі, відображені системою диференціальних рівнянь (6) та лінійними рівняннями запірної арматури (7)

$$\begin{cases} u_{\alpha}^s = R_{\alpha}^s i_{\alpha}^s + L_{\alpha}^s(i_m) \frac{di_{\alpha}^s}{dt} + L_m(i_m) \frac{di_{\alpha}^r}{dt}, \\ u_{\beta}^s = R_{\beta}^s i_{\beta}^s + L_{\beta}^s(i_m) \frac{di_{\beta}^s}{dt} + L_m(i_m) \frac{di_{\beta}^r}{dt}, \\ 0 = R_{\alpha}^r(s) i_{\alpha}^r + L_{\alpha}^r(i_m) \frac{di_{\alpha}^r}{dt} + L_m(i_m) \frac{di_{\alpha}^s}{dt} + \\ + \omega^r (L_{\beta}^r(i_m) i_{\beta}^r + L_m(i_m) i_{\beta}^s), \\ 0 = R_{\beta}^r(s) i_{\beta}^r + L_{\beta}^r(i_m) \frac{di_{\beta}^r}{dt} + L_m(i_m) \frac{di_{\beta}^s}{dt} - \\ - \omega^r (L_{\alpha}^r(i_m) i_{\alpha}^r + L_m(i_m) i_{\alpha}^s); \\ T_e = \frac{p}{2} [i_{\alpha}^r (L_m(i_m) i_{\beta}^s + L^r(i_m) i_{\beta}^r) - \\ - i_{\beta}^r (L_m(i_m) i_{\alpha}^s + L^r(i_m) i_{\alpha}^r)]; \end{cases} \quad (1)$$

