

**ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ**



Чухрай Олег Миколайович

**Енергоефективне керування роботою електроприводних
насосних станцій**

Магістерська робота

Науковий керівник – к.т.н., доц. Яремак І. І.

Івано-Франківськ - 2021

Характеристика об'єкта дослідження



Рисунок 1 – Система магістральних трубопроводів України

Україна має розгалужену мережу транспортування нафти. Магістральні нафтопроводи (МН) пролягають територією 19 областей України (рис. 1). Основним завданням МН є перекачування заданого обсягу нафти за визначений період часу. На виконання цього завдання електроприводні насосні агрегати повинні створювати достатній напір для подолання всіх втрат.

Аналіз режимів роботи МН показав, що значну частку від загального

Метою магістерської роботи є

Дослідження способів енергоефективного керування електроприводом магістральних насосних агрегатів на нафтоперекачувальних станціях

2

Основні задачі роботи:

- ✓ здійснити аналіз енергетичних процесів в насосних агрегатах;
- ✓ розробити систему автоматичного керування електроприводом насосного комплексу магістральних нафтопроводів, яка дозволить застосувати алгоритм енергоефективного керування з урахуванням особливостей роботи окремих насосних агрегатів;
- ✓ вибрати та описати особливості функціонування перетворювача частоти;
- ✓ розробити методику визначення економічної ефективності впровадження регульованого електроприводу на НПС та розрахувати енергоефективність та термін окупності від впровадження розробленої системи автоматизованого керування на НПС «Жулин-2»;

Об'єктом дослідження є:

процеси підвищення ефективності роботи насосних агрегатів нафтоперекачувальних станцій в різних режимах експлуатації.

Предметом дослідження є :

наукові методи, технічні засоби і нормативне забезпечення зниження втрат енергії при транспортуванні нафти

Нафтоперекачувальні станції (НПС) магістральних нафтопроводів є складними енергоємними об'єктами, які обладнані насосними агрегатами (НА), що складаються, зазвичай, із відцентрового насоса (ВН) з приводом від синхронного двигуна (СД).

3

Для електроприводів магістральних та підірних агрегатів на НПС застосовуються **синхронні** двигуни напругою 6(10) кВ (рис.2), на які припадає 79% всієї встановленої потужності основних технологічних агрегатів; решта 21% складають асинхронні електродвигуни.

Діапазон номінальних потужностей асинхронних двигунів для приводу магістральних та підірних насосних агрегатів від 132 кВт до 12 МВт, синхронних двигунів – від 630 кВт до 14,5 МВт.

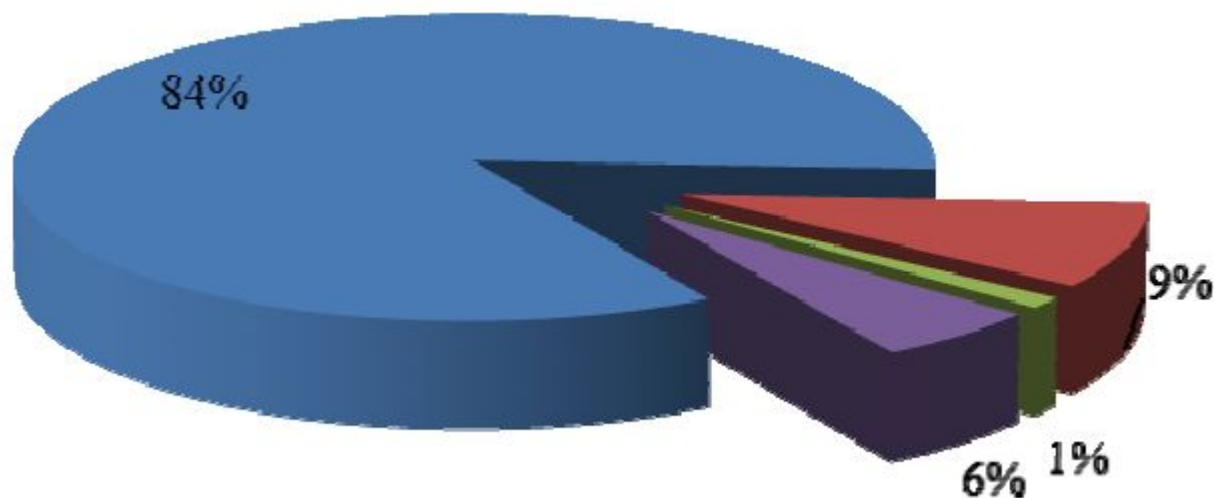


Рис. 2 Машинний зал НПС, в якому встановлені електродвигуни типу

СТД-2500-2

Баланс витрати енергоресурсів за видами у 2020 році подано на рисунку 3.

4



Електрична енергія - 84%

Котельне паливо – 9%

Моторне паливо – 6%

Теплова енергія – 1%

Рис. 3 Структура споживання енергоресурсів на НПС у 2020р

Отже для підвищення енергоефективності роботи насосних агрегатів НПС дозволить зменшити значення питомого споживання електроенергії для транспортування нафти.

Для аналізу режимів роботи електроприводних НПС в магістерській роботі сформовано структурну схему технологічної ділянки НПС, суміщену зі схемою електропостачання (рис.4). Як видно з рисунку для перекачування нафти на НПС встановлено 4 синхронних електроприводи (3 основних та один резервний) на валу яких розміщені магістральні насоси. Проте у зв'язку зі зменшенням об'ємів перекачування на даний час на НПС працює лише один електроприводний насос.

