

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГІСТРАЛЬНОГО ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА НМ 7000-210 ЗА ДОПОМОГОЮ СИМУЛЯТОРА 20-SIM

П.О. Курляк

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

*Предложен междисциплинарный подход к компьютерному моделированию энергетических характеристик магистрального центробежного насоса НМ 7000-210 на основании метода Bond Graph и лицензионной программы имитационного моделирования 20-sim 3.6 07 Professional. С помощью компьютерно-ориентированой модели построены графические зависимости напора, мощности и КПД от подачи насоса.*

*The interdisciplinary approach for computer modeling of energetic characteristics of the main centrifugal pump НМ 7000-210 is offered on the basis of the Bond Graph's method and licensed program of simulation modeling 20-sim 3.6 07 Professional. With the use of computer oriented model graphic dependencies of head, power and efficiency on the pump's flowrate are built.*

**Постановка проблеми.** Трубопровідний транспорт нафти і нафтопродуктів, порівняно із іншими видами транспорту, характеризується низкою переваг та знайшов широке застосування в нашій державі. Важливим елементом магістрального трубопроводу є насосні перекачувальні станції, основним технологічним обладнанням яких є насосні агрегати (НА). Найбільшого поширення серед них набули відцентрові насоси (ВН) з приводом від електричних двигунів. На сьогодніні магістральні нафтопроводи України працюють зі значним недовантаженням, що змушує реалізувати на них режими роботи, далекі від оптимальних. Робота насосів при малих подачах характеризується низькими коефіцієнтами корисної дії, що суттєво збільшує витрати електроенергії на транспортування нафти [1]. У зв'язку з цим особливо актуальною є задача оперативного розрахунку та оптимізації режимів роботи насосних станцій. Вирішення цієї задачі неможливе без моделювання та дослідження енергетичних характеристик лопатевих гідромашин.

**Аналіз результатів останніх досліджень.** При моделюванні НА традиційно застосовуються експериментальні дослідження та методи імітаційного моделювання. Вирішальне значення мають, звичайно, експериментальні дослідження, які дають змогу одержати загальну картину протікання реальних усталених та перехідних режимів роботи у гідромашинах. Однак внаслідок високих трудомісткості та вартості вони не одержали широкого розповсюдження. Це викликано, в першу чергу, необхідністю проведення великої кількості експериментів та неможливістю дослідження аварійних режимів, які призводять до порушення технологічного процесу.

Методи імітаційного моделювання також виявились неспроможними вирішити завдання ефективного дослідження швидкоплинних перехідних та усталених режимів НА. Досвід спорудження подібних установок свідчить, що

електро- і гідродинамічна моделі системи НА є досить громіздким і дорогим пристроєм, який комплектується нестандартним обладнанням і вимагає залучення висококваліфікованого обслуговуючого персоналу. Крім того, при дослідженні кожної нової конструкції гідромашини необхідно створювати нову модель, яка зазвичай дорого коштує і вимагає трудомістких перетворень при зміні параметрів. Інколи такі методи мають обмеження або є зовсім непридатними, оскільки у моделі з'являються властивості, які не властиві оригіналу (насосу), або деякі властивості оригінала виявляються настільки ослабленими, що їх прояв у моделі практично не можна зареєструвати [2].

Все це призвело до появи нових підходів до моделювання ВН, пов'язаних з використанням узагальненої теорії кіл Кірхгофа [3], застосування яких свого часу спричинило бурхливий розвиток теорії електричних машин. Зокрема в [4] методом електрогідравлічної аналогії було створено комплексну модель ВН та розраховано числові значення її параметрів у системі відносних номінальних одиниць для групи магістральних насосів нафтоперекачувальних станцій за їх каталоговими даними. В даній роботі проводилось математичне моделювання усталених режимів роботи НА.

