

ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ГІРНИЧИХ РОБІТ

УДК 62-83-52.003 (082)

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РЕГУЛЬОВАНОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ В НАСОСНИХ УСТАНОВКАХ

О. М. Закладний, канд. техн. наук, О. О. Закладний, інж. (НТУУ «КПІ»)

Разработаны методика и программное обеспечение, позволяющие оценивать энергетическую и экономическую эффективность использования разных видов регулируемого электропривода в системах тепло- и водоснабжения.

Technique and software are developed that allow to estimate power and economic use efficiency of different regulated electric drives in warm-water supply systems.

Системи тепло- та водопостачання потребують регулювання продуктивності. Традиційні способи регулювання подачі насосних установок полягають у дроселюванні напірних ліній і зміні числа працюючих агрегатів за одним з технологічних параметрів. Ці способи регулювання спрямовані на розв'язання технологічних задач і практично не враховують енергетичних аспектів транспортування води. Таке регулювання призводить до підвищення тиску в мережі, перевитрат електроенергії, збільшення витоків та невиробничих втрат води, до підвищеного зносу устаткування.

Ефективним способом регулювання режиму роботи цих систем є кількісний спосіб, який полягає у зміні подачі насосних установок за допомогою регульованого електропривода.

Рис. 1 ілюструє можливості зниження потужності, що споживається двигуном насоса, при регулюванні швидкості електропривода в порівнянні з регулюванням дросельною заслінкою [1].

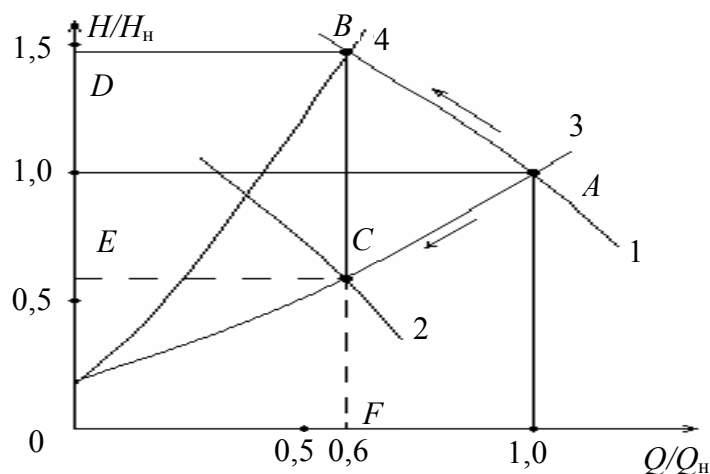


Рис. 1. Порівняння способів регулювання продуктивності насоса: 1 – характеристика насоса при номінальній швидкості двигуна; 2 – характеристика насоса при зниженій швидкості; 3 – характеристика магістралі; 4 – характеристика магістралі при регулюванні дроселем

При номінальних витраті і напорі насос працює в точці A , що відповідає характеристиці магістралі 3 і характеристиці $Q-H$ насоса (крива 1) при номінальній швидкості двигуна. Зі зменшенням витрати при нерегульованому електроприводі (на рисунку показана витрата, що складає $0,6Q_n$) за рахунок дросельного регулювання відбувається зміна опору магістралі (крива 4). Насос працює в точці B кривої 1, що приводить до зростання напору, який стає більшим від номінального. Потужність, споживана насосом, пропорційна площі прямокутника $ODBF$.

При використанні регульованого електропривода за рахунок зниження швидкості насос працює зі зниженою витратою в точці C , що відповідає іншій характеристиці $Q-H$ (крива 2) при незмінній характеристиці магістралі (крива 3). Потужність, споживана електроприводом у цьому випадку, пропорційна площі $OECF$, що наочно ілюструє можливість істотного зниження енергоспоживання при впровадженні регульованих електроприводів насосів.

