

## АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА НА ОСНОВІ ЙОГО ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ

В.С.Костишин, П.М.Николин

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 48003,  
e-mail: epeo@pung.edu.ua

*Разработана математическая модель центробежного насоса на основании термодинамического подхода, определены термодинамические параметры для серии центробежных насосов магистральных нефтепроводов. Произведен анализ эффективности установившихся режимов их работы.*

*The centrifugal pump mathematical model is worked out on the basis of thermodynamic approach. Thermodynamic parameters of this model are defined for centrifugal pump series of oil – trunk pipelines. Analysis of efficiency of steady-state operating regime of centrifugal pumps is made.*

### Постановка проблеми, актуальність та доцільність досліджень

На сьогодні все відчутніше постає питання енергозбереження не тільки в Україні, але й у світовому масштабі. Саме через нераціональне використання енергетичних ресурсів створюються проблеми із енергопостачанням споживачів. Однією із найбільш енергоємних галузей народного господарства є нафтогазова промисловість. Тут, в першу чергу, слід згадати нафтоперекачувальні станції, обладнані потужними електроприводними, зазвичай відцентровими агрегатами. Дотримання умов експлуатації та оптимізація робочих параметрів відцентрових насосів (ВН) дасть змогу підвищити надійність та ефективність роботи цих машин. Для того щоб визначити оптимальні параметри функціонування ВН необхідно створити таку математичну модель, яка б змогла адекватно відобразити складні процеси енергетичних перетворень в таких машинах, що зв'язують між собою підсистеми різної фізичної природи (механічну та гідравлічну). Таким чином, вирішення цієї задачі можливе лише з позицій системного міждисциплінарного підходу, одним із напрямків якого є термодинамічний аналіз роботи довільних енергетичних перетворювачів [7].

### Аналіз результатів останніх досліджень

Існує велика кількість законів, котрі описують незворотні фізичні процеси у вигляді пропорційних співвідношень. До них відносяться: закон Фур'є, закон Фіка, закон Ома, закон Дарсі, закон Ньютона тощо [5]. Термодинамічний підхід теж реалізує принцип пропорційності, із тією тільки відмінністю, що він може поєднувати енергетику різних фізичних підсистем. Підвалини формування такого підходу були закладені в наукових працях С.Карно (1824), Р.Клаузіуса (1876), Дж. Гіббса (1875) та інших. Однак у вказаних класичних працях розглядались лише стаціонарні процеси енергоперетворень. Тільки в 1931 році Л.Онсагером були представлені основні принципи сучасної

термодинаміки із врахуванням швидкості зміни процесів в часі. Свою формальну теорію швидкості фізико-хімічних процесів він створив на основі рівняння швидкості виникнення ентропії. Основний принцип постулату Онсагера встановлює лінійний зв'язок між термодинамічними потоками  $J$  та силами  $X$ , які діють в системі.

Система термодинамічних рівнянь для довільного перетворювача енергії, схема якого зображена на рис.1, в загальному випадку має вигляд

$$\begin{aligned} \overline{J}_i &= L_{ii} \cdot \overline{X}_i + L_{ij} \cdot \overline{X}_j, \\ \overline{J}_j &= L_{ji} \cdot \overline{X}_i + L_{jj} \cdot \overline{X}_j. \end{aligned} \quad (1)$$

де:  $\overline{X}_i, \overline{X}_j, \overline{J}_i, \overline{J}_j$  – відповідно термодинамічні сили та потоки на вході та виході системи;

$L_{ij}$  – феноменологічні (кінетичні) коефіцієнти, які враховують дію різноманітних ефектів (термоелектричних, термодифузійних, термомеханічних) що утворюються при накладанні і взаємодії декількох фізичних процесів

Оскільки більшість систем у природі – нелінійні, то нелінійність процесу зосереджена в феноменологічних коефіцієнтах, які відображають процеси переносу та розсіювання енергії. Дана система рівнянь описує енергетичні перетворення для чотиріпольника [8].