Слід зауважити, що на сучасному етапі розвитку наукового прогресу, вирішення задачі оперативного розрахунку та оптимізації режимів роботи будь-яких об'єктів належить комп'ютерному моделюванню. Тому в роботі [5] було розроблено комп'ютерно-орієнтовану модель ВН способом застосування загальних концепцій методу моделювання Bond Graph до згаданої вище віртуальної комплексної моделі ВН [4]. Проводились дослідження усталених режимів роботи ВН за допомогою програми комп'ютерного імітаційного моделювання – симулятора 20-sim. У поставлених задачах не акцентувалася увага на дослідженні енергетичних показників роботи ВН. Встановлено, що для моделювання обертових перетворювачів

енергії (електродвигунів, лопатевих гідромашин тощо) симулятор 20-sim доцільно доповнити функціональним модулем переходу від нерухомих до обертових систем координат та навпаки.

**Задачі досліджень.** Метою роботи є впровадження міждисциплінарного методу моделювання Bond Graph та симулятора 20-sim для дослідження енергетичних показників роботи ВН за допомогою їх комп'ютерно-орієнтованих моделей, створення в 20-sim спеціалізованого модуля переходу від обертової до нерухої системи координат.

**Виклад основного матеріалу.** Для прискореного вирішення задач оперативного розрахунку та оптимізації режимів роботи складних технічних систем необхідно, щоб метод моделювання міг виразити динамічні властивості системи в різних фізичних областях. Таким уніфікованим методом моделювання є Bond Graph, запропонований Пейнтером [6] та розроблений його учнями – Кернопом і Розенбергом [7]. Запровадивши даний метод Пейнтер надовго випередив свій час, оскільки широкого застосування цей метод одержав впродовж останніх років - з бурхливим розвитком сучасних комп'ютерних технологій та програмного забезпечення.

В основу Bond Graph покладено шість основних фізичних абстракцій – зусилля  $e$ , потік  $f$ , потужність  $P$ , момент  $p$ , переміщення  $q$  і енергію  $E$ . Графічний словник методу містить такі елементи: два типи абстрактних джерел – зусилля  $Se$  і потоку  $Sf$ ; абстрактні ємкість  $C$ , 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 людуству фізичній області. Bond Graph моделі технічних або фізичних об'єктів зображають у вигляді позначених і направлених графів, вершинами яких є підмоделі, а стрілки символізують ідеальний потік енергії, представлений енергетично спряженими змінними зусилля і потоку. А найголовніше те, що з Bond Graph моделі автоматично можна одержати систему диференціальних рівнянь, які описують поведінку досліджуваного об'єкту. Спосіб формування рівнянь 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.

Проведемо дослідження енергетичних характеристик магістрального насоса НМ-7000-210 за допомогою симулятора 20-sim. Для цьо-

го використаємо Bond Graph модель ВН [5], яку можна умовно розділити на чотири взаємозв'язані частини:

- робоче колесо – представлене джерелом напору  $MSeI$  і елементами  $X_{tmH} - X_{mQ}$ ,  $R_{mech} - X_{mech}$ , які характеризують відповідно внутрішній опір машини, вплив скінченної кількості лопатей на напір і витрату та механічні втрати енергії на тертя;
- вітка об'ємних втрат енергії, які виникають внаслідок витоків робочої рідини через ущільнення і бай паси, моделюється  $R_{dQ} - X_{dQ}$ ;
- спіральний відвід, змодельований елементами  $R_{dH}, X_{dH}$ ;
- зовнішній гідравлічний опір напірного тракту мережі -  $MR_{load}$ .

Числові значення згаданих вище елементів моделі ВН (табл.1) розраховуються за методикою, описаною в [4], через приведені у довідниках конструктивні та номінальні режимні параметри гідромашини.

Моделювання режимів роботи ВН будемо проводити у віртуальній обертової системі координат  $d, q$ , жорстко зв'язаній із робочим колесом машини. Такий підхід застосовувався в [4] для спрощеного вирішення диференціальних рівнянь з періодичними коефіцієнтами, які були одержані для опису руху в'язкої нестисливої рідини на ділянці спіральної частини відводу в координатах  $x, y$ . Тому режимні параметри насоса (напір, витрата, потужність тощо) будуть представлені у вигляді гармонічних функцій кута повороту лопаті робочого колеса.