$$T_e = J_{\Sigma} \frac{d\omega^r}{dt} + c\omega^r + \tau_m; \quad (3)$$

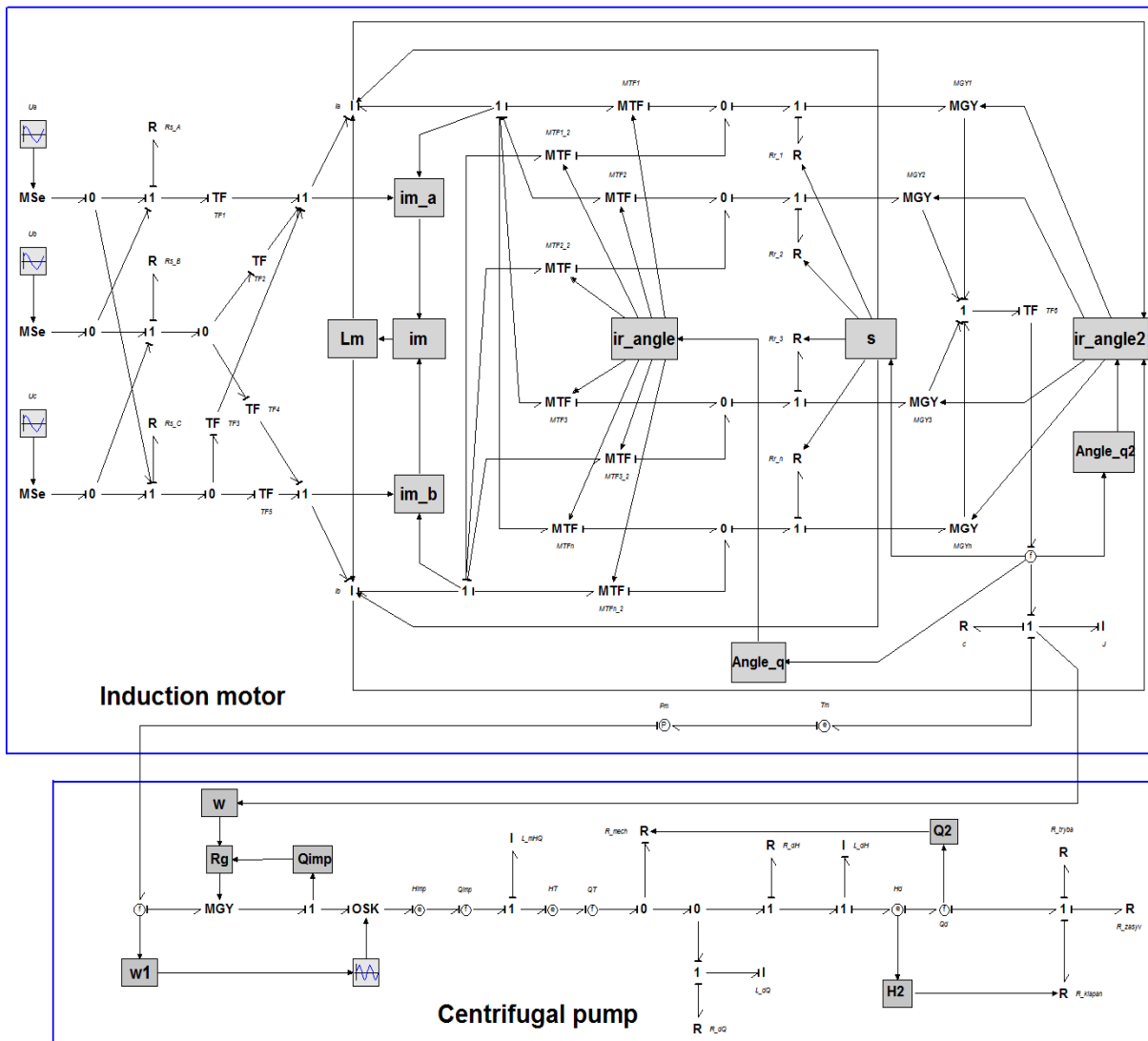


Рисунок 1 – Bond Graph модель електроприводного відцентрового насосного агрегату

$$\rho g H_E Q_E = \tau_m \omega_m; \quad (4)$$

$$\rho g H_E = \rho \omega_m \times$$

$$\times \left( \omega_m (R_2^2 - R_1^2) - \frac{Q_E}{2\pi} \left( \frac{ctg \beta_2}{b_2} - \frac{ctg \beta_1}{b_1} \right) \right); \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \rho g H_E &= L_{mHQ} \frac{dQ_T}{dt} + L_{dQ} \frac{dQ_{vol}}{dt} + \\ &+ Q_{vol} R_{dQ} + Q_{mech} R_{mech}, \\ \rho g H_E &= L_{mHQ} \frac{dQ_T}{dt} + L_{dH} \frac{dQ_{hydr}}{dt} + \\ &+ Q_{hydr} R_{dH} + Q_{hydr} (R_Z + R_{KL} + R_{TR}), \\ Q_T - Q_{mech} - Q_{vol} - Q_{hydr} &= 0; \end{aligned} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{aligned} R_Z &= 0, & R_{TR} &= 1, \\ R_{KL} &= R_0 e^{-\left(\frac{t-t_1}{Ta}\right)}. \end{aligned} \right. \quad (7)$$

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;

$R_\alpha^s, R_\beta^s$  – активні опори обмоток статора;

$R_\alpha^r(s), R_\beta^r(s)$  – активні опори обмоток ротора в залежності від зміни ковзання  $S$ ;

$L_\alpha^s(i_m), L_\beta^s(i_m), L_\alpha^r(i_m), L_\beta^r(i_m), L_m(i_m)$  – відповідно повні індуктивності обмоток статора і ротора та взаємна індуктивність в залежності від зміни струму намагнічування  $i_m$ ;

$\omega^r, \omega_m$  – відповідно кутова швидкість обертання ротора АД і робочого колеса ВН (при жорсткому з'єднанні валів  $\omega_m = \omega^r$ );

$T_e$  – електромагнітний момент двигуна;

$\tau_m$  – механічний момент навантаження на валу агрегату;