Огляд літературних джерел засвідчив, що лише за останнє десятиліття зроблено спроби моделювання довільного перетворювача енергії з використанням узагальненого термодинамічного підходу, зокрема зображеного в працях Щура І.З., Еткіна В.А, Сафонова М.С. [6,9,10]. Але конкретних результатів в області гідромеханіки не одержано. Передумовою створення ефективної термодинамічної моделі ВН є також робота [1], в якій на основі теорії кіл Кірхгофа [3] запропонована схема заміщення гідромашини (рис. 2), що оперує із зосередженими комплексними параметрами.

Реактивні опори  $x_i$  в цій схемі характеризують внутрішній енергообмін у машині, викликаний силами інерції, в той час як активні опори  $r_i$  – незворотні процеси, спричинені силами тертя та дисипації теплової енергії у до-

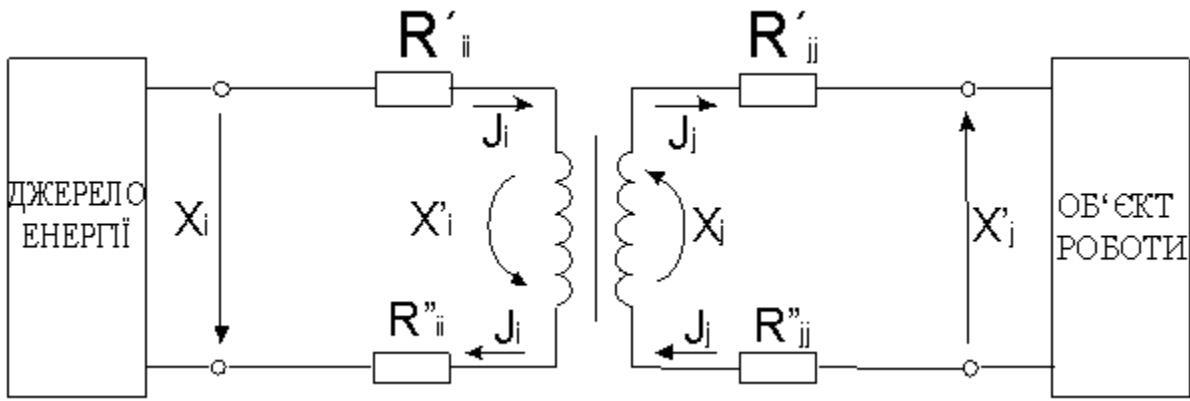


Рисунок 1 — Схема заміщення енергетичного перетворювача

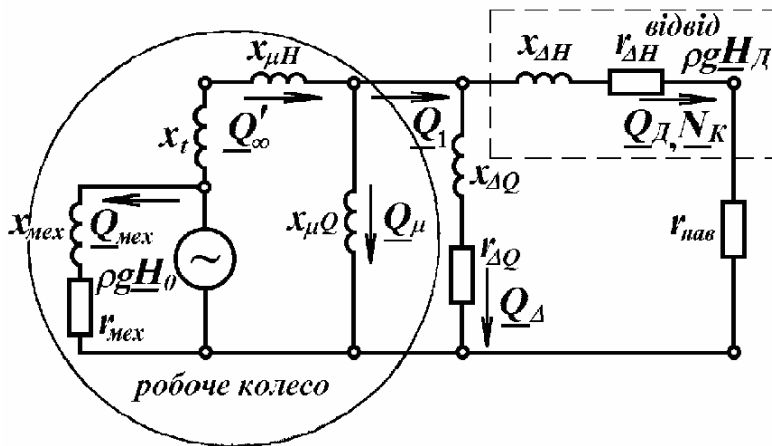


Рисунок 2 — Повна комплексна схема заміщення ВН

вкілля. Так опори  $x_{mex}$  та  $r_{mex}$  враховують механічні втрати,  $x_i$  – внутрішній гідроопір ВН,  $x_{\mu H}$  та  $x_{\mu Q}$  – вплив скінченої кількості лопатей на витрату і напір машини,  $x_{\Delta Q}$  та  $r_{\Delta Q}$  – об'ємні втрати у насосі,  $x_{\Delta H}$  та  $r_{\Delta H}$  – гідравлічні втрати у спіральному відводі,  $r_{нав}$  – гідроопір напірного тракту гідромережі,  $H_0$ ,  $Q_{\infty}$  – напір та витрата ідеалізованого ВН,  $Q_{\mu}$  та  $Q_{\Delta}$  – об'ємні втрати рідини, спричинені відповідно скінченою кількістю лопатей та зворотними зв'язками через ущільнення та байпаси,  $Q_D$  та  $H_D$  – витрата і напір на виході насоса.