На практиці постає задача вибору типу регульованого електроприводу, застосування якого слід аналізувати як з енергетичної, так і з економічної точок зору. Пропонується методика, яка дозволяє виконати розрахунки з використанням необхідного числа вихідних даних, а саме:

- номінальних параметрів насосних агрегатів і двигунів (потужність $N_{\text{спож}}$, ККД насоса η , двигунів і пристроїв, які застосовуються для регулювання);
- глибини регулювання λ (відношення мінімальної продуктивності установки Q_m до максимальної продуктивності Q_6);
- відносного протитиску H_n^* (відношення тиску, що відповідає максимальній продуктивності H_6 до протитиску H_n) як гідравлічної характеристики трубопроводу.

Надлишковий тиск на напірній лінії насоса створюється при його дроселюванні затвором або засувкою. При цьому додатково витрачається енергія. Економія електроенергії W_e за рахунок зняття надлишкового тиску обчислюється за формулою [2]

$$W_e = N_6 T \left\{ H_n^* \left(\frac{1,25}{H_n^*} - 1 \right) \frac{1}{4} (1 + \lambda) \left[2 - (1 + \lambda^2) \right] \right\}, \quad (1)$$

де $N_6 = 10^3 \cdot Q_6 H_6 / \eta$ – потужність, яка споживається насосом, кВт; T – час роботи насоса.

За своїми енергетичними характеристиками регульовані приводи поділяються на 3 основні групи:

- приводи з втратами ковзання – приводи з гідравлічними та електромагнітними муфтами ковзання (МК), електродвигуни з реостатом у колі ротора;
- приводи з рекуперацією енергії ковзання – асинхронно-вентильні каскади (АВК);
- приводи, які регулюються без втрат ковзання – частотно-регульовані приводи (ЧРП), вентильні двигуни (ВД) та багатошвидкісні двигуни.

Втрати ковзання в приводі істотно залежать від режиму роботи насосної установки, і їх можна розрахувати за формулою [2]

$$W_k = N_6 T \frac{1 - H_n^*}{3(1 - \lambda) \sqrt{1 - H_n^*/1,25}} \times \left[\left(3 \frac{H_n^*}{1 - H_n^*} - 2 \frac{H_n^*/1,25}{1 - H_n^*/1,25} + 1 \right) \times \sqrt{1 + \frac{H_n^*/1,25}{1 - H_n^*/1,25}} - \left(3 \frac{H_n^*}{1 - H_n^*} - 2 \frac{H_n^*/1,25}{1 - H_n^*/1,25} + \lambda^2 \right) \times \sqrt{\lambda^2 + \frac{H_n^*/1,25}{1 - H_n^*/1,25} - \frac{3}{4}(1 - \lambda^2)} \right] \times \sqrt{1 - \frac{H_n^*}{1,25} \left(1 + \lambda^2 + 2 \frac{H_n^*}{1 - H_n^*} \right)}. \quad (2)$$

Приводи з втратами ковзання. Втрати в таких приводах визначаються головним чином величиною втрат ковзання W_k . Інші втрати (на вентиляцію, тертя в підшипниках, щіткових контактах і т.п.) складають у середньому 5...10 % втрат ковзання, тому їх можна враховувати орієнтовно [2]

$$W_B = W_k + (0,05 \dots 0,1) W_k, \quad W_a \cong 1,075 W_e. \quad (4)$$

Приводи з рекуперацією енергії ковзання. В каскадних схемах втрати, що залежать від ковзання, складають

$$W_B = W_k (1 - \eta_k), \quad (5)$$

де η_k – ККД каскадної схеми перетворення.

Крім того, застосування каскадних схем збільшує постійні втрати в приводі, які, у свою чергу, складають 4...6 % споживаної потужності. Тому

$$W_B = W_k (1 - \eta_k) + (0,05 N_6 T). \quad (6)$$

Приводи, які працюють без втрат ковзання. Для агрегатів з частотним перетворювачем додаткові втрати обумовлені втратами в перетворювачі і деяким зниженням ККД двигуна через несинусоїдальність перетвореного струму

$$W_B = N_6 T (1 + \zeta - \eta_{пр}), \quad (7)$$

де $\zeta = 0,03 \dots 0,05$ – коефіцієнт, який враховує втрати за рахунок несинусоїдальності перетвореного струму; $\eta_{пр}$ – ККД перетворювача.

