

Наука і сучасні технології

УДК 621.31.005+622.323

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ЦІЛЬОВИХ УМОВ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДНИХ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ МАГІСТРАЛЬНИХ НАФТОПРОВОДІВ

В.С.Костишин, І.І.Сорохтей

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15., тел. (03422) 48003
public@nung.edu.ua

Формализованы и синтезированы целевые условия для многокритериальной оптимизации переходных и квазиустановившихся режимов работы приводных синхронных двигателей с помощью методологии системного подхода. Построено области координатно-параметрического управления режимами нефтеперекачивающих станций, как сложного объекта, который состоит с двух подсистем разной физической природы.

Purpose conditions for multicriterion optimization of transitional and withstand working processes of driven synchronous engines are formalized and synthesized by using the methodology of the system approach. The areas of management of the oil pump stations in working processes are also created as the complicated object which consists of two subsystems of different physical natures.

Постановка проблеми. Вирішення надзвичайно важливих і актуальних задач енергозбереження на нафтоперекачувальних станціях (НПС) зумовлює необхідність розробки та реалізації алгоритмів оптимального керування приводними синхронними двигунами (СД), які, зазвичай, використовуються для привода відцентрових насосів (ВН).

В загальному випадку необхідно вирішити багатокритеріальну задачу, оскільки оптимальність режиму роботи НПС характеризується різноплановими показниками надійності, економичності і якості.

У випадку відсутності тиристорних перетворювачів частоти єдиним ефективним каналом впливу на режими роботи агрегату (крім напруги на шинах підстанції $U_{ш}$, значення якої залежить від випадкових зовнішніх збурень) є канал керування струмом збудження I_f . Тому задача полягає в синтезі законів поліоптимального керування цим параметром.

Аналіз результатів останніх досліджень. Перехідні та квазіустановлені режими роботи НПС спричиняють взаємопов'язані електромагнітні, механічні і гідравлічні процеси. Аналіз літературних джерел показав, що специфічна належність цієї області дослідження стику наук – електроенергетики і гідромеханіки – визначила

той факт, що із єдиного електрогідромеханічного процесу електроприводної НПС спеціалісти електрики виділяли для розгляду електромеханічні, а спеціалісти гідромеханіки – гідромеханічні складові. Але в дослідженнях багатьох фахівців вказано про необхідність системного підходу для комплексного аналізу режимів роботи НПС [1] як єдиної системи з підсистемами різної фізичної природи. Зроблена спроба вирішення задачі оптимізації квазіустановлених режимів вказаної системи в багатокритеріальній постановці [2]. Однак, слід зазначити, що у вказаній роботі не наведена методика розрахунку коефіцієнтів цільових функцій. Зокрема, сама цільова функція $\varphi_5(I_f)$ – забезпечення оптимального значення коефіцієнта запасу статичної стійкості K_z приводних СД, має неточності. Стосовно перехідних режимів роботи, то варто наголосити, що оптимальність перехідного процесу складної системи також необхідно оцінювати не одним, а комплексом критеріїв, які характеризують різнопланові показники якості перехідного процесу таких, як швидкодія, кваліфікаційність, чутливість тощо [3]. На даний час в літературі відсутній комплексний підхід в розгляді даної проблеми, який би давав змогу оптимізувати повний діапазон можливих режимів НПС.