### Задачі досліджень

Метою роботи є застосування термодинамічної моделі ВН для аналізу його роботи. Побудова енергетичної характеристики для установленого режиму та визначення параметрів ефективної та стійкої роботи цієї машини.

### Виклад основного матеріалу

Взявши за основу повну комплексну схему заміщення ВН і провівши нескладні математичні перетворення ми отримаємо схему активного чотириполюсника [3]. Отриману заступну схему ВН в подальшому легше аналізувати на основі термодинамічного підходу (рис. 3).

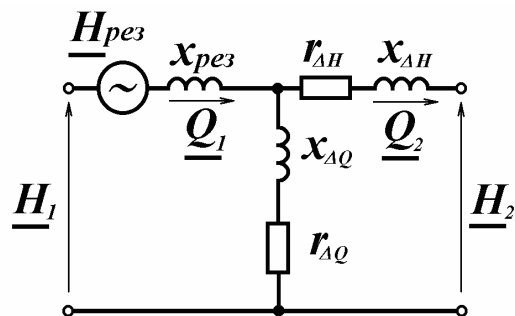


Рисунок 3 — Схема заміщення ВН

Для спрощення аналізу роботи ВН знехтуємо підпірним напором  $H_1 = 0$ . Тому напір, який створюється електричним двигуном, буде рівний напору на відповідному патрубку насоса. Такий підхід до аналізу роботи ВН дає змогу

розглядати одержану схему як пасивний чотириполюсник. Узагальнивши вітки заступної схеми ВН комплексними опорами  $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$  отримаємо T-подібний, чітко виражений пасивний чотириполюсник, який зображено на рис. 4.

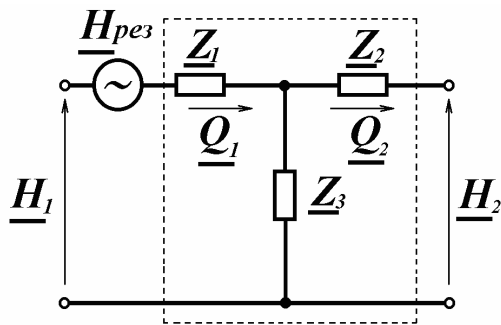


Рисунок 4 — Пасивний чотириполюсник

Повні комплексні опори визначаємо через розрахункові параметри повної комплексної схеми заміщення ВН за формулами [3]

$$\underline{Z}_1 = jx_{pez}, \quad (2)$$

$$\underline{Z}_2 = r_{\Delta H} + jx_{\Delta H}, \quad (3)$$

$$\underline{Z}_3 = r_{\Delta Q} + jx_{\Delta Q}, \quad (4)$$

де  $\underline{Z}, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$  — повні комплексні опори пасивного чотириполюсника

Результати розрахунків параметрів для ВН у відносних одиницях, де базовими вибрані дійсні номінальні параметри гідромашини, наведені в табл. 1.