Отже, джерело напору  $MSeI$  на виході робочого колеса ВН в режимі закритої засувки зображаємо гармонічною функцією кута повороту лопаті

$$MSeI = H_0 \sin(\omega t), \quad (1)$$

де:  $H_0$  – амплітудне значення функції (табл.1);  $\omega$  – частота зміни функції, яка визначається співвідношенням реальної і номінальної частот обертання робочого колеса ВН,  $\omega = n/n^{ном}$ .

На симуляторі 20-sim таке представлення здійснюється за допомогою модульованого джерела зусилля  $MSeI$  із генератором вхідного сигналу  $WaveGenerator$  синусоїдальної форми (рис.1).

**Таблиця 1 - Числові значення елементів Bond Graph моделі ВН НМ-7000-210.**

$H_0$	$R_{mech}$	$X_{mech}$	$X_{tmH}$	$X_{mQ}$	$R_{dQ}$	$X_{dQ}$	$R_{dH}$	$X_{dH}$
1.909	0.421	151	0.793	2.306	25.04	36.74	$5.54 \times 10^{-4}$	0.398

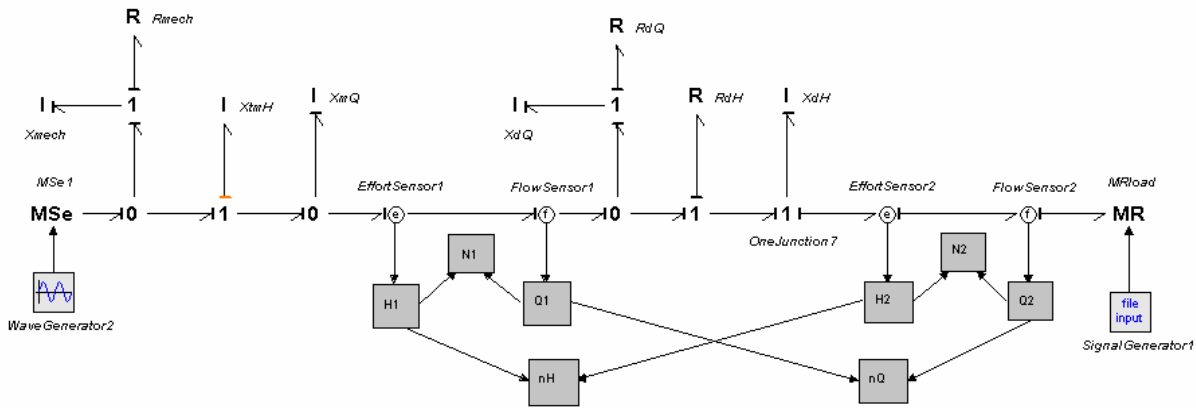


Рисунок 1 – Адаптована Bond Graph модель для дослідження енергетичних характеристик ВН

parameters

```
real initial = 295.1554;
real tp = 30.0;
real k = 43.0;
real dt = 5.0;
```

variables

```
real prev, peak;
integer i;
real ind;
```

initialequations

```
peak = initial;
prev = 0;
output1 = initial;
output2 = output1;
```

code

```
if major then
ind=0;
peak = max([abs(input), peak]);
if (input > 0 and prev < 0)
or (input < 0 and prev > 0) then
for i=1 to k do
if (time >= tp*i) and (time <= tp*i+dt) then
ind = 1;
end;
end;
if ind==0 then
output1 = peak;
output2=output1;
peak = 0;
end;
prev = input;
end;
```