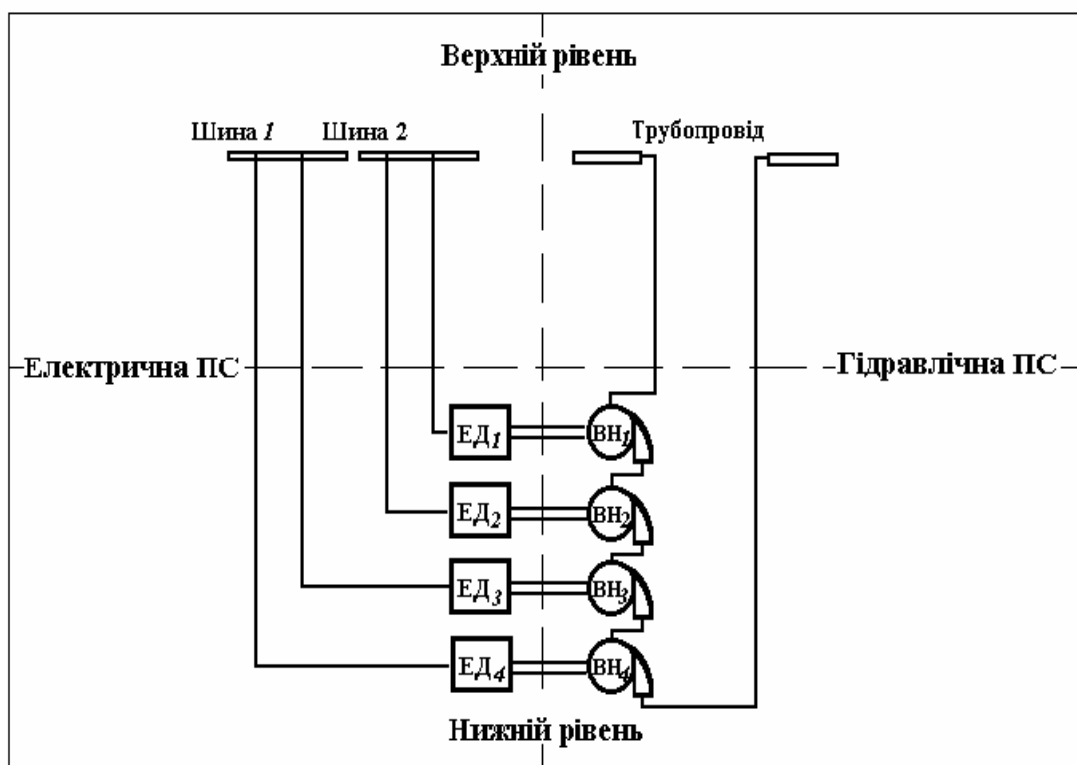


Рисунок 1 — Структурна схема НПС

Завдання досліджень. Метою роботи є формалізація та синтез цільових умов для багатокритеріальної оптимізації перехідних та квазіусталених режимів роботи приводних СД на основі методології системного підходу та побудова області координатно-параметричного керування режимами НПС, як складного об'єкту, що складається з двох підсистем різної фізичної природи. Важливою задачею є визначення поліоптимального значення керуючого змінного параметра – струму збудження для квазіусталених режимів роботи НПС, а також встановлення оптимальних законів керування цим параметром залежно від зміни чутливості кута навантаження СД до напруги для перехідних режимів.

Виклад основного матеріалу. З позицій системного підходу НПС магістрального нафтопроводу необхідно розглядати як складну двокомпонентну динамічну систему, що складається із взаємно пов'язаних електричної і гідравлічної підсистем, кожна з яких характеризується дворівневою структурою (рис.1) [1].

Верхній рівень охоплює електричну і гідравлічну мережі, обмін енергією між якими відбувається на нижньому рівні через вали насосних агрегатів.

Цільові умови (критерії) керування визначають такі основні показники функціонування НПС в квазіусталених і перехідних режимах роботи як економічність, надійність, живучість, якість перекачування тощо. Тому для здійснення оптимального керування приводними СД, режими роботи потрібно також розглядати з позицій системного підходу. Багатокритеріальність ві-

добрає діалектичні концепції розвитку, однак слід зазначити, що параметри розв'язків за переліченими критеріями мають суперечливий характер. Це означає, що досягнення оптимальних рішень за будь-яким одним критерієм незмінно спричинює погіршення інших, а тому визначення квазірезультуючого розв'язку в області узгодженого оптимуму можливе лише з позицій системного підходу із залученням евристичних процедур [4].

При суперечності основного комплексу цілей для визначення параметрів рішень використовуються такі методи багатоцільової оптимізації (БО):

- скалярного синтезу (побудова складного критерію оптимальності);
- абсолютної і відносної “справедливої поступки”, які приводять до адитивної або мультиплікативної форми запису цільових умов;
- методи побудови шкал переваг;
- оцінка рішень за узагальненою функцією корисності [5].