Володіючи внутрішньою схемою з'єднань чотириполюсника та комплексними значеннями опорів, можна скласти систему рівнянь, яка описує його роботу. Існує багато форм опису системи рівнянь, але однією із найбільш вживаних є A-форма запису.

$$\left. \begin{aligned} \underline{H}_{pez} &= \underline{A}\underline{H}_2 + \underline{B}\underline{Q}_2, \\ \underline{Q}_1 &= \underline{C}\underline{H}_2 + \underline{D}\underline{Q}_2. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Відомо, що для будь-якого пасивного чотириполюсника можна знайти комплексні термодинамічні коефіцієнти  $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}, \underline{D}$ , які встановлюють зв'язок між вхідними та вихідними параметрами схеми. Комплексні коефіцієнти для T-подібної заступної схеми залежать від схеми внутрішніх з'єднань чотириполюсника, значень опорів та частоти, визначаємо їх за відомими формулами [3], результати розрахунку зводимо в табл. 2. Для будь-якого чотириполюсника термодинамічні коефіцієнти  $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}, \underline{D}$  можна визначити і дослідним шляхом і аналітичним. Коефіцієнти пов'язані математичним співвідношенням, котре повинно виконуватись для кожного пасивного чотириполюсника.

$$\underline{AD} - \underline{BC} = 1. \quad (6)$$

Із системи рівнянь чотириполюсника (5) ми одержуємо рівняння напірної характеристики ВН в комплексній формі, записане із використанням коефіцієнтів

$$\underline{H}_D = \frac{1}{\underline{A}} \cdot \underline{H}_{pez} - \frac{\underline{B}}{\underline{A}} \cdot \underline{Q}_D, \quad (7)$$

де  $\underline{Q}_D, \underline{H}_D$  — значення витрати та напору на вихідному патрубку ВН.

Рівнянню (7) відповідає зображена на комплексній площині векторна діаграма режимів ВН рис.5

Використовуючи тригонометричні співвідношення можна записати скалярне рівняння для визначення напірної характеристики ВН

$$\underline{H}_D = \frac{1}{A} \left[ \sqrt{(H_{pez})^2 - (B \cdot Q_D \cdot \sin(\beta - \alpha))^2} - B \cdot Q_D \cdot \cos(\beta - \alpha) \right]. \quad (8)$$

Аналізуючи роботу ВН на основі векторної діаграми можна встановити, що існує два крайніх режими роботи — неробочого ходу ( $Q_D=0$ ) та умовного обриву трубопроводу ( $H_D=0$ ); в межах яких функціонує машина. Аналогом таких явищ можуть слугувати відповідно режими неробочого ходу та короткого замикання в електричних машинах, де силові та швидкісні параметри (струм та напруга). Порівняння розрахованої за допомогою термодинамічної моделі та отриманої експериментально напірних характеристик магістрального насоса НМ-2500-230 (рис. 6), свідчить про їх належну збіжність, що підтверджує правильність запропонованого підходу.

Крім того, термодинамічна модель ВН дає змогу досліджувати втрати потужності в машині, тобто проводити аналіз ефективності її роботи шляхом дослідження втрат потужності.

$$\Delta N = Nc - Nk, \quad (9)$$

де  $Nc, Nk$  — відповідно корисна (гідравлічна), спожита з валу двигуна потужності ВН.

На рис. 7 зображені залежності зміни потужності  $Nk$  та  $Nc$  залежно від витрати ВН  $Q_d$ .

До недавнього часу вважалось, що корисна потужність ВН має прямопропорційну залежність від витрати. Проаналізувавши ці характеристики можна стверджувати, що залежність втрат потужності  $\Delta N$  від витрати  $Q_d$  має чітко виражений екстремуму в області оптимального режиму роботи (рис. 8).

Під час значного перевищення номінального значення витрати, втрати потужності починають різко зростати. Такий характер поведінки свідчить про те, що витрачена на роботу ВН енергія використовується неефективно. Також цей режим роботи є небезпечний для конструкції машини, оскільки він супроводжується появою та наростанням кавітаційних процесів, здатних порушити стійкість роботи ВН. Термодинамічна модель насоса уможливило побудову характеристик ККД (рис. 9) за методикою [1].

Очевидно, що максимальна ефективність ВН буде досягатись в режимі номінального навантаження.