У двошвидкісних двигунах ККД на 2...3 % нижчий ніж в одношвидкісних, тому додаткові втрати визначають за формулою

$$W_B = (0,02 \dots 0,03) N_6 T. \quad (8)$$

Регулювання частоти обертання насосів зменшує споживання енергії, що витрачається на перекачування води, але викликає додаткові втрати енергії в приводі. Тому результуюча економія енергії дорівнює

$$W_p = W_e - W_b, \quad (9)$$

де W_e – економія енергії, яка отримується за рахунок регулювання частоти обертання насоса; W_b – додаткова витрата енергії на компенсацію втрат у приводі.

Режим роботи групи насосів відрізняється від режиму роботи одного насоса. В рівняння, які визначають результуючу економію енергії, вводиться коригувальний коефіцієнт ϕ . Надлишковий тиск, який створюється групою насосів, менший ніж тиск, що створюється одним насосом з еквівалентною подачею, тому економія енергії менша:

$$W_p = (W_e - W_b)\phi. \quad (10)$$

Значення коефіцієнта ϕ залежить від кількості робочих агрегатів (див. таблицю).

Число робочих агрегатів	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ϕ	1,0	0,75	0,66	0,56	0,5	0,47	0,44	0,42	0,4	0,38

Для оцінки економічної ефективності насосної установки прийняті такі показники ефективності капітальних вкладень:

- строк окупності (PP);
- дисконтований строк окупності (PPB);
- чиста приведена вартість (NPV);
- внутрішня норма прибутковості (IRR).

PP можна виразити в такий спосіб:

$$PP = \frac{K_3}{\text{ЧП} + A},$$

де K_3 – загальна вартість проекту; ЧП – чистий прибуток від проекту; A – амортизаційні відрахування.

PPB – час, необхідний для покриття початкових інвестицій за рахунок чистого грошового потоку, який генерується інвестиціями.

NPV – поточна вартість майбутніх грошових потоків інвестиційного проекту, визначається з урахуванням дисконтування, за винятком інвестицій, розраховується з використанням прогнозованих грошових потоків, пов'язаних із планованими інвестиціями за формулою

$$NPV = \sum_{i=1}^N \frac{NCF_i}{(1+r)^i} - INV,$$

де NCF_i – чистий грошовий потік для i -го періоду; INV – початкові інвестиції; r – ставка дисконтування (вартість капіталу, задіяного для інвестиційного проекту).

IRR – ставка дисконтування, при якій сумарна приведена вартість доходів від здійснюваних інвестицій дорівнює вартості цих інвестицій. IRR визначає максимальну вартість задіяного капіталу, при якій інвестиційний проект залишається вигідним. В іншому формулюванні, це середній доход на вкладений капітал, який забезпечується даним інвестиційним проектом.

Математичне визначення внутрішньої норми рентабельності

$$\sum_{j=1}^n \frac{CF_j}{(1 + IRR)^j} = INV,$$

де CF_j – вхідний грошовий потік у j -ий період; INV – значення інвестиції.

Ці показники, так само як і відповідні їм методи, використовуються в двох варіантах:

для визначення ефективності незалежних інвестиційних проектів (так звана абсолютна ефективність), коли робиться висновок про те, прийняти проект чи відхилити;

для визначення ефективності взаємовиключаючих проектів (порівняльна ефективність), коли робиться висновок про те, який проект прийняти з кількох альтернативних.

Кожний з методів аналізу інвестиційних проектів дає можливість розглянути окремі характеристики та особливості проекту. Найефективнішим засобом оцінки і вибору інвестиційних проектів слід визнати комплексне застосування всіх основних методів при аналізі кожного з цих проектів.

Авторами було розроблено програмне забезпечення для оцінки енергетичної та економічної ефективності використання регульованого електропривода в системах тепло- та водопостачання на базі методики, наведеної вище. Програмне забезпечення призначене для роботи на персональному комп'ютері в середовищі операційної системи WINDOWS. З його допомогою розраховується доцільність використання основних видів регульованого приводу (ЧРП, ВД, АВК, МК) в залежності від конкретних параметрів – потужності та ККД насоса, глибини регулювання, відносного протитиску в системі, виду електропривода, ККД приводу, ККД перетворювача, кількості працюючих насосів, періоду роботи насосної установки, ціни на електропривод, тарифу на електроенергію, коефіцієнта амортизації, ставки дисконтування, очікуваного строку життя проекту.