$P$  – кількість пар полюсів двигуна;  
 $J_{\Sigma}$  – сумарний обертовий момент інерції насосного агрегату;  
 $C$  – коефіцієнт тертя вала в підшипниках;  
 $H_E, Q_E$  – відповідно значення напору та об'ємної витрати рідини ейлерівського насоса;  
 $Q_T, Q_{hydr}, Q_{vol}$  – відповідно витрати на вході колеса, дифузора та у вітці зворотного зв'язку (об'ємні втрати рідини);  
 $\rho$  – густина рідини;  
 $g$  – прискорення вільного падіння;  
 $L_{mHQ}$  – гідроіндуктивність, яка відображає вплив скінченної кількості лопатей робочого колеса насоса;  
 $R_{dH}, L_{dH}; R_{dQ}, L_{dQ}$  – активний опір та гідроіндуктивність відповідно віток гідравлічних та об'ємних втрат;  
 $R_Z$  – опір напірної засувки;  
 $R_{TR}$  – зовнішній гідравлічний опір трубопровода;  
 $R_{KL}$  – опір зворотного клапану на виході станції;  
 $R_0$  – опір зворотного клапана в закритому стані;  
 $t_1$  – момент часу відкриття зворотного клапана;  
 $T_a$  – стала часу.

Момент інерції ЕМНА визначається як сума моментів інерції всіх елементів, приведених до валу агрегату

$$J_{\Sigma} = J_{AD} + J_{CP} + J_{FL}; \quad (8)$$

де  $J_{AD}$  – момент інерції ротора двигуна;

$J_{CP}$  – момент інерції робочого колеса насоса;

$J_{FL}$  – момент інерції приєднаних мас рідини.

Моменти інерції двигуна  $J_{AD}$  і насоса  $J_{CP}$ , як правило, є каталоговими даними, а момент інерції приєднаних мас рідини розраховують за виразом

$$J_{FL} = \frac{\rho}{g} \int_{\tau} \int_{s} z^2 d\tau ds; \quad (9)$$

де  $z$  – відстань від повздовжньої осі насоса до центра мас елементарного об'єму рідини;

$d\tau, ds$  – відповідно ширина і товщина елементарного кільця рідини.

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. Експериментальні пускові характеристики за допомогою цифрового осцилографа типу *TEKTRONIX TEKSCOPE THS720*. Відносна похибка одержаних результатів не перевищувала 5% для стаціонарних і 15% для перехідних режимів роботи насосного агрегату.

Оскільки розроблена Bond Graph модель ЕМНА відображає миттєву потужність на кожному bond-зв'язку, то визначення енергетичних параметрів динамічних режимів роботи не викликає значних труднощів. На будь-якому  $R$  елементі відображено втрати енергії в кожній підсистемі агрегату, а на  $I$  елементі відповідно енергоперетворення. Це дає можливість проводити аналіз ефективності перетворення енергії у кожній фізичній області та на будь-якому конструктивному елементі ЕМНА.

Так, в електричній підсистемі ЕМНА отримано залежності енергетичних параметрів за час пуску агрегату на відкриту засувку, а саме: залежності споживаної енергії та струму, миттєвих значень активної та реактивної потужностей двигуна. Для аналізу споживаної енергії агрегату (рис. 2) у *Bond Graph* моделі встановлено давач в одну із фаз статора двигуна. Розрахунок проводиться за наступною формулою

$$E = 3 \int_0^t u_{sa}(t) \cdot i_{sa}(t) dt, \quad (10)$$

де  $u_{sa}(t), i_{sa}(t)$  – відповідно миттєві значення напруги та струму на затискачах однієї фази статорної обмотки двигуна;

$t$  – час пуску.

Залежність споживаного струму (рис. 3) отримано на затискачах фази А статорної обмотки двигуна. Аналогічні залежності можна отримати і для інших фаз. Використовуючи графічну залежність електроенергії (рис. 2), одержано інтегральний показник кількості спожитої електроенергії за час запуску агрегату (точка перегину на рис. 2). Значення пускових та усталених струмів (рис. 3) є інформативними параметрами під час налаштування кіл релейного захисту та вибору захисного електрообладнання агрегату.