**Таблиця 1 — Параметри Т-подібної заступної схеми ВН**

Марка відцентрового насоса	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$
НМ 1250-260	j0.05	0.005+j0.44	24.95+j11.6
НМ 2500-230	j0.137	0.002+j0.424	28.64+j21.14
НМ 3600-230	j0.293	0.001+j0.415	28.06+j26.46
НМ 5000-210	j0.459	0.00081+j0.407	27.67+j32.43
НМ 7000-210	j0.59	0.00053+j0.398	25.04+j36.74
НМ 10000-210	j0.796	0.00031+j0.39	21.72+j40.42
12Н-10*4	j0.32	0.001+j0.468	32.94+j10.89
10Н-8*4	j0.131	0.002+j0.482	29.19+j7.36
8МБ-9*2	j0.189	0.003+j0.489	30.18+j6.56
24DVS-D	j0.614	0.00053+j0.398	25.04+j36.73
24НД-14*1	j0.475	0.00096+j0.413	28.53+j28.8
20НД-12*1	j0.197	0.002+j0.419	26.81+j22.35
16НД-10*1	j0.258	0.002+j0.428	28.53+j19.34
14Н-12*2	j0.471	0.00098+j0.454	36.29+j15.49
12НД-11*2	j0.257	0.003+j0.45	33.72+j14.4
10НД-10*2	j0.073	0.005+j0.458	30.34+j10.47

**Таблиця 2 — Комплексні коефіцієнти пасивного чотирьохполюсника для ВН**

Марка відцентрового насоса	$A$	$B$	$C$	$D$
НМ-1250-260	1.001+j0.002	0.004+j0.49	0.033-j0.015	1.007+j0.014
НМ-2500-230	1.002+j0.003	0.000833+j0.562	0.023-j0.017	1.007+j0.01
НМ-3600-230	1.005+j0.006	0.000964+j0.71	0.019-j0.018	1.007+j0.008
НМ-5000-210	1.008+j0.007	-0.002+j0.869	0.015-j0.018	1.007+j0.006
НМ-7000-210	1.011+j0.007	-0.002+j0.992	0.013-j0.019	1.007+j0.005
НМ-10000-210	1.015+j0.008	-0.003+j1.192	0.01-j0.019	1.007+j0.004
12Н-10*4	1.003+j0.009	-0.003+j0.79	0.027-j0.009	1.004+j0.013
10Н-8*4	1.001+j0.004	0.0000088+j0.613	0.032-j0.008	1.004+j0.016
8МБ-9*2	1.001+j0.006	0.000143+j0.579	0.032-j0.007	1.003+j0.015
24DVS-D	1.011+j0.008	-0.003+j1.017	0.013-j0.019	1.007+j0.005
24НД-14*1	1.008+j0.008	-0.002+j0.891	0.017-j0.018	1.007+j0.007
20НД-12*1	1.004+j0.004	0.000031+j0.617	0.022-j0.018	1.008+j0.009
16НД-10*1	1.004+j0.006	0.000376+j0.688	0.024-j0.016	1.007+j0.01
14Н-12*2	1.005+j0.011	-0.004+j0.927	0.023-j0.01	1.005+j0.011
12НД-11*2	1.003+j0.006	0.000195+j0.708	0.025-j0.011	1.005+j0.011
10НД-10*2	1.001+j0.002	0.004+j0.532	0.029-j0.01	1.005+j0.013

### Висновки

1. На основі термодинамічного підходу створена модель ВН для аналізу надійності та ефективності його роботи.

2. Проілюстровано належну збіжність розрахованих за допомогою термодинамічної моделі та отриманих експериментально напірних характеристик ВН магістральних нафтопроводів.