Програмне забезпечення має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача (рис. 2) і розраховує економічну ефективність за допомогою економічних показників (PP , PPB , NPV , IRR), видає порівняльну характеристику економічної доцільності застосування різних видів електроприводу, а також будує графіки залежності наведених показників від параметрів заданої системи. Останнє дозволяє оцінити доцільність використання регульованого приводу не лише в конкретній ситуації, а й у межах області значень параметрів, що дозволяє користувачу прийняти вірне рішення.

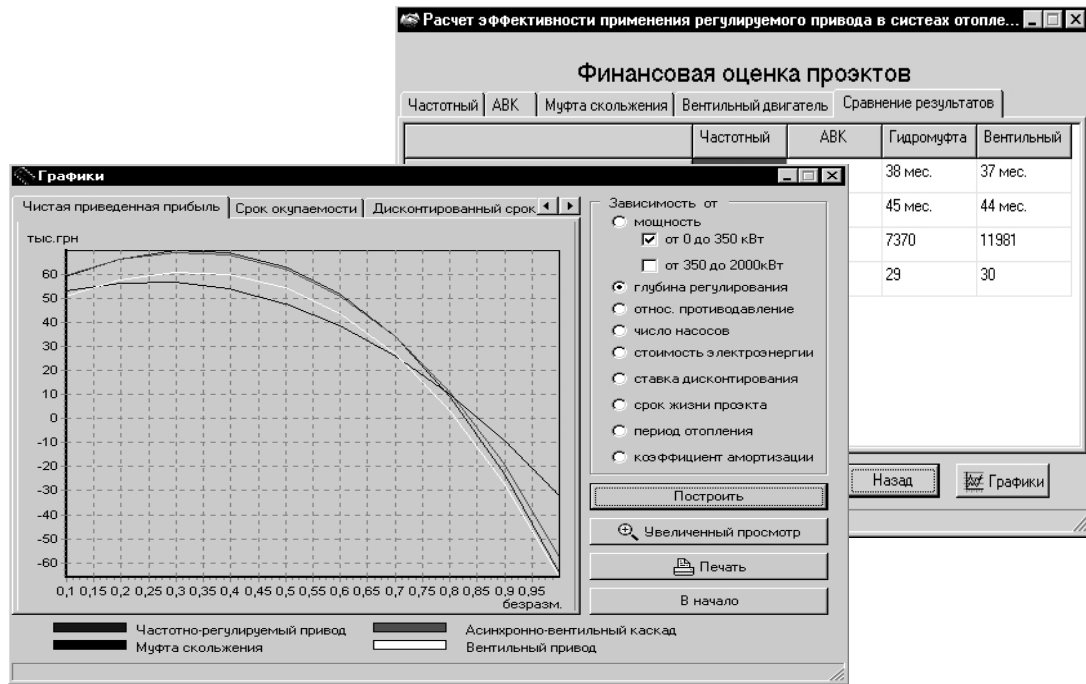


Рис. 2. Інтерфейс програмного забезпечення, що розраховує економічну ефективність впровадження різних видів регульованого електроприводу

На рис. 3 зображена залежність чистої приведеної вартості від глибини регулювання для порівнянних приводів при потужності двигуна 100 кВт. З рисунка видно, що для області значень глибини регулювання $\lambda = 0,1 \dots 0,83$ найвигіднішим є застосування ЧРП, а на області значень $\lambda = 0,84 \dots 1,0$ застосування регульованого приводу взагалі недоцільне. Можна зробити висновок – чим більша глибина регулювання, тим вигіднішим стає використання регульованого приводу. При потужностях електроприводу понад 150 кВт доцільнішим стає застосування ВД.