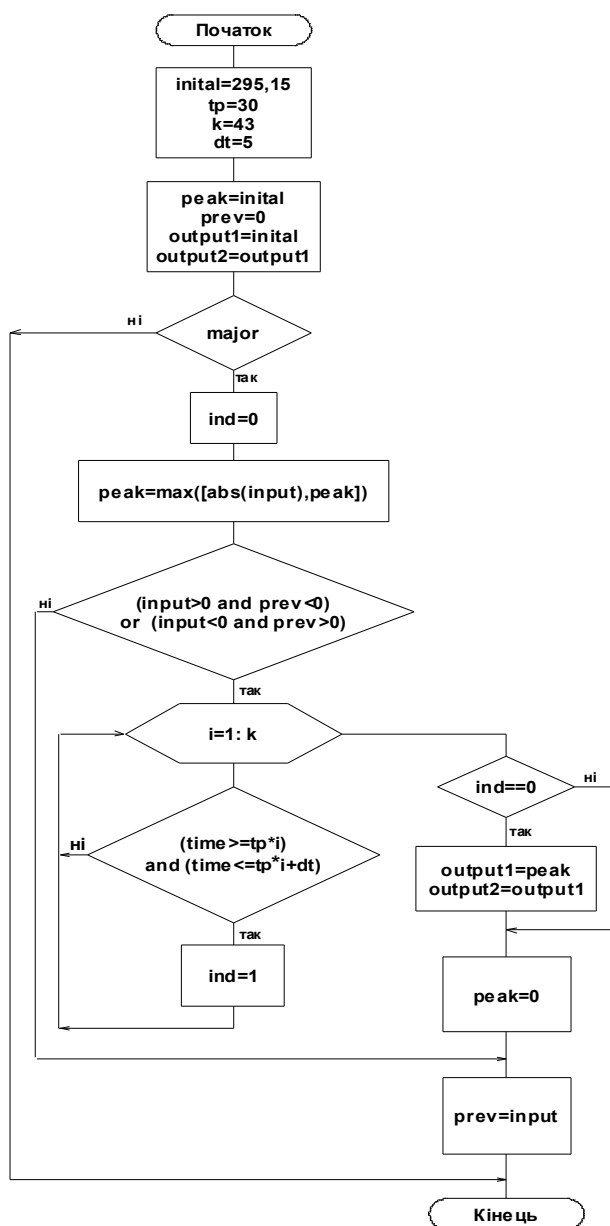
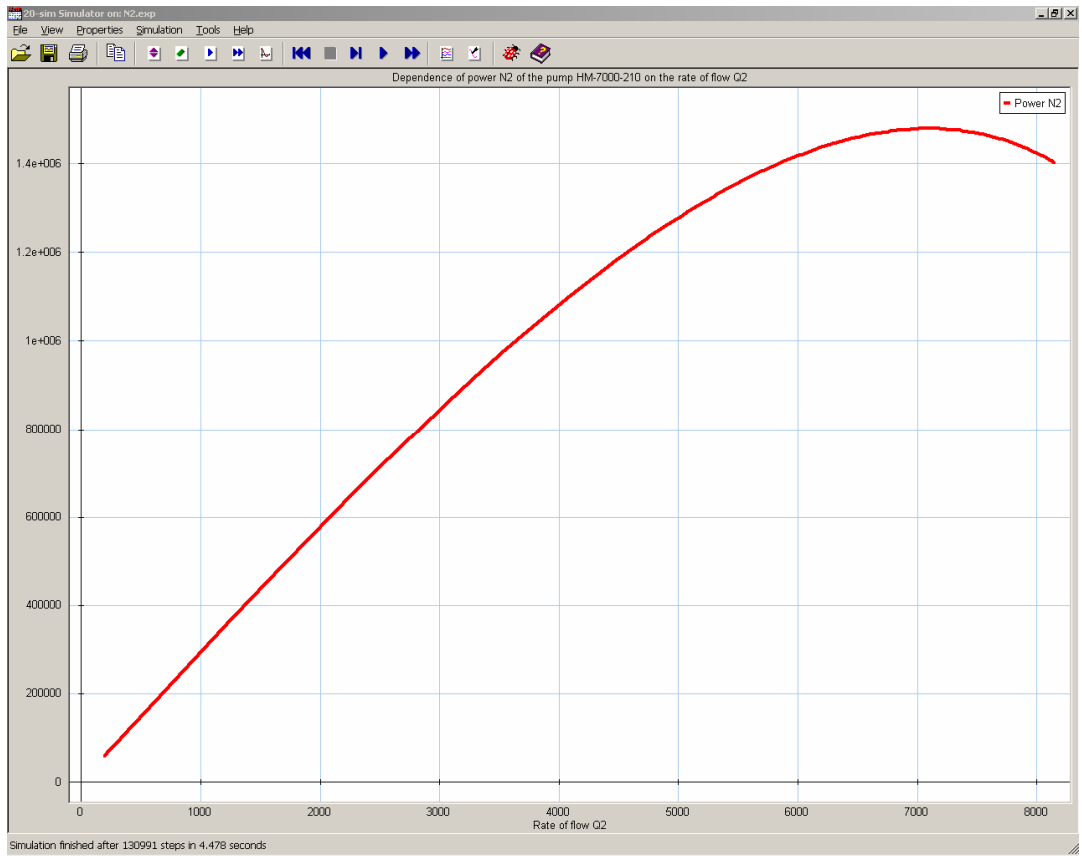