5

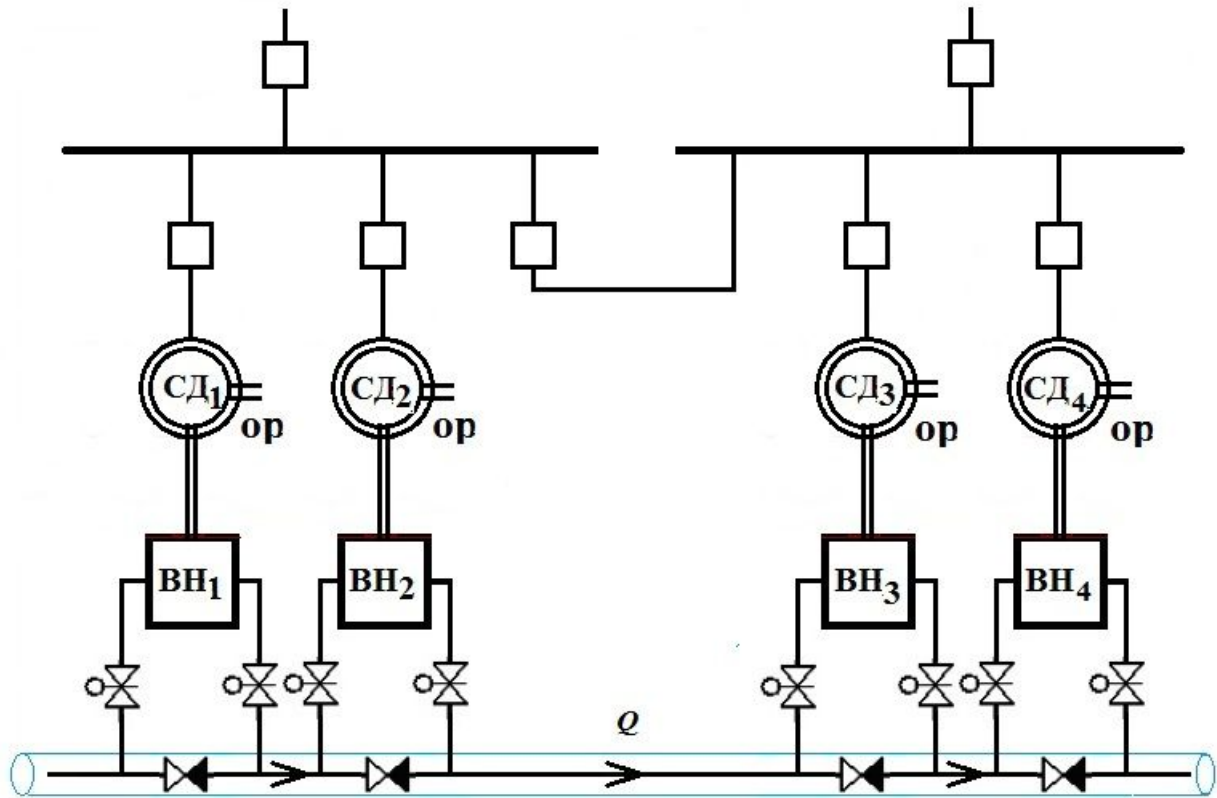


Рис. 4 Структурна схема технологічної ділянки НПС, суміщена зі схемою електропостачання

Для керування режимами роботи МН застосовують такі методи (рис. 5).



Рис. 5 Основні методи керування роботою НПС

Перелічені методи керування дозволяють забезпечувати режими роботи НПС, проте за таких умов насосні агрегати працюють в неоптимальних режимах, що спричиняє додаткові затрати електроенергії.

7

Для здійснення енергоефективного керування роботою НПС в роботі проаналізовано основні енергетичні процеси в елементах насосних станцій, а саме синхронних електроприводах (рис.6) та відцентрових насосах (рис.7)



Рис. 6 Електропривід МН СТД 2000



Рис. 7 Насос НМ2500-230

Структурно-функціональна та схема нафтоперекачувальної станції

Для дослідження режимів роботи електроприводу сформована структурна схема НПС, яка відображає перетворення електричної енергії в механічну та гідравлічну. Запропонована схема дозволяє виокремити перетоки енергії та втрати енергії в системі НПС

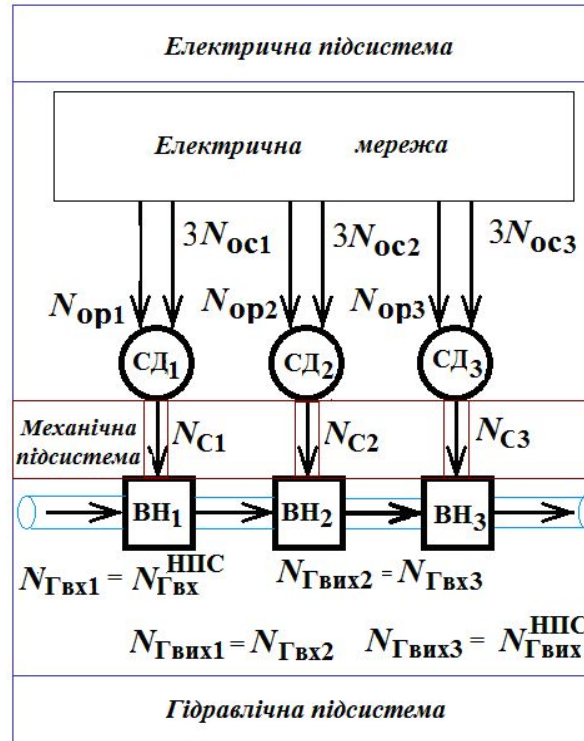


Рис.8. Структурна схема НПС

$$\begin{cases} N_{Гвихi} = N_{Гвxi} + N_{Ci} \\ N_{Ci} = N_{OPi} + 3N_{OCi} \end{cases} \quad (1)$$

N_{oc}, N_{op} - відповідно вхідні потужності обмоток статора та ротора;

N_C - механічна потужність на валу НА;

$N_{Гвихi}$, $N_{Гвх(i+1)}$ - відповідно гідравлічні вхідні та вихідні потужності ВН;

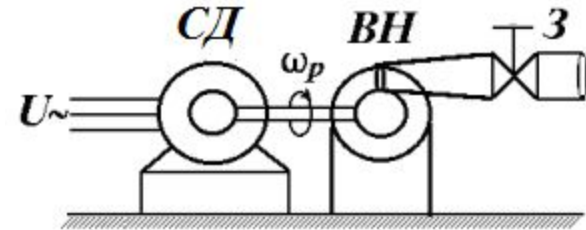


Рис.9 Насосний агрегат

$$\begin{cases} N_{Гвх1} = N_{Гвх}^{НПС} \\ N_{Гвих3} = N_{Гвх}^{НПС} \end{cases} \quad (2)$$

Для моделювання такої системи найкраще підходить математичний комплекс MatLab (Matrix Laboratory), а саме його розширення Simulink, яке вже містить майже всі блоки, необхідні для моделювання. Система рівнянь синхронної машини, що складається з блоків Simulink, і схема з механічною системою представлені на рисунку 10 та 11.