Глибокий зміст в графічній підмоделі асинхронного двигуна мають добутки напруг і струмів по взаємноортогональних осях  $\alpha\beta$ . Так, враховуючи те, що ротор машини короткозамкнений і  $u_{r\alpha} = 0, u_{r\beta} = 0$  в [21], запропоновано такі співвідношення для визначення миттєвих значень активної (11) та реактивної (12) потужностей електродвигуна

$$P_{el} = u_{s\alpha} \cdot i_{s\alpha} + u_{s\beta} \cdot i_{s\beta}, \quad (11)$$

$$Q_{el} = u_{s\beta} \cdot i_{s\alpha} - u_{s\alpha} \cdot i_{s\beta}, \quad (12)$$

де  $u_{s\alpha}, u_{s\beta}, i_{s\alpha}, i_{s\beta}$  – відповідно  $\alpha, \beta$  складові напруг та струмів в обмотках статора електродвигуна. Графічні залежності активної та реактивної потужностей електродвигуна зображені відповідно на рисунках 4 і 5.

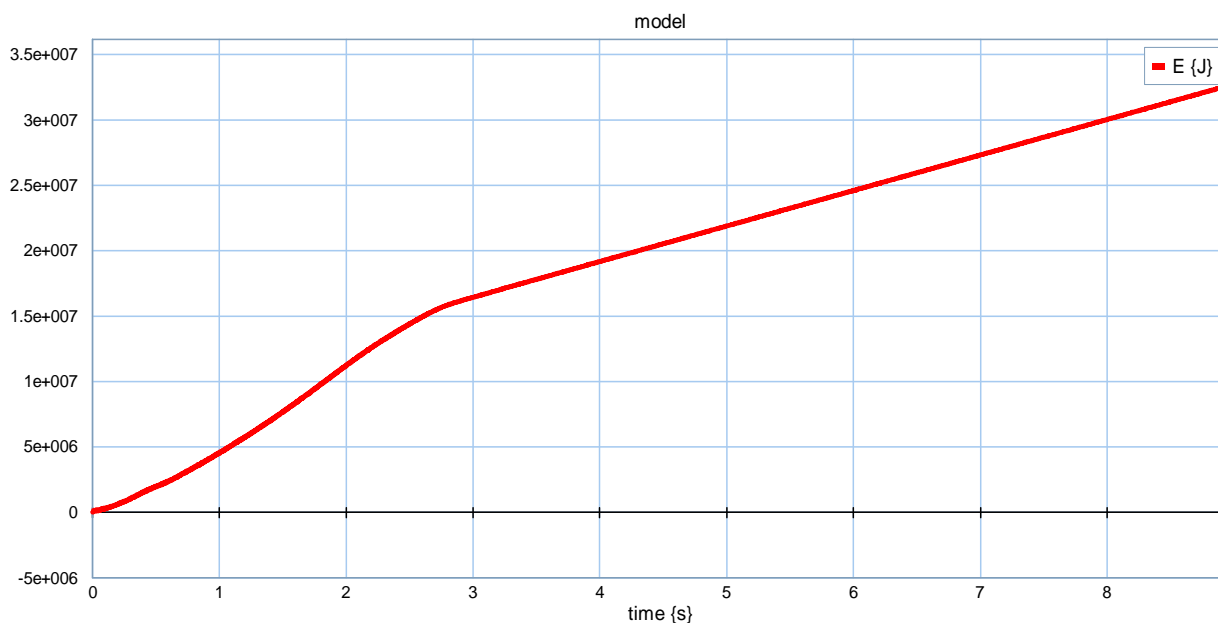


Рисунок 2 – Залежність споживаної електроенергії за час пуску насосного агрегату на відкриту засувку