Така кількість методів зумовлена, насамперед, різноманітністю задач, що вирішуються, а також прагненням зменшити частку суб'єктивності в процедурі розв'язку багатоцільових задач. Очевидно, що уникнути застосування евристичних процедур в багатоцільових задачах не вдається, а тому прийняття рішень при багатьох критеріях надалі залишатиметься “наукою і мистецтвом” [4]. Однак, розв'язок задачі БО можна спростити шляхом побудови області координатно-параметричного керування режимами НПС, яка поділяє їх на квазіусталені, перехідні динамічно стійкі та нестійкі.

Запропонуємо наступні цільові умови оптимального керування струмом збудження I_f приводного СД для квазіусталеного режиму ($U_{ш} > 0,95 U_{шном}$) [2,6]:

$\varphi_1(I_f)$ – регулювання збудження на мінімум втрат енергії в СД;

$\varphi_2(I_f)$ – забезпечення якості електроенергії (мінімізація квадрата відхилення напруги живлення від номінального значення);

$\varphi_3(I_f)$ – підтримка у вузлі електричного навантаження оптимальної величини споживаної реактивної потужності;

$\varphi_4(I_f)$ – оптимізація функціональної надійності (мінімізація параметра потоку відмов СД);

$\varphi_5(I_f)$ – забезпечення оптимального значення коефіцієнта запасу статичної стійкості K_3 приводних СД.

Формалізацію цільових умов $\varphi_1(I_f)$ – $\varphi_5(I_f)$ для оптимізації квазіусталених режимів роботи НПС розглянемо на прикладі критерію $\varphi_5(I_f)$.

Коефіцієнт запасу статичної стійкості K_3 приводного СД будемо визначати з умови роботи машини з номінальною напругою $U_{шном}$ в режимі номінальної потужності навантаження на валу двигуна $N_{СДном}$. У цьому випадку [3] (рис. 2)

$$\varphi_5(I_f) = K_3 = \frac{N_{СД}^{max}}{N_{СД}} - 1 \Rightarrow \max; \quad (1)$$

де: $N_{СД}$, $N_{СД}^{max}$ — відповідно поточне та максимальне значення потужності на валу СД;

Θ — кут навантаження СД.

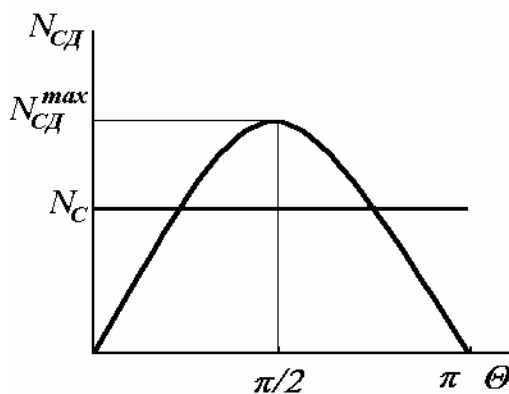


Рисунок 2 — Суміщені кутів характеристики СД та ВН

В квазіусталених режимах роботи агрегату потужності на валу СД та ВН є однаковими $N_{СД} = N_C$, а $N_{СД}^{max}$ (нехтуючи опором з'єднувальної кабельної лінії) розраховується за формулою [3]

$$N_{СД}^{max} = \frac{E(I_f)U_{ш}}{x_d}; \quad (2)$$

де: x_d — синхронний індуктивний опір СД; $E(I_f)$ — електрорушійна сила СД, залежність якої від струму збудження I_f визначається характеристикою холостого ходу машини (рис. 3). Цю характеристику можна апроксимувати поліномом другого степеня

$$E(I_f) = a_1 I_f^2 + a_2 I_f + a_3. \quad (3)$$

Спільний розгляд (1)-(3) дає змогу отримати робочу формулу для оптимізаційних розрахунків за критерієм $\varphi_5(I_f)$

$$\varphi_5(I_f) = \frac{(a_1 I_f^2 + a_2 I_f + a_3)U_{ш}}{N_C x_d} - 1 \Rightarrow \max. \quad (4)$$

Розглянемо числовий приклад формалізації критерію $\varphi_5(I_f)$.