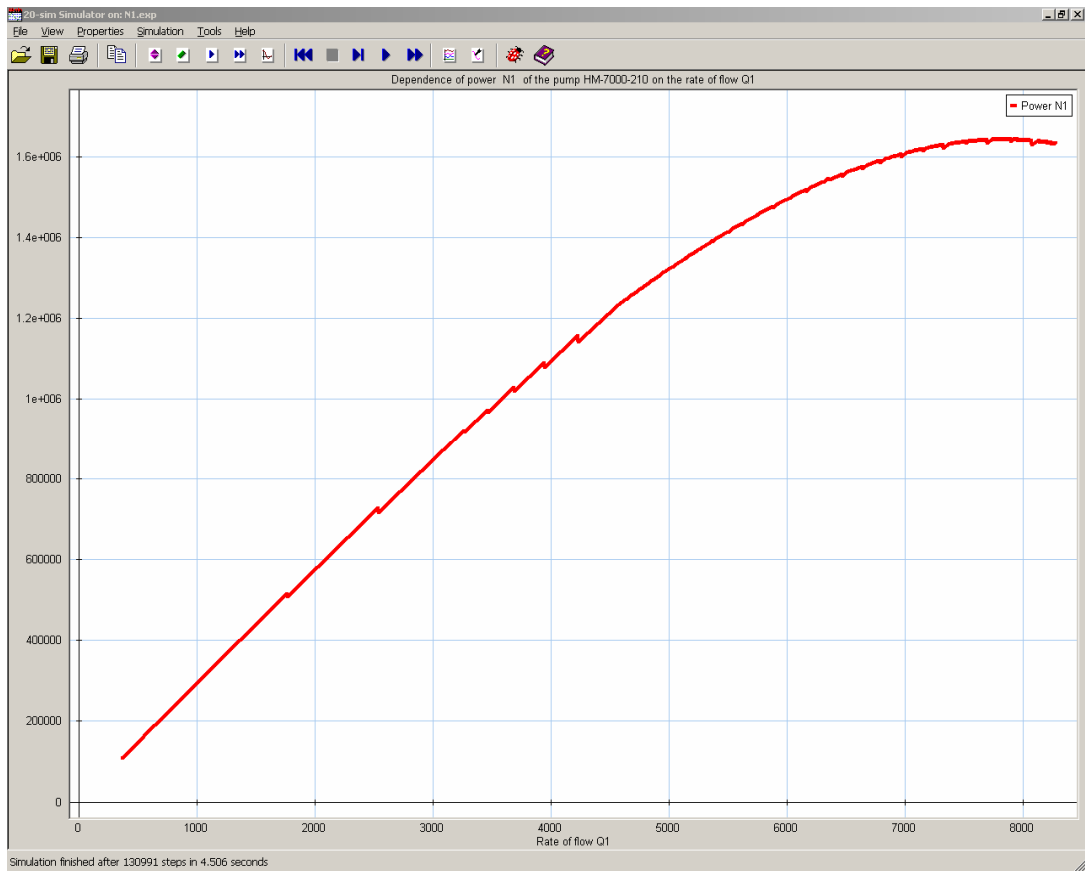