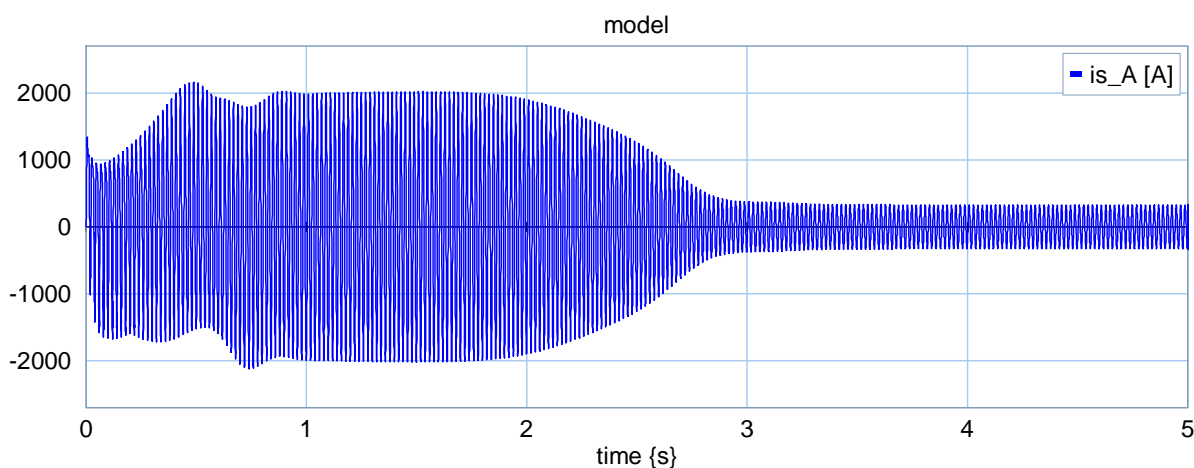


Рисунок 3 – Залежність споживаного струму двигуна за час пуску насосного агрегату на відкриту засувку