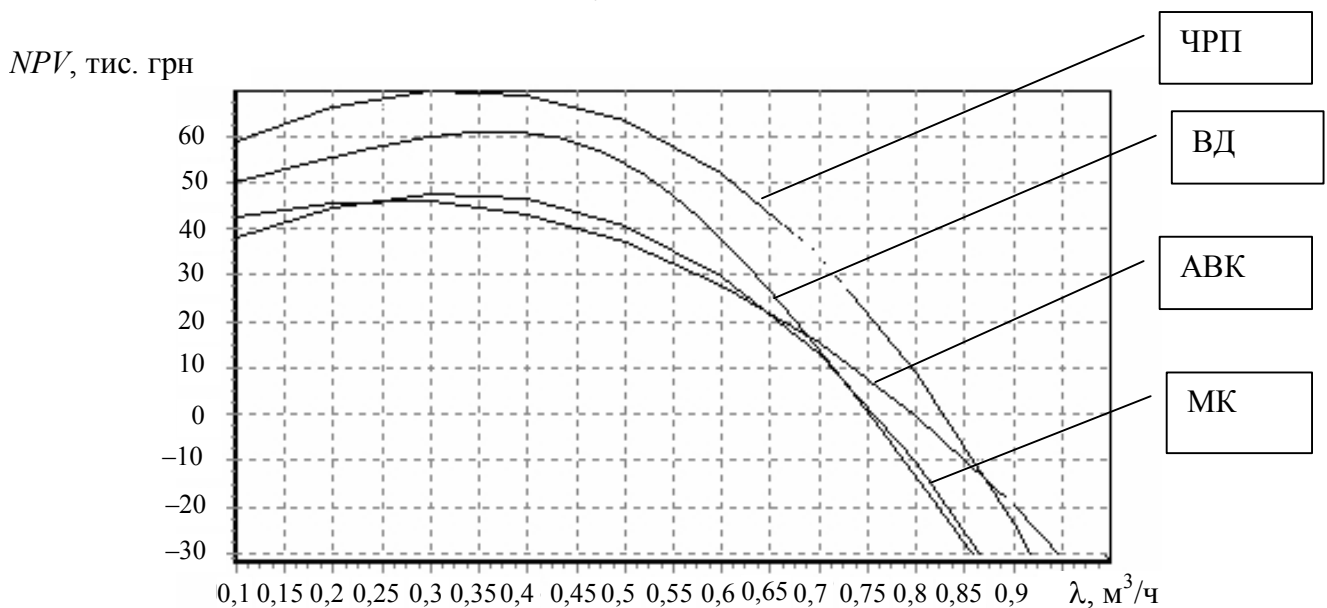


Рис. 3. Залежність чистої приведеної вартості від глибини регулювання для порівнянних приводів при потужності двигуна 100 кВт

На рис. 4 зображено залежність NPV від періоду опалювання T_0 при $\lambda=0,8$. Так, наприклад, для Києва $T_0 = 4224$ год., тому застосування ЧРП доцільне, а для Ялти, де $T_0 = 2856$ год., застосування цього приводу за тих самих умов є недоцільним. Тобто, чим триваліший період опалювання, тим вигіднішим стає застосування регульованого приводу.