Рисунок 2 — Підмодель та блок-схема функціонального модуля переходу від обертової до нерухомої системи координат

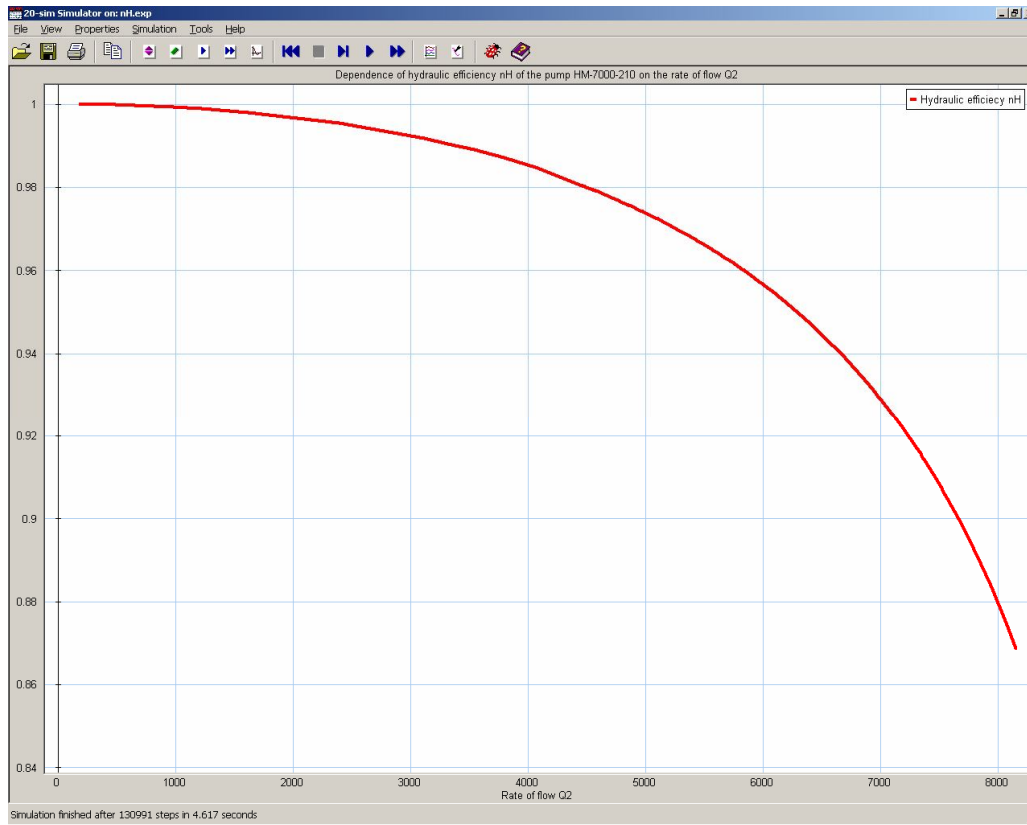


a)