На НПС встановлено три основних насосних агрегати з магістральними насосами НМ 1250-260 (потужність $N_C^{ном} = 1107$ кВт) та приводними електродвигунами СТД-1500-2Б, номінальні дані яких взяті з [8] (потужність $N_{СД} = 1500$ кВт; напруга $U_{ш} = 6$ кВ; струм збудження $I_{ш} = 168$ А; коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{ш} = 0,9$; відносне значення синхронного індуктивного опору $x_{*d} = 1,54$).

Залежність електрорушійної сили СД $E(I_f)$ від струму збудження I_f визначається характеристикою неробочого ходу машини (рис. 3).

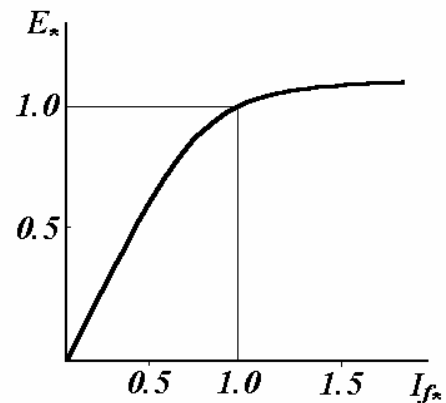


Рисунок 3 – Характеристика неробочого ходу СД

Дану характеристику апроксимовано поліномом другого степеня, коефіцієнти якого

$$a_1 = -0,2678;$$

$$a_2 = 1,214;$$

$$a_3 = 0,011.$$

Таким чином, підставивши значення коефіцієнтів у формулу (4) для електродвигуна типу СТД-1500-2Б, формула для оптимізаційних розрахунків за критерієм $\varphi_5(I_f)$ матиме вигляд

$$\varphi_5(I_f) = -0,0006956 \cdot I_f^2 + 0,00315 \cdot I_f - 1.$$

Аналогічно формалізовані цільові умови $\varphi_1(I_f) - \varphi_4(I_f)$ [4] для вказаного об'єкту:

1. Регулювання збудження на мінімум втрат енергії в СД

$$\varphi_1 = (0,0021 \cdot I_f^2 - 0,632 \cdot I_f + 49,763) \Rightarrow \min .$$

2. Врахування якості електроенергії (залежність квадрата відхилення напруги живлення U_{III} від I_f)

$$\varphi_2 = (994,8 \cdot I_f + 18271,7) \Rightarrow \min .$$

3. Регулювання збудження на підтримку у вузлі навантаження заданої величини споживаної реактивної потужності

$$\varphi_3 = (0,15 \cdot I_f^2 - 54,52 \cdot I_f + 5104,5) \Rightarrow \min .$$

4. Врахування функціональної надійності (залежність параметра потоку відмов СД від I_f)

$$\varphi_4 = (-1,21 \cdot 10^{-5} \cdot I_f^2 + 3,56 \cdot 10^{-3} \cdot I_f + 0,32) \Rightarrow \min .$$

Залежності $\varphi_1(I_f) - \varphi_4(I_f)$ побудовано шляхом апроксимації за методом найменших квадратів розрахункових даних, отриманих на імітаційній моделі вузла навантаження [2]. В загальному випадку критерії оптимізації $\varphi_1(I_f) - \varphi_5(I_f)$ мають суперечливий характер. Тому для визначення параметрів поліоптимального керування в квазісталених режимах НПС використано метод, запропонований Борисовим Р.І. [2], який ґрунтується на побудові компромісної області (узгодженого оптимуму) і визначенні результуючого рішення із залученням додаткових умов оптимальності. Таким чином, поліоптимальне значення керуючого змінного параметра становить

$$I_f = 141,04 A .$$

Згідно з встановленою структурною ієрархією НПС, в її перехідних режимах слід вимагати мінімального відхилення параметрів режиму для елементів верхнього рівня. Це передбачає забезпечення якісного (за напругою на шинах U_{III} і за частотою f в мережі) електропостачання (цільові умови $\varphi_6(I_f)$, $\varphi_7(I_f)$), та якісного (за тиском P і витратою Q) нафтоперекачування (цільові умови $\varphi_8(I_f)$, $\varphi_9(I_f)$)

$$\varphi_6(I_f) = \int_0^{t_{ag}} |U_{III} - U_{IIIном}| dt \Rightarrow \min ; \quad (5)$$

$$\varphi_7(I_f) = \int_0^{t_{ag}} |f - f_{ном}| dt \Rightarrow \min ; \quad (6)$$

$$\varphi_8(I_f) = \int_0^{t_{ag}} |P - P_{ном}| dt \Rightarrow \min ; \quad (7)$$

$$\varphi_9(I_f) = \int_0^{t_{ag}} |Q - Q_{ном}| dt \Rightarrow \min , \quad (8)$$

де t_{ag} — тривалість перехідного процесу.