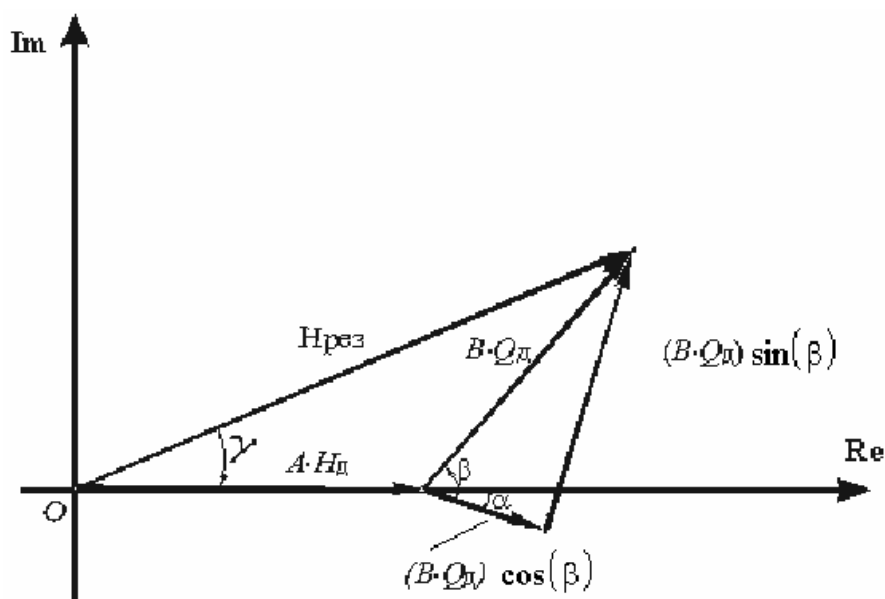


Рисунок 5 — Векторна діаграма режимів ВН

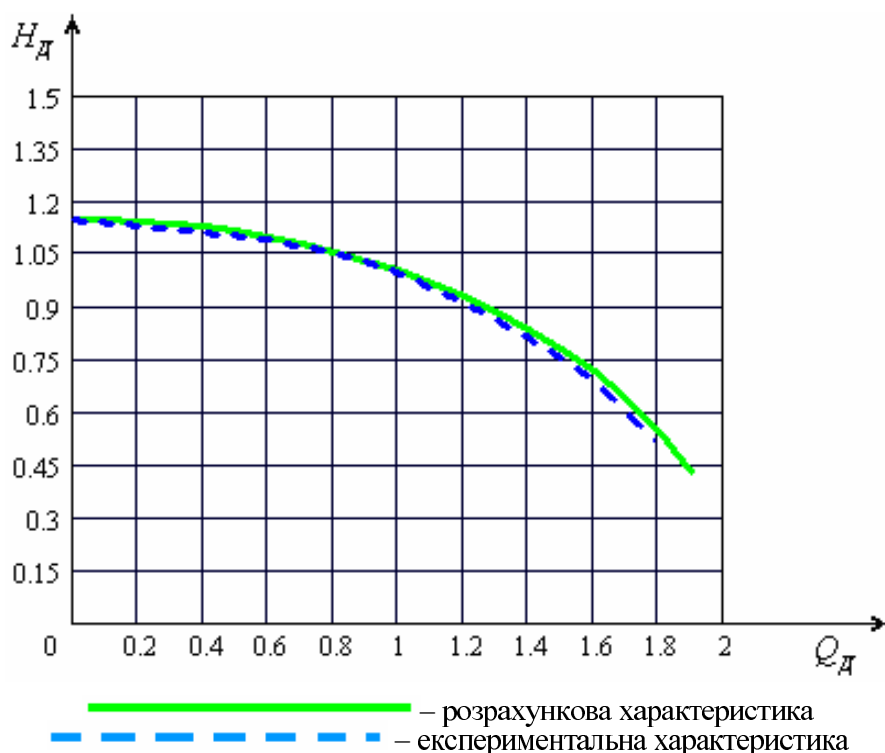


Рисунок 6 — Розрахункова напірна характеристика насоса НМ-2500-230

3. Проведено аналіз енергетичних параметрів усталеного режиму роботи ВН. Встановлено, що втрати потужності під час роботи ВН змінюються і мають чітко виражений екстремум функції  $\Delta N = f(Q_D)$ , який відповідає оптимальному режиму роботи.

#### Література

1 Костишин В.С. Моделирование режимов работы відцентрових насосів на основі електрогидравлічної аналогії. — Івано-Франківськ: Факел, 2000. — 163 с.