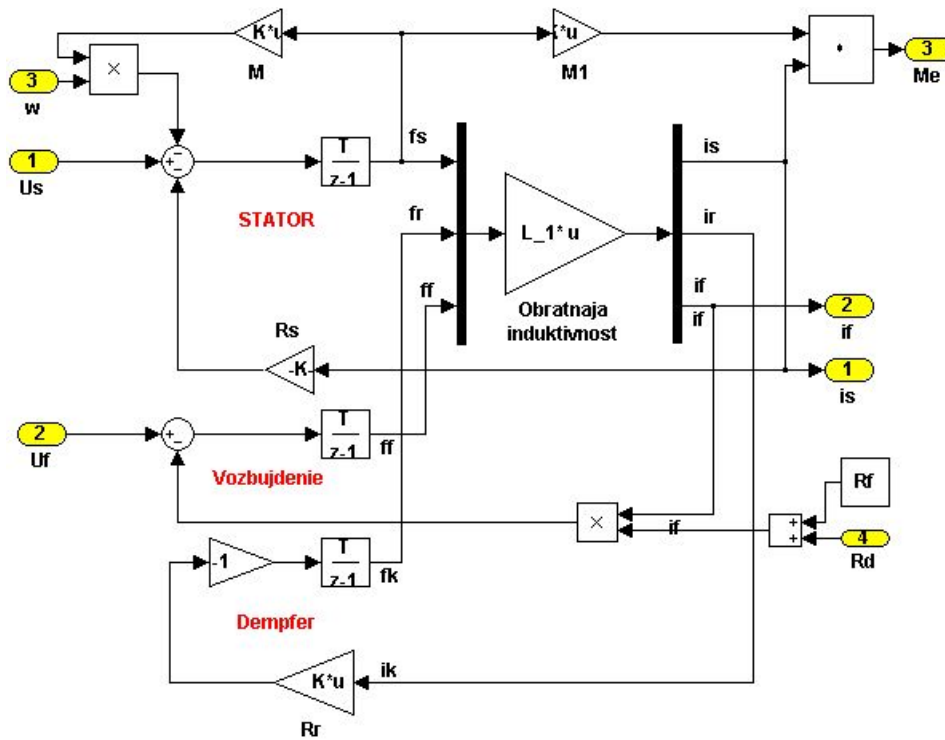


Рис. 10 Система рівнянь синхронної машини складена з блоків Simulink

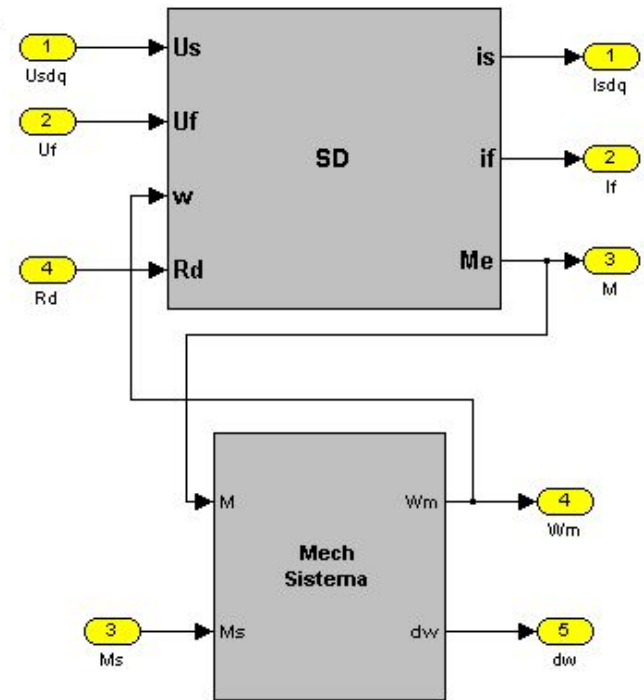


Рис. 11 Синхронна машина та механічна система

Запропонована математична модель дає змогу дослідити ефективність роботи СД та ВН у нафтоперекачувальних станціях України

10

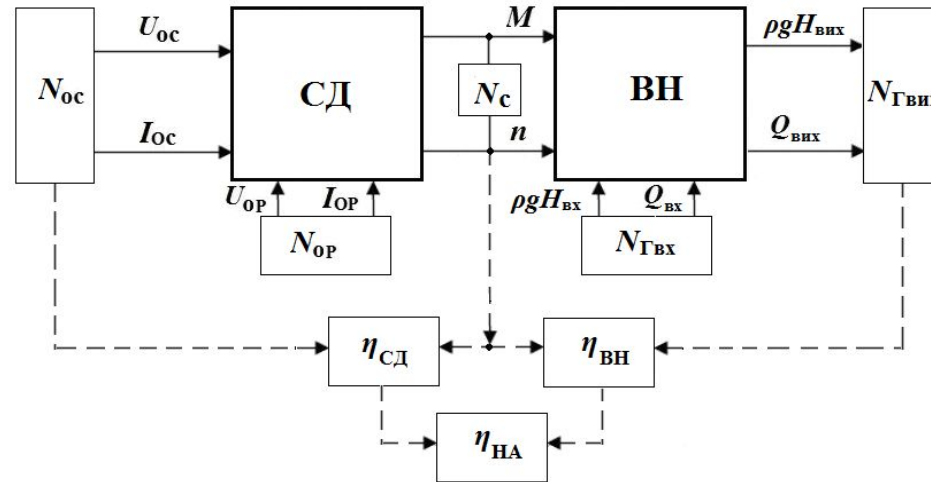


Рис.12 Структура енергетичної моделі насосного агрегата

Таблиця 1- Довідникові параметри синхронного двигуна СТД-2500-2

$N^{ном}$, кВт	$\cos\varphi^{ном}$	$U^{ном}$, В	$n^{ном}$, об/хв	$I^{ном}$, А	$\eta^{ном}$, %	x_d , %
2500	0,9	6000	3000	276	97,4	154,5

Таблиця 2 - Довідникові параметри магістрального насоса НМ-3600-230

$H_{д}^{ном}$, м	$Q_{д}^{ном}$, м ³ /год	$N_{с}^{ном}$, кВт	$n^{ном}$, об/хв	$\eta^{ном}$	$\eta_{вех}^{ном}$	n_s
230	3600	2593	3000	0,87	0,968	131

Математична модель СД, дозволяє визначити залежності ККД та потужності втрат від завантаження