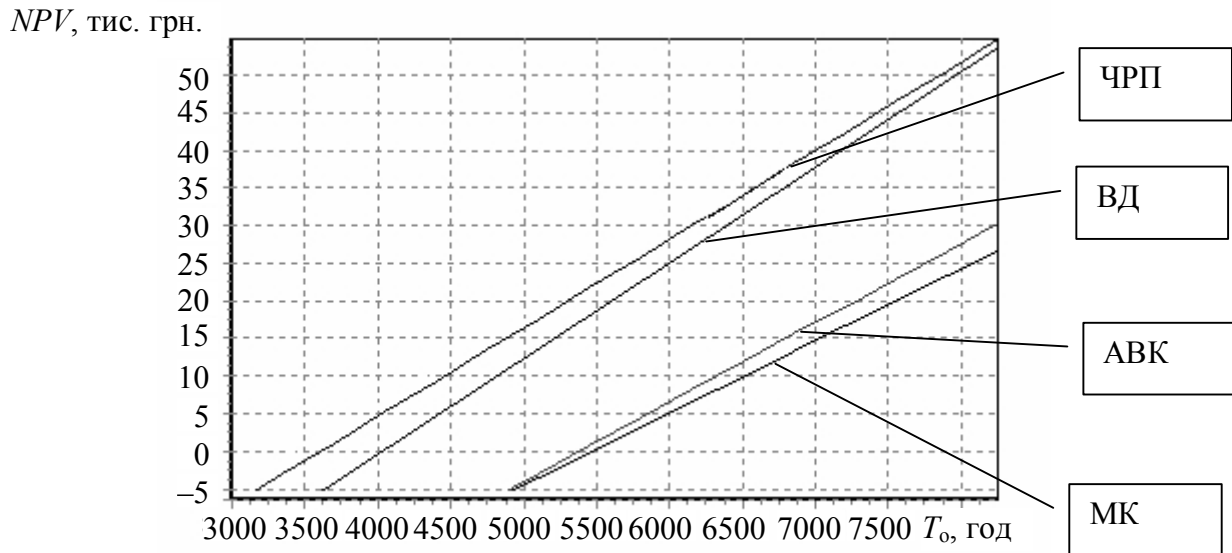


Рис. 4. Залежність чистої приведеної вартості від періоду опалювання T_0 при глибині регулювання 0,8

На рис. 5 зображено залежність NPV від ставки дисконтування r при $\lambda = 0,8$. Ставка дисконтування r – це ставка доходу, який можна одержувати на свої гроші, якщо інвестувати у проекти, не пов'язані з помітним ризиком (банківські депозити, стабільні цінні папери і т. ін.), тобто ставка «природного приросту грошей».

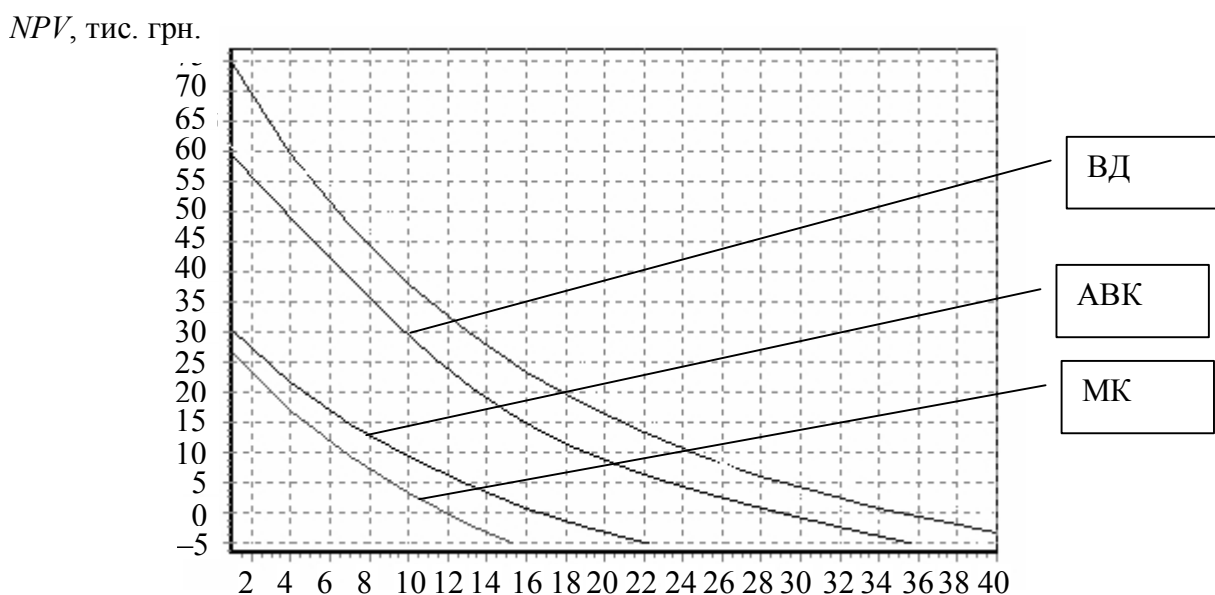


Рис. 5. Залежність чистої приведеної вартості від ставки дисконтування r при глибині регулювання $\lambda = 0,8$

З рис. 5 випливає, що чим вищий показник r , тим нижча NPV , при цьому якщо $r \leq 35\%$, то найдоцільнішим є застосування ЧРП.