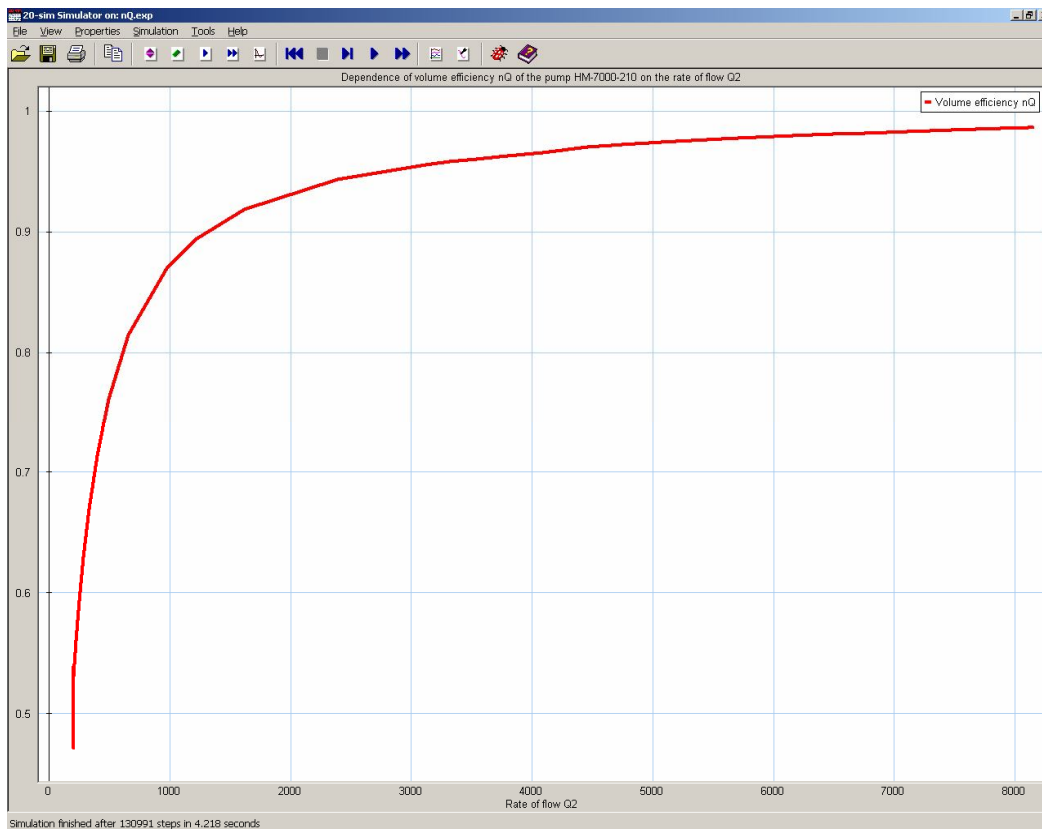


б)

Рисунок 3 – Корисна (а) і теоретична (б) потужності насоса НМ-7000-210



a)



б)

Рисунок 4 – Гідравлічний (а) і об’ємний (б) ККД насоса НМ 7000-210

Зовнішня гідромережа моделюється гідравлічним опором  $R_{load}$ , який виникає внаслідок протікання робочої рідини залежно від ступеня відкриття засувки на напірному патрубку насоса. В 20-sim гідромережа представлена модульованим елементом  $MR_{load}$  із генератором *SignalGenerator1* ступеневої зміни в часі величини цього опору відповідно до значень поступового відкриття засувки (рис.1).

З метою дослідження енергетичних характеристик вітки на виході робочого колеса і на напірному патрубку Bond Graph моделі ВН (рис.1) встановлюємо давачі зусилля *EffortSensor* та потоку *FlowSensor*, за допомогою яких одержуємо відповідні гармонічні значення функцій напору  $H$  (*effort*) та витрати  $Q$  (*flow*) у віртуальній обертовій системі координат  $d, q$ . Для переходу від обертової  $d, q$  до нерухої  $x, y$  системи координат автором розроблено та доповнено симулятор 20-sim спеціалізованим функціональним модулем. Такими модулями оснащені підмоделі  $H1, Q1$  та  $H2, Q2$ , на яких одержуємо значення напору та витрати залежно від зміни гідравлічного опору напірного тракту зовнішньої мережі.