На другому плані (нижній рівень) стоїть локальна оптимізація перехідних процесів окремих насосних агрегатів за узагальненим критерієм $\varphi_{10}(I_f)$ (максимальної стійкості і швидкодії, мінімальної коливальності тощо [1]), або за умовою $\varphi_{11}(I_f)$ – найшвидшого гасіння поля ротора з наступною ресинхронізацією СД [9].

Процедура вибору цільових умов $\varphi_{10}(I_f)$, $\varphi_{11}(I_f)$ для керування перехідними режимами ВН відрізняється диференційним підходом. Це означає, що вибір здійснюють залежно від конкретної ситуації, а саме: від величини і тривалості збурювальних впливів, а також багатьох інших факторів – обмежень, що накладаються на фазові координати, спрацювання пристроїв АПВ, АВР тощо.

Так, якщо в результаті наведених збурень СД не випадає із синхронізму, то варто використати керування за цільовою умовою $\varphi_{10}(I_f)$, що сприяє підтримуванню нормального режиму нафтоперекачування.

В іншому випадку, щоб не було несинхронного ввімкнення СД або недопустимих коливань напруги живлення в електромережі, вибирається цільова умова $\varphi_{11}(I_f)$ оптимального відновлення синхронної роботи СД. Цільова умова $\varphi_{10}(I_f)$ передбачає поєднання швидкодії і чутливості V кута навантаження δ СД до напруги живлення U . Запропоновано двовірний вектор чутливості

$$V = \left\{ \frac{\partial \delta}{\partial U}, \frac{\partial^2 \delta}{\partial U \partial t} \right\} . \quad (9)$$

Встановлено, що для підвищення стійкості ВН на першому (аварійному) інтервалі $[0, t_{ag}]$ зниження U чутливість повинна бути мінімальною, а на другому (відновлювальному) $[t_{ag}, t_{ном}]$ при підвищенні U – максимальною, при одночасному забезпеченні максимальної швидкодії. Задача розв'язана за допомогою змінного інтегрального модульного критерію оптимальності, який залежить від знаку похідної $\sigma = \left\{ \frac{\partial U}{\partial t} \right\}$, яка відображає напрям зміни напруги

$$j = \begin{cases} \int_0^{t_{ag}} \varphi_{0(1)} dt & \text{при } \sigma < 0 \\ 0 & \\ \int_0^{t_{ag}} [\varphi_{0(1)} (\varphi_{0(1)} - 1)^{-1}] dt & \text{при } \sigma > 0 \end{cases} , \quad (10)$$

$$\text{де: } \varphi_{0(1)} = 1 + \left| \frac{\partial \delta}{\partial U} \right| + \gamma \left| \frac{\partial^2 \delta}{\partial U \partial t} \right| ;$$

γ – ваговий коефіцієнт, який за результатами досліджень [3] дорівнює

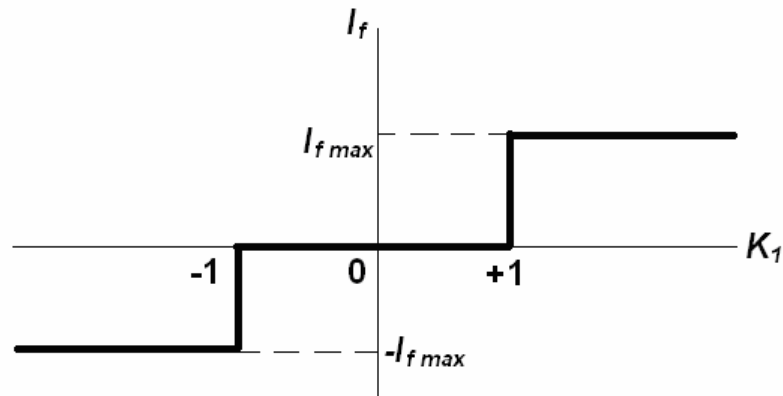


Рисунок 4 – Закон оптимальної зміни струму збудження СД на аварійному інтервалі $\sigma < 0$