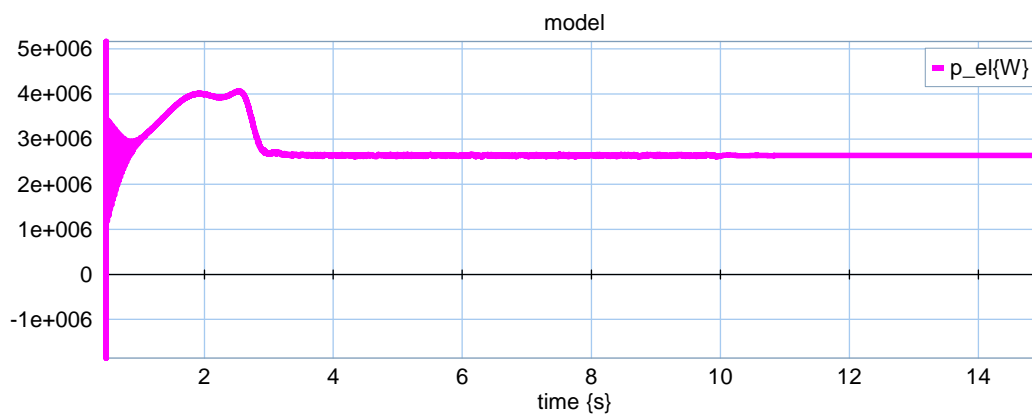


Рисунок 4 – Залежність зміни миттєвої активної потужності електродвигуна ЕМНА

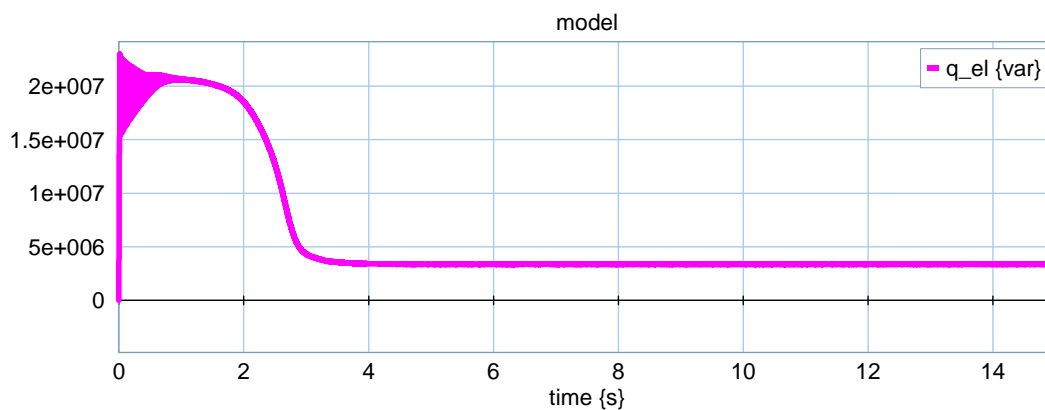


Рисунок 5 – Залежність зміни реактивної потужності електродвигуна ЕМНА

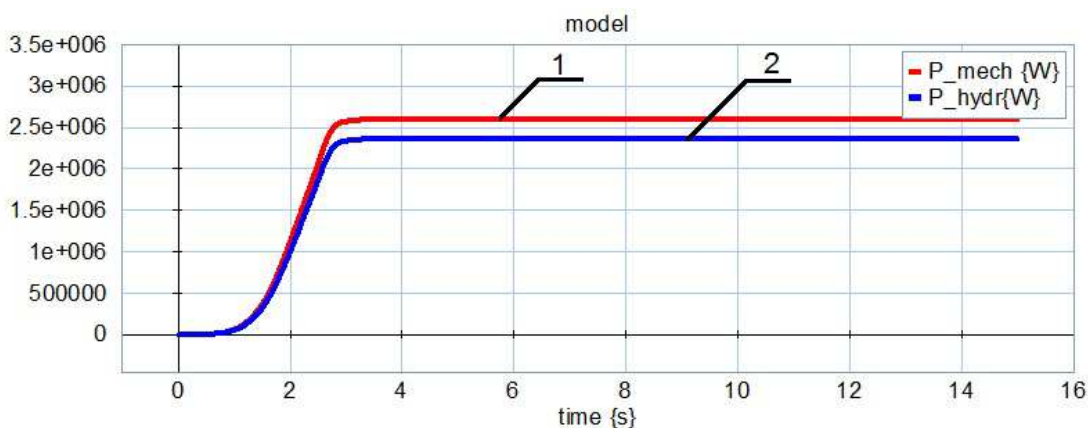


Рисунок 6 – Залежності механічної (1) та гідравлічної (2) потужностей ЕМНА за час пуску на відкриту засувку

В механічній підсистемі ЕМНА оперуємо відповідно з миттєвими значеннями механічного моменту навантаження на валу агрегату  $\tau_m$  та кутовою швидкістю обертання його ротора  $\omega^r$ , добуток яких відображає ще один енергетичний параметр – механічну потужність (13). Графічну залежність механічної потужності на валу агрегату за умови запуску його на відкриту засувку зображено на рисунку 6 (1).

$$P_{mech} = \tau_m \cdot \omega^r \quad (13)$$

В гідравлічній підсистемі ЕМНА змінними стану системи є відповідно миттєві значення напору та витрати. Одним із енергетичних параметрів у дані підсистемі є потужність на напірному патрубку відцентрового насоса

$$P_{hydr} = \rho \cdot g \cdot h_d \cdot q_d \quad (14)$$

де  $\rho$  – густина рідини;  
 $g$  – прискорення вільного падіння;  
 $h_d, q_d$  – відповідно миттєві значення напору та витрати на напірному патрубку відцентрового насоса.

Графічну залежність гідравлічної потужності на напірному патрубку відцентрового насоса за умови запуску агрегату на відкриту засувку зображено на рисунку 6(2).

### Висновки

Проведено дослідження енергетичних параметрів динамічних режимів роботи магістрального насосного агрегату NGK-500/450/100 із електроприводом 4АЗМВ-2500/6000-У2 нафтоперекачувальної станції «Плещівка» філії «Магістральні нафтопроводи «Дружба». Отримано графічні залежності споживаної електроенергії та струму за час пуску, миттєві значення активної і реактивної потужностей електродвигуна, механічної потужності на його валу та гідравлічної потужності на напірному патрубку насоса. Визначено інтегральний показник кількості спожитої електроенергії за час запуску агрегату, значення пускових і усталених струмів для налаштування кіл релейного захисту та вибору захисного електрообладнання. Проаналізовано ефективність перетворення енергії у кожній фізичній області (електричній, механічній та гідравлічній). 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 можливість під час вирішення практичних задач використовувати поняття ККД і  $\cos \varphi$  в динамічних режимах роботи.

Література

1 Закладний О. М. Енергозбереження засобами промислового електропривода: навчальний посібник [Текст] / О. М. Закладний, А.В. Праховник, О.І. Соловей. – К. Кондор, 2005. – 408 с. – ISBN 978–966–7665–23–2.

2 Чорний О.П. Моделювання електромеханічних систем: підручник [Текст] / О.П. Чорний, А.В. Луговой, Д.Й.Родькін, Г.Ю. Сисюк, О.В. Садовой–Кременчук, 2001. – 410 с. – ISBN 966–95391–3–7.