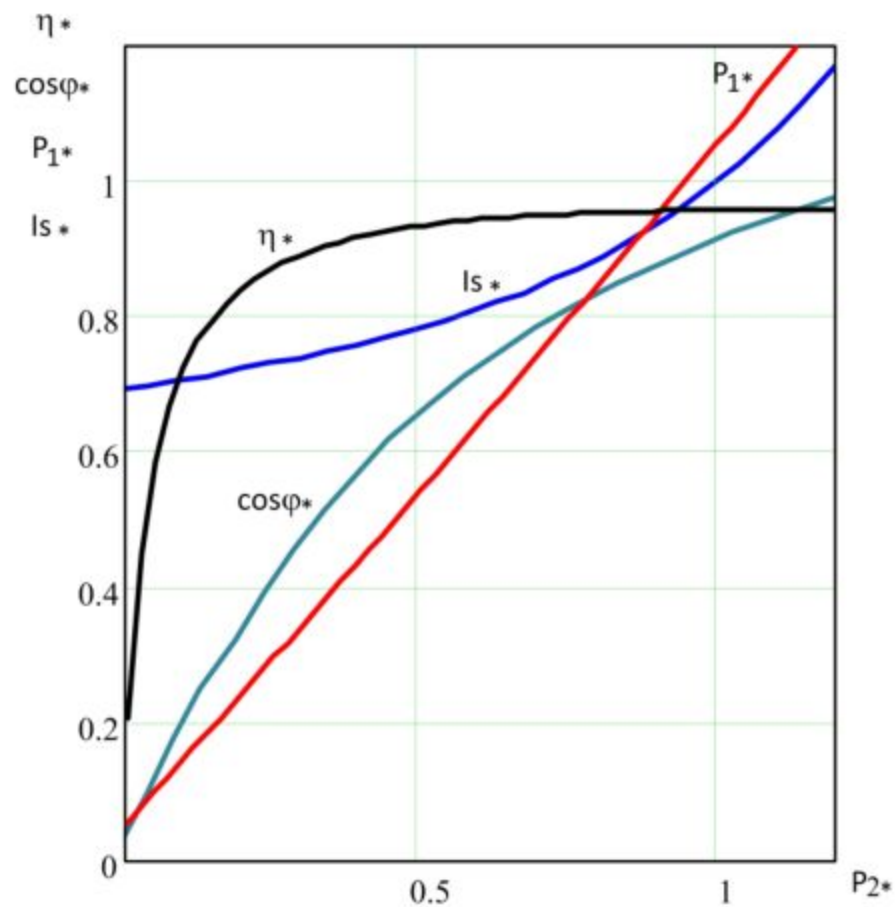


Рис. 13 - Робочі характеристики синхронного двигуна СТД-2500

Математична модель ВН, розроблена професором кафедри ЕЕМ Костишиним В.С. дає змогу дослідити ефективність роботи ВН та побудувати характеристику к.к.д. ВН залежно від витратного навантаження Q (рис.14)

$$\eta_{BH} = f(Q)$$

$$\eta_{BH} = \frac{\eta}{\eta_{ном}} = \frac{H Q}{N_c^{HX} + \left(\frac{1}{\eta_{BH}^{ном}} - N_c^{HX} \right) Q} \quad (7)$$

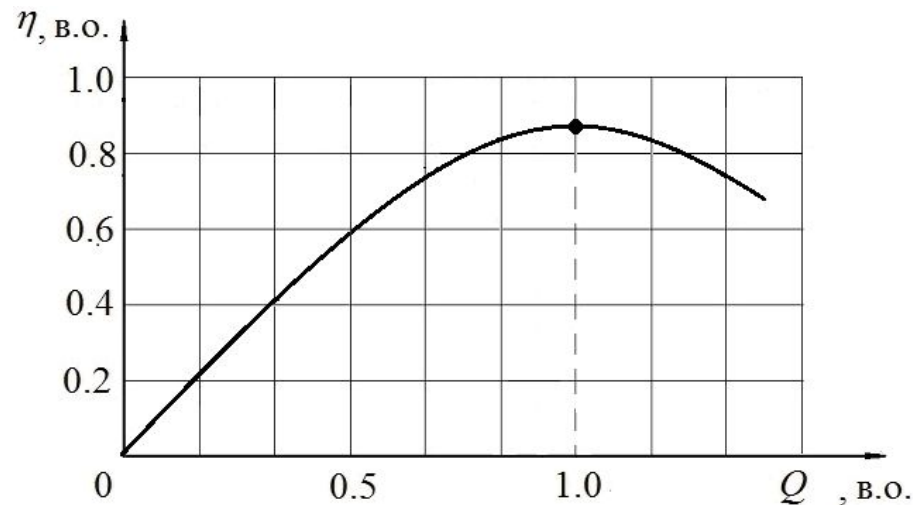


Рис.14. Залежність ККД ВН від витрати Q

$$\eta_{BH} = a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2 + a_3 Q^3 \quad (9)$$

Для дослідження роботи регульованого електроприводу сформовано математичну модель (рис. 15)

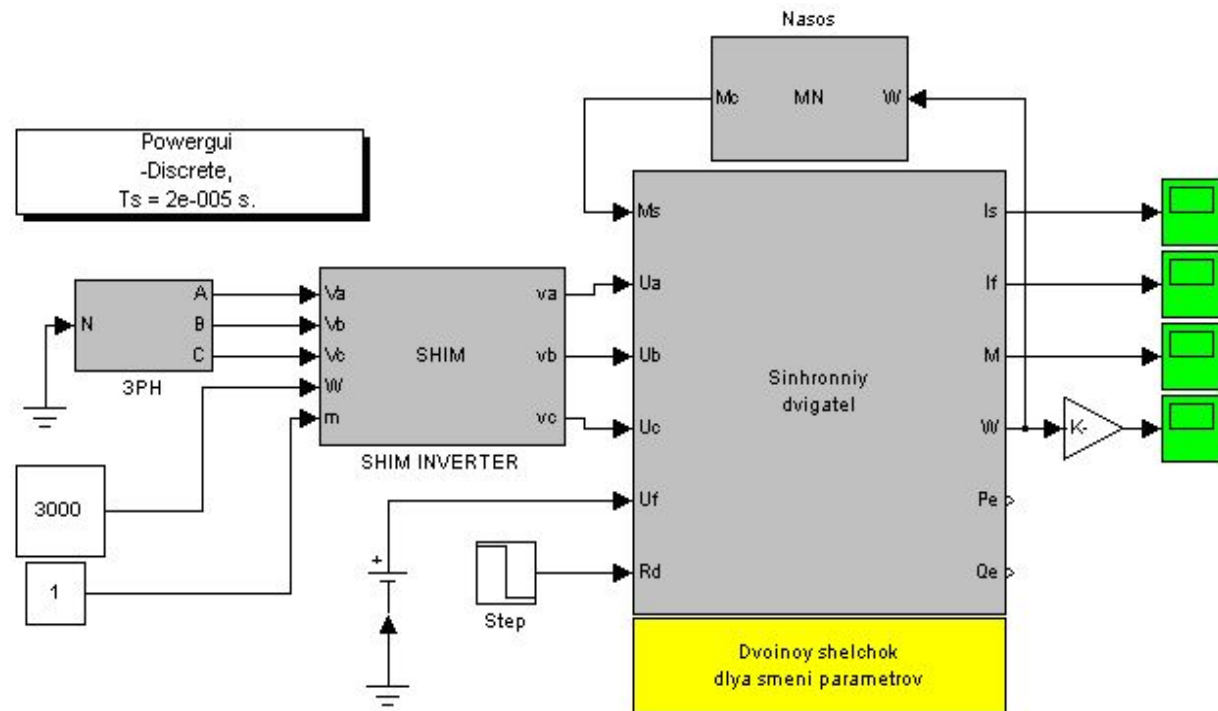


Рис.15. Загальна схема електроприводу насосного агрегата

Рис. 16 ілюструє залежність ККД насоса від зміни частоти обертання за допомогою сформованої вище моделі.