На рис. 6 зображено залежність NPV від строку життя проекту $t_{ж}$. З рисунка видно, що починаючи від строку життя 4,5 роки, вигідним стає застосування ЧРП, а при строку 6,2 років – ВД, причому зі зростанням строку життя проекту різниця між економічною доцільністю застосування ЧРП та ВД зменшується.

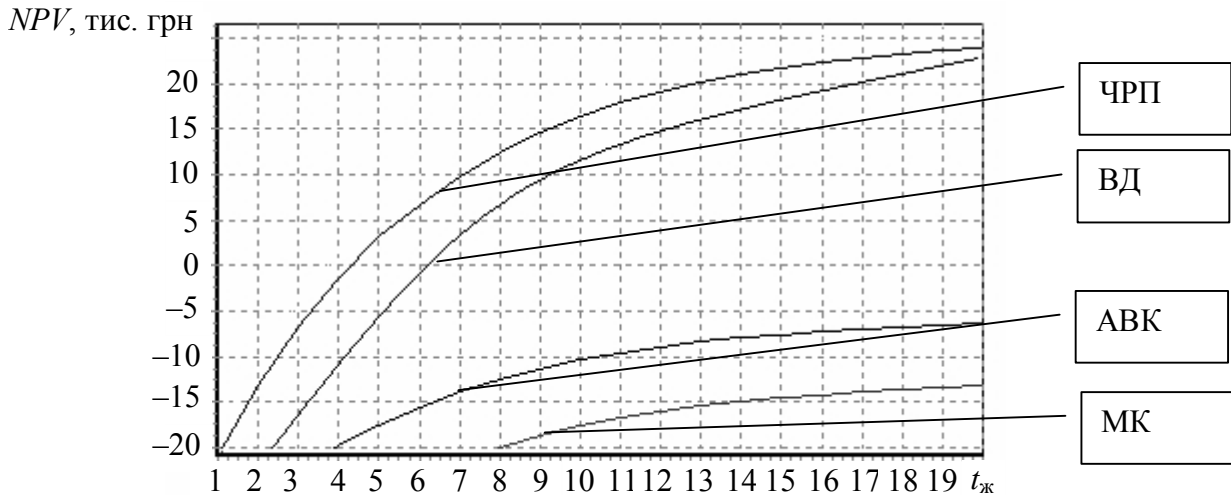


Рис. 6. Залежність чистої приведеної вартості від строку життя проекту

Розроблене програмне забезпечення дозволяє оцінювати енергетичну та економічну ефективність використання того чи іншого регульованого електропривода в системах тепло- та водопостачання.

Запропонована методика враховує основні параметри обладнання: потужність та ККД насоса, глибину регулювання, відносний протитиск у системі, тип електропривода, ККД привода, ККД перетворювача, кількість працюючих насосів, період роботи насосної установки, ціни на регульований електропривод, тариф на електроенергію, коефіцієнт амортизації, ставку дисконтування, очікуваний строк життя проекту. Остаточний вибір системи електропривода слід здійснювати за допомогою таких фінансових критеріїв, як чиста дисконтована вартість, внутрішня норма рентабельності та дисконтований строк окупності.

Програмне забезпечення, розроблене та експериментально перевірене при виконанні цієї роботи, може бути застосоване при проведенні енергетичного аудиту і в проектній практиці.

1. *Закладний О. М., Праховник А. В., Соловей О. І.* Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник. – К.: Кондор, 2005. – 408 с.

2. *Лезнов Б. С.* Экономия электроэнергии в насосных установках. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.

3. *Царев В. В.* Оценка экономической эффективности инвестиций. С.-Пб.: Питер, 2003. – 464 с.