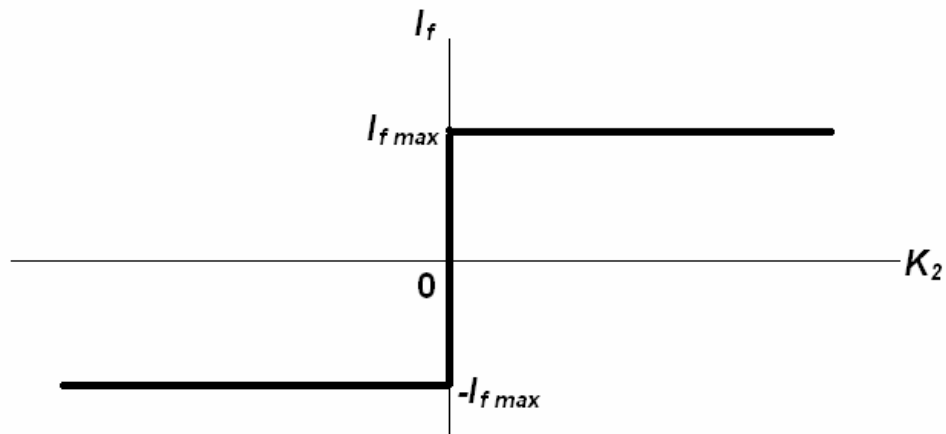


Рисунок 5 – Закон оптимальної зміни струму збудження СД на відновлювальному інтервалі $\sigma > 0$

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{при } \sigma < 0 \\ 1 & \text{при } \sigma > 0 \end{cases}$$

Відповідно для етапів пониження і відновлення напруги, застосовуючи ітераційні числові методи з використанням принципу максимуму Л.С. Понтрягіна [10], отримано релейні закони (рис. 4 і 5) поліоптимального керування збудженням приводного СД.

Моменти перемикання полярності максимального збудження $I_{f \max}$ і тривалість пауз відсутності керування визначаються залежно від значень контрольованих функцій k_1, k_2 [3].

Узгодження цільових умов $\varphi_6(I_f) - \varphi_{11}(I_f)$ оптимального керування перехідними режимами НПС доцільно виконати шляхом переведу критеріїв вищого рівня $\varphi_6(I_f) - \varphi_9(I_f)$ в розряд обмежень [1]. Тому за допомогою математичної моделі НПС для різних значень максимального струму збудження $I_{f1}^{max} > I_{f2}^{max} > I_{f3}^{max}$ були визначені області синхронної динамічної стійкості (нижче граничної кривої) насосного агрегату в координатах глибини та часу аварійного зниження напруги U_{III} на шинах підстанції (рис. 6).

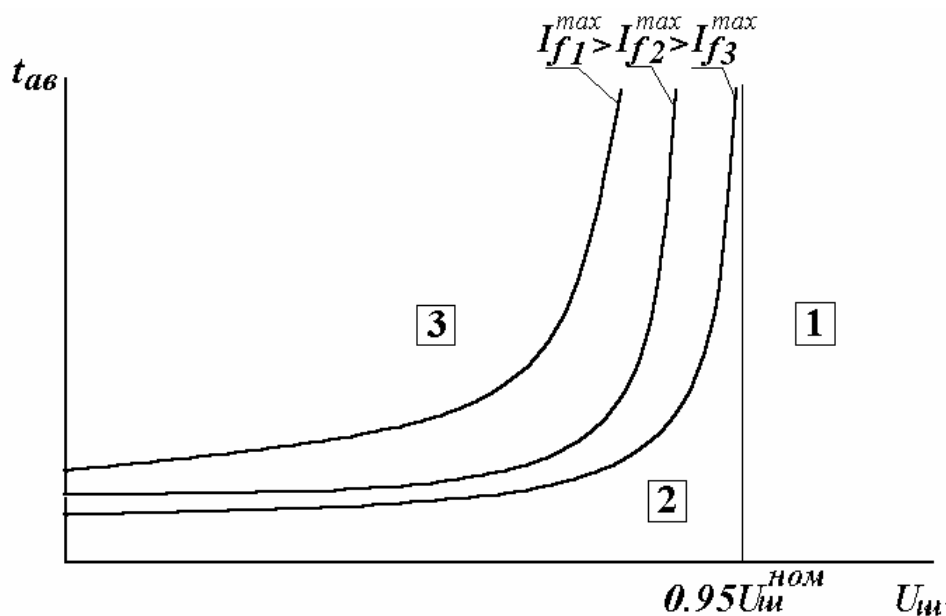
Координатно-параметричне керування режимами роботи НПС здійснюють за допомогою регулятора змінної структури [1], який вибирає оптимальний закон керування залежно від поточного стану системи.