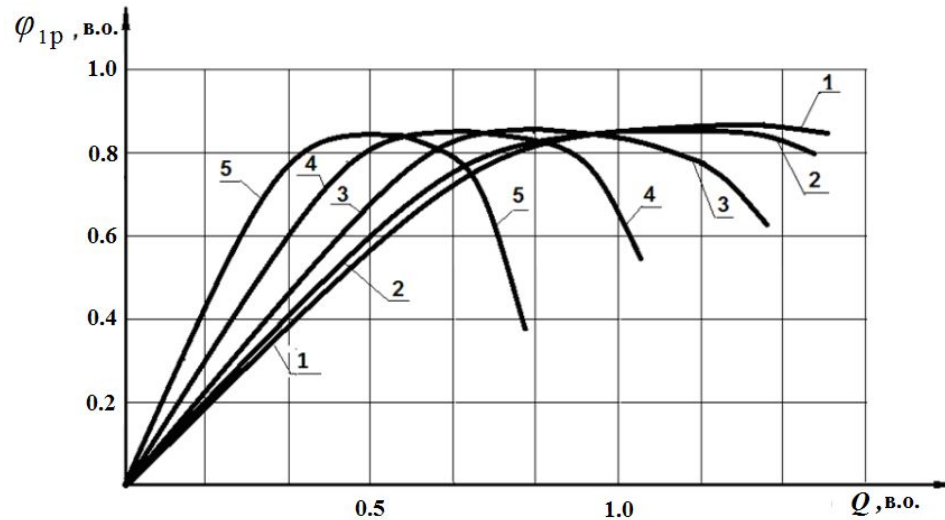


Рис.16. Залежність ефективності регульованого відцентрового насоса від витри при різних значеннях частоти обертання:

1 – $n=3500$ хв⁻¹; 2 – $n=3000$ хв⁻¹; 3 – $n=2500$ хв⁻¹;
4 – $n=2000$ хв⁻¹; 5 – $n=1500$ хв⁻¹

Як видно з рисунка максимальне значення ККД насоса за умови встановлення частотно-керованого електроприводу практично не змінюється. Що дозволяє зекономити спожиту електродвигуном енергію

Для керування роботою НПС на "Жулин" встановлено автоматизовану систему керування, яка відображається на моніторі оператора НПС (рис.17)

15

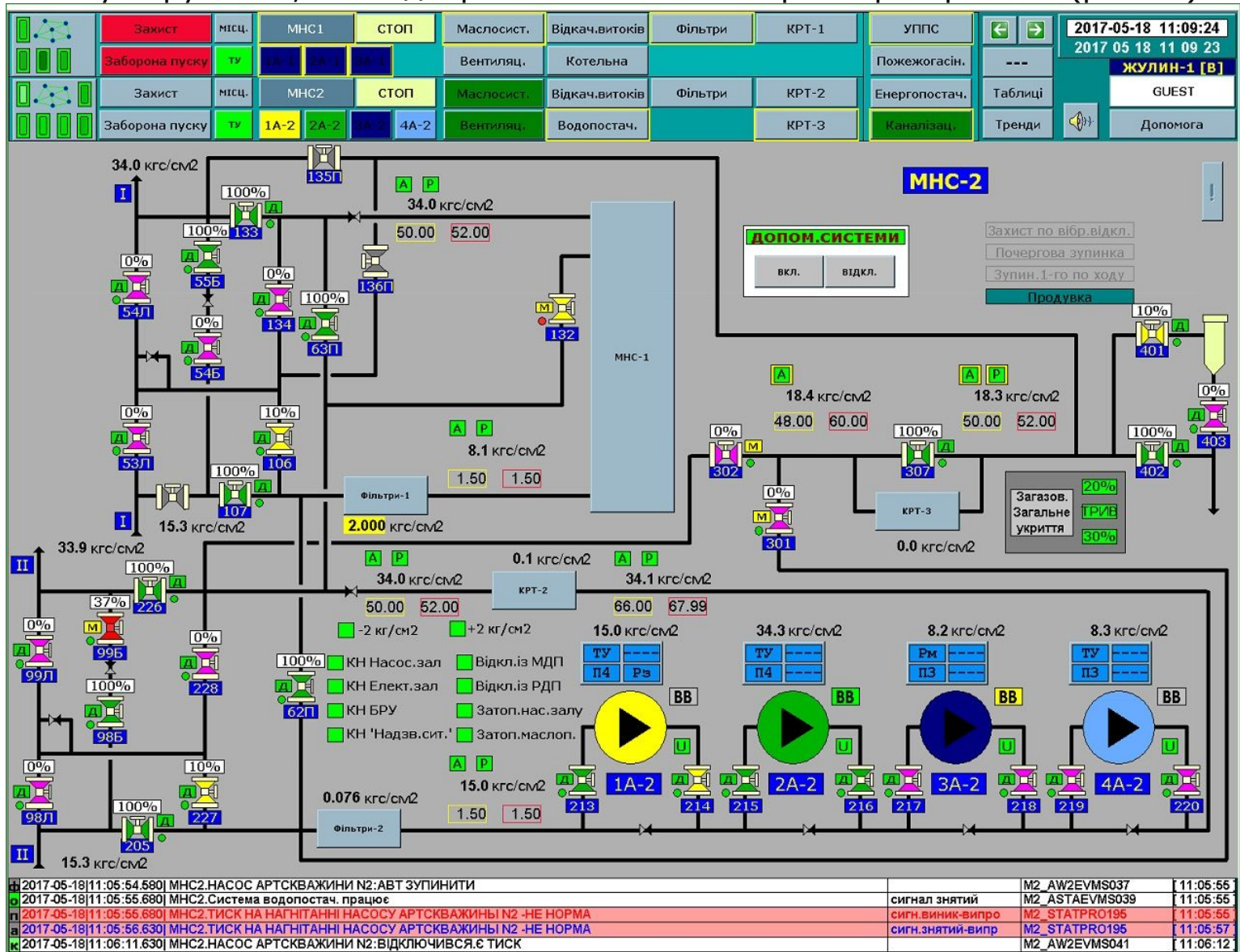


Рис. 17 - Автоматизована система керування технологічним процесом на НПС "Жулин"

Проте, встановлена на НПС "Жулин" автоматизована система керування, не дає можливості здійснювати енергоефективне керування роботою електроприводних насосних агрегатів. Тому в дані роботі розроблено структуру енергоефективної системи керування (рис.18)



Рис. 18 - Структура енергоефективної системи керування

Дану систему необхідно інтегрувати в діючу автоматизовану систему керування.