3 Чорний А.П. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов: Монография [Текст] / А.П. Чорний, А.И. Гладырь, Ю.Г. Осадчук, И.Р. Курбанов. – Кременчук, 2006. – 280 с. – ISBN 966–7320–00–6.

4 Бурбело М. Й. Динамічна компенсація реактивної потужності в пускових режимах електроприводів: Монографія [Текст] / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 104 с. – ISBN 978–966–641–368–3.

5 Браславский И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод [Текст] / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – М: Academia, 2004. – 202с.

6 Ильинский Н.Ф. Электропривод: энерго-и ресурсосбережение: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений [Текст] / Н.Ф. Ильинский, В.В. Москаленко. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 208с. – ISBN 978–5–7695–2849–1.

7 Фираго Б.И. Регулируемые электроприводы переменного тока [Текст] / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Мн.: Техноперспектива, 2006. – 363 с. – ISBN 985–6591–37–6.

8 Гумеров А.Г. Эксплуатация оборудования нефтеперекачивающих станций [Текст] / А.Г. Гумеров, Р.С. Гумеров, А.М. Акбердин. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. – 475с. – ISBN 5–8365–0098–3.

9 Сулейманов Р.Н. Эффективность работы насосных агрегатов [Текст] / Р.Н. Сулейманов, А.С. Галеев, Г.И. Бикбулатова. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004. – 100 с. – ISBN 5–7831–0573–2.

10 Кутуков С. Е. Информационно-аналитические системы магистральных трубопроводов [Текст] / С. Е. Кутуков. – М.: СИП РИА, 2002. – 324с. – ISBN 5–89354–150–2.

11 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 // Азербайджанская Государственная Нефтяная Академия, Проблемы энергетики, 2007.– №2. –7 с. – Режим доступа до журн.: <http://www.elm.az/physics/PowerEng/2007/v2article/art21.pdf>.

12 Грабко В. В. Метод та засоби оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання: монографія [Текст] / В.В. Грабко, М.М. Мошноріз. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 138 с. – ISBN 978–966–641–425–3.

13 Бур'ян С.О. Дослідження моделі відцентрового насоса у пакеті SIMHYDRAULICS [Електронний ресурс] / С.О.Бур'ян, С.В. Ульянов-

ченко, О.В. Кононський //Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 2010. – Режим доступу до журн.: [http://so-buryan.edu.kpi.ua/attachments/stud\\_2010\\_1.pdf](http://so-buryan.edu.kpi.ua/attachments/stud_2010_1.pdf).

14 Ratliff R. Modeling of vertical centrifugal pumps for failure analysis and redesign [Text]: Thesis Master of Science in Engineering / Ryan Ratliff; The University of Texas at Austin.– Austin,1993. – 158 p.

15 Choi J. Model based diagnostics of motor and pumps [Text]: The Dissertation Doctor of Philosophy / Ji-Hoon Choi; The University of Texas at Austin.–Austin, 2006. – 90 p.

16 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; The University of Vanderbilt. – Nashville, 1997. – 233 p.

17 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. – ISSN 1112–5209. – On-line : <http://journal.esrgroups.org/jes/edition-2007.php>.

18 Paynter H. M. Analysis and Design of Engineering Systems. – Cambridge, MA.: M.I.T. Press, 1961. – 268 p.

19 Rosenberg R.C., Karnopp D.C. Introduction to physical system dynamics // McGraw Hill, New York, NY. - 1983. - 176p.

20 Курляк П.О. Моделювання динамічних режимів роботи електроприводних відцентрових насосних агрегатів магістральних нафтопроводів на основі методу Bond Graph: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.03 “Електротехнічні комплекси та системи” / П.О. Курляк. — Вінниця, 2012. — 22 с.

21 Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов [Текст] / И.П. Копылов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 327с

Стаття надійшла до редакційної колегії 11.02.15

Рекомендована до друку професором Грудзом В.Я. (ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) професором Чорним О.П.

(Інститут електромеханіки, енергозбереження і систем управління Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, м. Кременчук)