Висновки. В статті запропоновано та формалізовано цільові умови поліоптимізації режимів роботи електроприводних насосних станцій магістральних нафтопроводів для підвищення ефективності їх функціонування.

З цією метою:

1. Вперше, на основі методології системного підходу, синтезовано цільові умови оптимізації перехідних та квазіусталених режимів роботи приводних СД і побудовано області координатно-параметричного керування режимами НПС, як складного об'єкту, що складається з двох підсистем різної фізичної природи.

2. Показано числовий приклад формалізації цільових умов $\varphi_1(I_f) - \varphi_5(I_f)$ для критерію $\varphi_5(I_f)$ – забезпечення оптимального значення коефіцієнта запасу статичної стійкості K_3 приводних СД і отримано поліоптимальне значення керуючого змінного параметра – струму збудження I_f для квазіусталених режимів роботи НПС.



- 1 – квазіусталеними режимами (за критеріями $\varphi_1(I_f) - \varphi_5(I_f)$);
- 2 – динамічно стійкими перехідними режимами (за критеріями $\varphi_6(I_f) - \varphi_{10}(I_f)$);
- 3 – динамічно нестійкими перехідними режимами (за критерієм $\varphi_{11}(I_f)$)

Рисунок 6 — Области координатно-параметричного керування режимами НПС

3. Формалізовано цільові умови оптимізації $\varphi_6(I_f) - \varphi_{11}(I_f)$ та отримано поліоптимальні закони керування залежно від чутливості кута навантаження δ СД від напруги U .

Література

1 Борисов Р.И. Костышин В.С. Полиоптимальное управление неустановившимися режимами узлов нагрузки нефтеперекачивающих станций // Изв. академии наук СССР: Энергетика и транспорт. – 1987. – № 4. – С. 122-126.

2 Борисов Р.И., Костышин В.С., Тайлих Я.В. Оценка экономичности решений в многоцелевой оптимизации управления функционированием объектов и систем энергетики // Изв. вузов СССР: Энергетика. – 1986. – № 11. – С. 3-8.

3 Костышин В.С. Полиоптимальное управление электромеханическими переходными процессами перекачивающих станций магистральных нефтепроводов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Свердловск, 1987. – 46 с.

4 Ларичев О.И. Наука и искусство принятия решений. – М.: Наука, 1979. – 200 с.

5 Брахман Т.Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике. – М: Радио и связь, 1984. – 288 с.

6 Костышин В.С., Писиголовец Л.Ф., Тайлих Я.В. Многоцелевая оптимизация управления функционированием и развитием систем электроснабжения предприятий нефтяной и газовой промышленности // Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 1987. – Вып. 24. – С. 94-97.

7 Винославский В.Н. Переходные процессы в системах электроснабжения – К.: Вища школа, 1989. – 422 с.

8 Слодарж М.М. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей. – М.: Энергия, 1977. – 216 с.

9 Жохов Б.Д., Колочкова О.В. Самозапуск синхронных электродвигателей с тиристорным возбуждением // Пром. энергетика. – 1975. – № 3. – С. 8-10.

10 Петров Ю.П. Использование «принципа максимума» для нахождения оптимального закона регулирования синхронных машин // Электричество. – 1964. – № 10. – С. 37-38.