Енергоефективне керування роботою НПС доцільно здійснювати на різних етапах. Для цього розроблено трирівневу систему керування (рис.19)

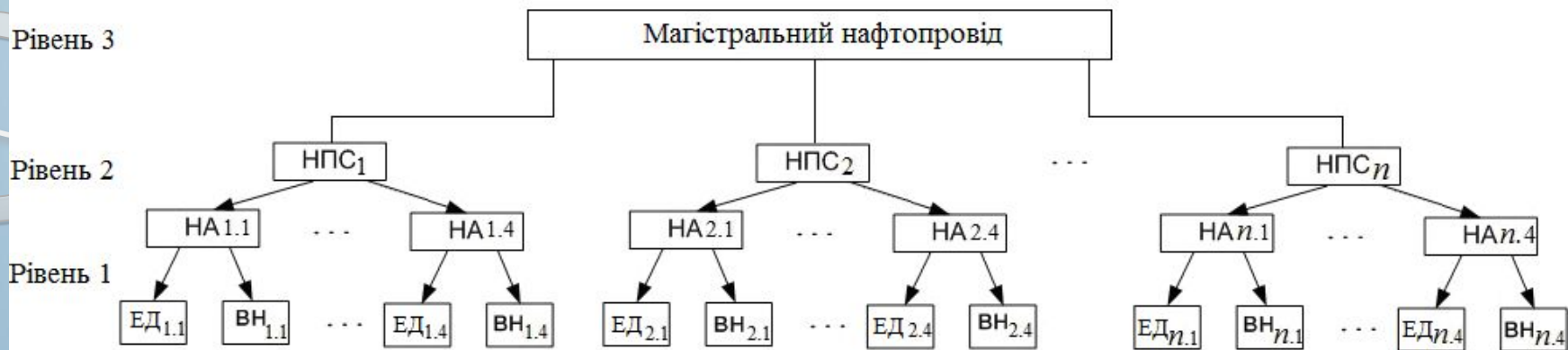


Рис. 19 - Ієрархія рівнів системи керування роботою ділянки магістрального нафтопроводу

Перший рівень – електроприводний насосний агрегат;
Другий рівень – нафтоперекачувальна станція;
Третій рівень – магістральний нафтопровід.

На основі проведених досліджень встановлено, що для здійснення енергоефективного керування на НПС необхідно встановити регульований електропривод. З цією метою вибрано перетворювач частоти (ПЧ) (рис. 20)

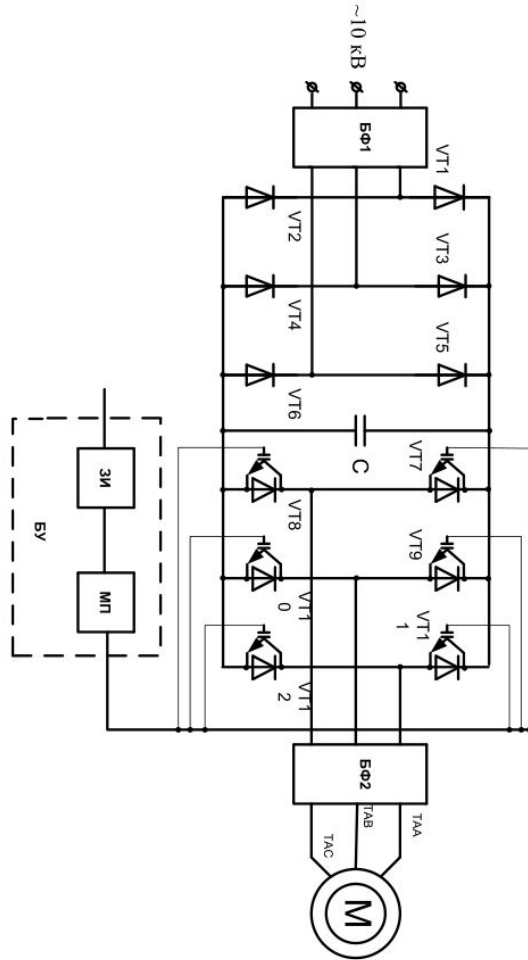


Рис. 20 – Принципова схема силових кіл ПЧ



Рис. 21 - Частотний перетворювач СТА-В9

На рис 22 наведена схеми підключення електродвигунів на нафтоперекачувальній станції та високовольтних частотних перетворювачів СТА-В9.HVI.