2 Костишин В.С., Николин П.М. Представлення відцентрового насоса у вигляді чотириполосника // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. — 2006. — №3. — С.76-80.

3 Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. — М.: Высшая школа, 1973. — 752 с.

4 Мамедов М.М. Феноменологический вывод соотношений взаимности Онзагера. <http://www.ioffe.rssi.ru/journals/pjtf/2003/16/p39-44.pdf>

5 Эткин В.А. На стыке естественных наук. [http://zhurnal.lib.ru/e/etkin\\_w\\_a/\\_nastykaxestestvennyxnayk-1.shtml](http://zhurnal.lib.ru/e/etkin_w_a/_nastykaxestestvennyxnayk-1.shtml)

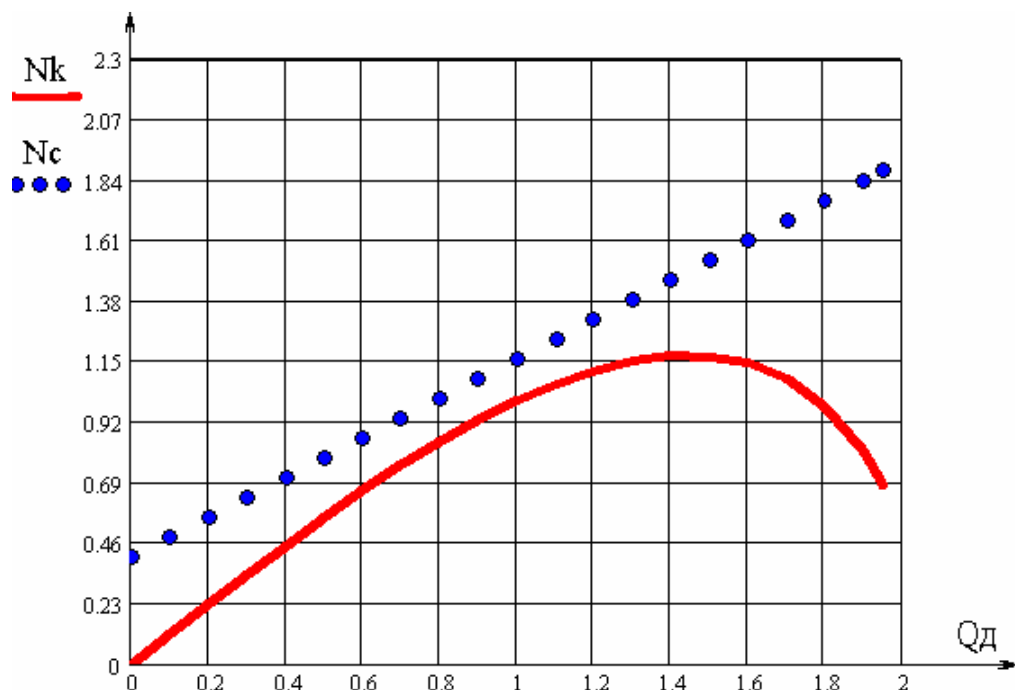


Рисунок 7 — Розрахункові характеристики корисної  $N_k$  та спожитої  $N_c$  потужності насоса НМ-2500-230



Рисунок 8 — Характеристика втрат потужності насоса НМ-2500-230

6 Эткин В.А. Термодинамика неравновесных процессов переноса и преобразования энергии. – Тольятти, 1999. – 216 с.

7 Вейник А.И. Термодинамика необратимых процессов. – Минск: Наука и техника, 1966. – 360 с.

8 Коган И.Ш. "Физические аналогии" — не аналогии, а закон природы. – 2004.

<http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/7438.htm>

9 Сафонов М.С. Метод интегральных уравнений баланса потоков массы, энергии и эксергии в анализе химико-технологических систем. – М., 2003. – 45 с.

10 Щур І.З. Електропривод з двигуном постійного струму послідовного збудження як термодинамічний перетворювач енергії // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2002. – № 449. – С.204-212.



Рисунок 9 — Залежність ККД насоса НМ-2500-230