Підмодель функціонального модуля переходу записана у вигляді рівнянь (рис.2а) на основі мови програмування SIDOPS+, яка застосовується в симуляторі 20-sim. Алгоритм роботи даного модуля наглядно зображений за допомогою блок-схеми (рис.2б). Його виконання можна описати такими етапами:

- визначається початкове значення гармонічної функції— *initial*;
- задається час зміни  $t_p$  та кількість  $k$  поточних значень гідравлічного опору  $R_{load}$ ;
- встановлюється затримка часу  $dt$  для затухання перехідного процесу, який виникає на ділянці зміни гідравлічного опору  $R_{load}$  від одного поточного значення до іншого;
- визначаються амплітудні значення функції на сходинокх зміни гідравлічного опору  $R_{load}$ .

За допомогою підмоделей  $N1$  і  $N2$  обчислюються значення відповідно теоретичної та корисної потужностей ВН шляхом добутку значень напорів та витрат відповідно на виході робочого колеса ( $N1 = H1 \times Q1$ ) та на напірному патрубку насоса ( $N2 = H2 \times Q2$ ). Підмоделі  $\eta H$  і  $\eta Q$  встановлено для одержання значень відповідно гідравлічного ( $\eta H = H2/H1$ ) та об'ємного ( $\eta Q = Q2/Q1$ ) ККД ВН. Після встановлення вище зазначених підмоделей Bond Graph модель ВН стає придатною для проведення досліджень енергетичних характеристик режимів роботи насосів.

Вводимо адаптовану Bond Graph модель ВН у вікно „Редактора” програми 20-sim, кожному елементу даної моделі присвоюємо наве-

дені вище числові значення магістрального насоса НМ-7000-210 (табл.1) та у вікні „Симулятор” проводимо наступні стадії експерименту:

- задаємо початковий  $t=0$  і кінцевий  $t=1290$  с. час протікання технологічного процесу, протягом якого відбувається повне відкриття засувки на напірному патрубку;
- встановлюємо числовий метод Ейлера для розв'язку генерованих програмою диференціальних рівнянь стану моделі;
- зображаємо у спеціалізованому вікні симулятора 20-sim графічні характеристики корисної (рис.3а), теоретичної (рис.3б) потужностей та гідравлічного (рис.4а), і об'ємного (рис.4б) ККД залежно від витратного навантаження насоса НМ-7000-210.

### Висновки

1. За допомогою Bond Graph моделі та симулятора 20-sim проведено дослідження енергетичних характеристик магістрального ВН НМ-7000-210 шляхом побудови графічних залежностей корисної і теоретичної потужностей та гідравлічного і об'ємного ККД від витратного навантаження насоса.

2. Для аналізу режимів роботи обертових перетворювачів енергії (електродвигунів, лопатевих гідромашин тощо) створено та доповнено програму комп'ютерного імітаційного моделювання 20-sim спеціалізованим функціональним модулем, який дає змогу здійснювати перехід від обертової до нерухої системи координат.

3. Побудова енергетичних характеристик магістрального насоса за допомогою його комп'ютерно-орієнтованих моделей відкриває можливості практичної реалізації енергозберігаючих технологій на нафтоперекачувальних станціях.

### Література

- 1 Середюк М.Д., Якимів Й.В., Лісафін В.П. Трубопровідний транспорт нафти і нафтопродуктів: Підручник. – Івано-Франківськ, 2001. – 517 с.
- 2 Колпаков Л.Г. Центробежные насосы магистральных нефтепроводов. – М.: Недра, 1985. – 184 с.
- 3 Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1975. – 749 с.
- 4 Костишин В.С. Моделювання режимів роботи відцентрових насосів на основі електрогідравлічної аналогії. – Івано-Франківськ: Факел, 2000. – 164 с.
- 5 Костишин В.С., Курляк П.О. Bond Graph модель магістральних відцентрових насосів нафтоперекачувальних станцій // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2007. – №1 (22). – С. 56-63
- 6 Paynter H. M. Analysis and Design of Engineering Systems. – Cambridge, MA.: M.I.T. Press, 1961. – 268 p.
- 7 Rosenberg R.C., Karnopp D.C. Introduction to physical system dynamics // McGraw Hill, New York, NY. – 1983. – 176 p.