19

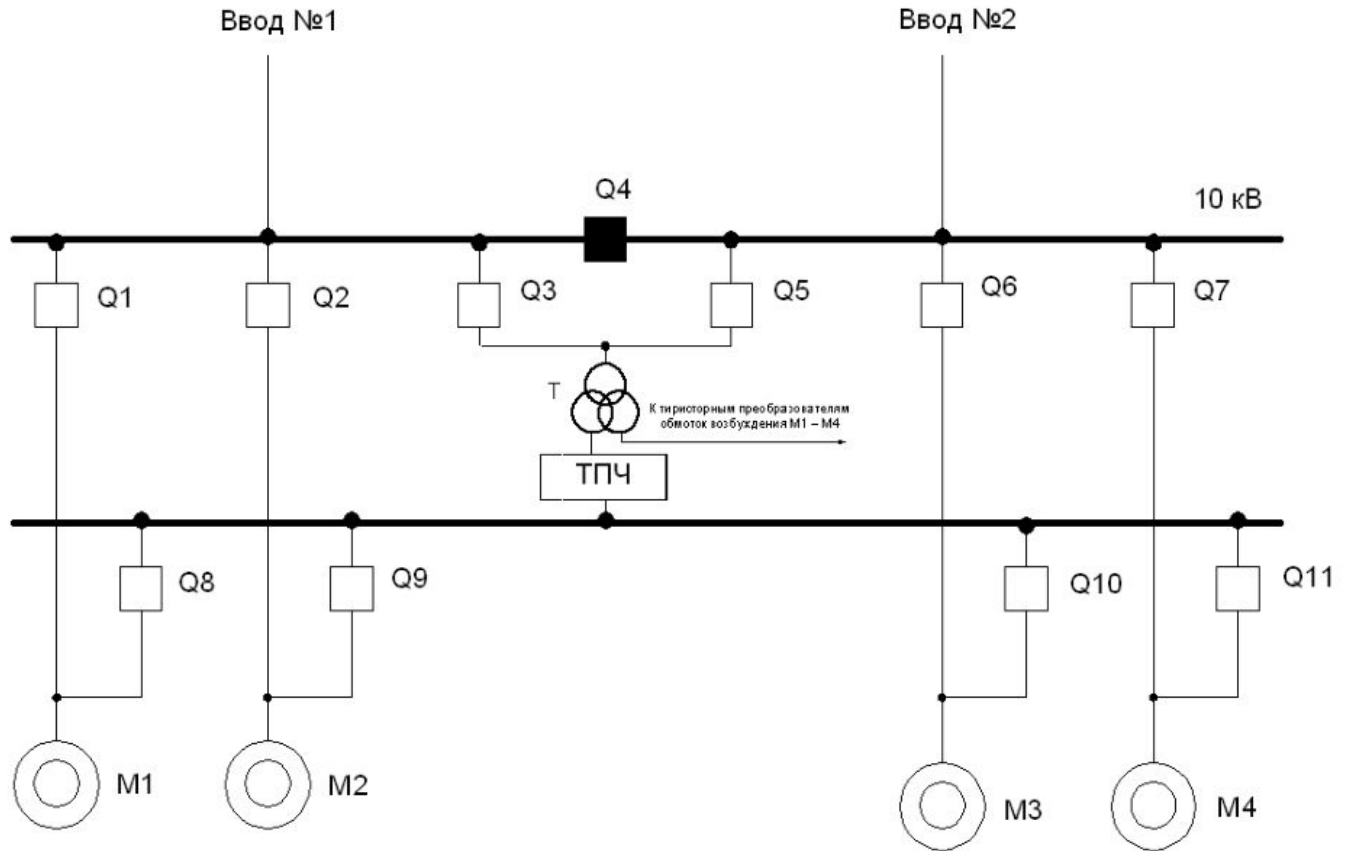


Рис. 22 – Принципова схема силових кіл ПЧ

Встановлення перетворювача частоти дасть змогу:

- **підвищити ККД** насосних агрегатів;
 - **зменшити споживання потужності** синхронними двигунами, знижується потужність, що передається, внаслідок чого знижуються втрати електричної енергії у мережі НПС;
 - **уникнути частого пуску** синхронних двигунів, що призводить до виходу їх з ладу;
- пуск СД - технологічно не простий процес, і частий запуск синхронних двигунів призводить до зниження надійності роботи насосних агрегатів. Застосування регульованого приводу забезпечить **плавний запуск СД** без стрибків струму та ударних хвиль тиску.

Для визначення економічного ефекту від застосування перетворювача частоти для регулювання швидкості обертання синхронного приводу насоса НПС та забезпечення стійкої роботи силового двигуна насосного агрегату за умов пуску під навантаженням проведено техніко – економічний розрахунок.

Методика розрахунку економічної ефективності встановлення регульованого електроприводу на НПС "Жулин"

Розрахунок проведено для життєвого циклу встановленого регульованого електроприводу. Термін життєвого циклу обладнання включає наступні основні стадії (етапи):

- Інвестиційну;
- Експлуатаційну;
- Ліквідаційну.

Для оцінки економічної ефективності інвестиційних проектів використано такі критерії:

- Чистий дисконтований дохід (ЧДД);
- Індекс прибутковості (ІП) (Якщо $ІД > 1$, то проект ефективний; якщо $ІД < 1$ – неефективний);
- Внутрішня норма дохідності (ВНД) (показує максимальну ставку плати за інвестиції, за якої вони залишаються беззбитковими);
- Термін окупності з урахуванням фактору часу (дисконтування).

Оскільки НПС є стратегічним об'єктом, то інформацію про об'єми перекачування нафти та величину спожитої електроенергії важко отримати, тому для визначення економії електроенергії задамось вихідними даними, наведеними в табл. 3

Таблиця 3 – Вихідні дані

№	Параметри	Числові значення
1	Наробка агрегатів, год	7058
2	Споживана для пекачування електроенергія, кВт·год	4160000
3	За рік прийнято та відкачено нафтопродуктів, тон	3220000

Визначення внутрішньої норми дохідності (ВНД) і терміну окупності проведено графічним методом.

Внутрішню норму дохідності складемо за рисунком 23, яка дорівнює коефіцієнту дисконтування, при якому ЧДД дорівнює нулю.

23

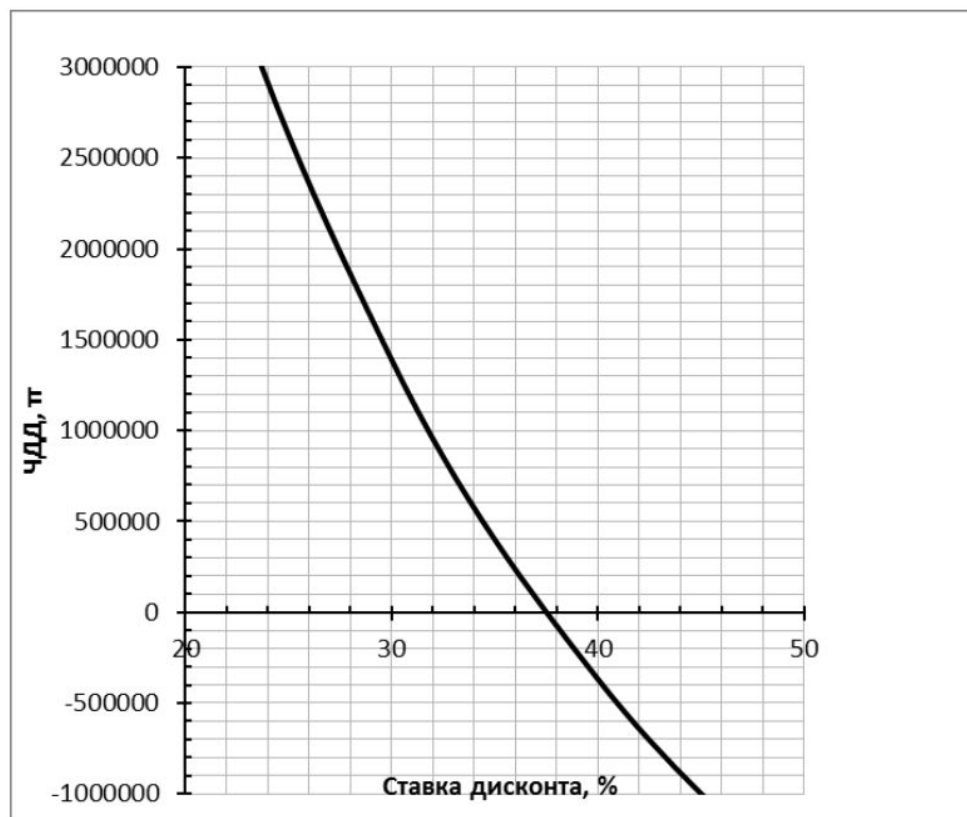


Рис. 23 – Визначення внутрішньої норми дохідності

З рисунку 23 видно, що значення ВНД = 36%. Дане значення більше ніж ставка рефінансування (24%) та більше ніж ставка дисконтування $E = 10\%$ для нафтової та газової промисловості, а в свою чергу нам відомо, що критерієм абсолютної ефективності інвестицій у спорудження проектного об'єкта служить умова перевищення ВНД над значенням ставки дисконтування $E_{ВН} \geq E$.

Грошовий
потік, грн

Визначаємо термін окупності згідно рисунку 24.

Моментом окупності з урахуванням дисконтування є початковий момент часу у розрахунковому періоді, після якого даний ЧДД є і надалі залишається невід'ємним і відповідно до графіка бачимо, що термін окупності складає 3,3 року. І це є ще одним позитивним показником економічної ефективності від використання перетворювача частоти.

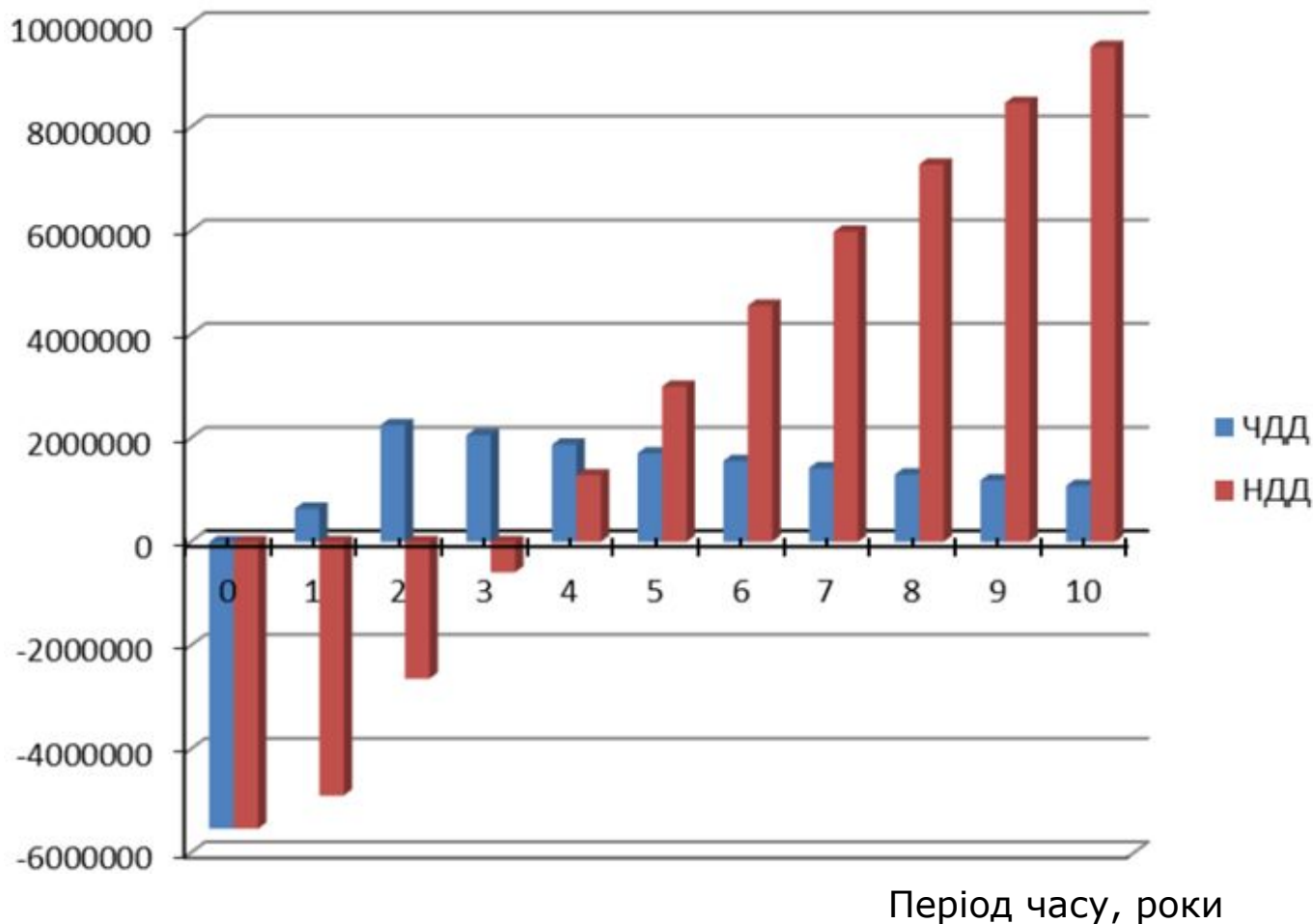


Рис. 24 – Потік коштів
ЧДД - Чистий дисконтований дохід
НДД - Накопичений дисконтований дохід

ВИСНОВКИ

25

- 1. На основі аналізу літератури визначено особливості енергетичних процесів в елементах насосних станцій, сформовано баланс потужностей.
- 2. Досліджено енергетичні процеси електроприводі та насосі на основі математичної моделі, розробленої за допомогою математичного комплексу MatLab (Matrix Laboratory), а саме його розширення Simulink.
- 3. Досліджено енергетичні процеси в магістральному насосі на основі математичної моделі, розробленої професором Костишиним В.С.
- 4. Наведено особливості роботи автоматизованої системи управління комплексом НПС “Жулин-2”, розроблено структурну схему енергетичної системи керування насосного агрегата.
- 5. Для визначення енергоефективних режимів сформовано структуру трирівневої ієрархічної системи керування ділянки магістрального нафтопроводу.
- 6. Представлено методику економічної ефективності впровадження регульованого електроприводу на нафтоперекачувальних станціях.
- 7. Проведено економічне обґрунтування та, безпосередньо, сам розрахунок, згідно зі стандартизованою методикою, розробленою для умов сучасного ринку.
- 8. Наведено оцінку доцільності впровадження та розраховано економічну ефективність встановлення частотного перетворювача на НПС “Жулин-2”.



Дякую за увагу