



КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОГО КОМПЛЕКСУ НА ПІДСТАВІ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ

Розроблено закони координатно-параметричного поліоптимального керування перехідними та усталеними режимами експлуатаційної ділянки магістрального нафтопроводу. За допомогою системного підходу магістральний нафтопровід представлено як складний ієрархічний електрогідрравлічний комплекс, який містить електричну та гідравлічну підсистеми. Поєднано поліоптимальне керування усталеними та динамічними режимами роботи ієрархічної електрогідрравлічної системи. Встановлено, що режими роботи нафтоперекачувальних станцій України відрізняються від номінальних і потребують розроблення та реалізації алгоритмів оптимального керування. Визначено критерії глобальної оптимізації верхнього рівня та локальної оптимізації нижнього рівня ієрархічної системи експлуатаційної ділянки магістрального нафтопроводу. Встановлено, що ці критерії взаємозв'язані та мають суперечливий характер. Розроблено закони дискретно-неперервного керування збудженням синхронного електродвигуна. За допомогою регулятора змінної структури реалізовано алгоритми координатно-параметричного поліоптимального керування, що дало змогу підвищити стійкість та ефективність роботи електродвигуна та насоса з одночасним збереженням необхідної якості електропостачання та нафтоперекачування. Вимоги до характеристик регулятора сформовано на підставі отриманих законів керування. Вперше виконано комплексне дослідження роботи ієрархічної електрогідрравлічної системи, що дало змогу поєднати закони поліоптимального керування усталеними та динамічними режимами електроприводних насосних агрегатів. Розроблено функціональну схему автоматичного регулятора для реалізації координатно-параметричного керування режимами експлуатаційної ділянки магістрального нафтопроводу. Розв'язок оптимізаційної задачі керування перехідними режимами електрогідрравлічного комплексу дає змогу за незначного збільшення часу перехідного процесу досягти розширення результуючої області стійкості насосного агрегату. Підвищення стійкості зумовлено реалізацією алгоритмів локально-оптимального керування, вибір яких здійснюється за допомогою запропонованого координатно-параметричного керування.

Ключові слова: електродвигун; відцентровий насос; струм збудження; напруга; витрата; магістральний нафтопровід.

Вступ

З позицій системного підходу магістральний нафтопровід (МН) представляють як складний електрогідрравлічний комплекс (ЕГК), який містить електричну (лінії електро-передавання, автоматичні вимикачі, електричні двигуни тощо) та гідравлічну (трубопровідна мережа, запірні арматури, вентилі, відцентрові насоси тощо) підсистеми, кожна з яких характеризується дворівневою структурою (рис. 1). Верхній рівень (ВР) охоплює електричну та гідравлічну мережі, обмін енергією між якими відбувається на нижньому рівні (НР) через вали НА [4] (див. рис. 1).

З огляду на складну економічну ситуацію МН України сьогодні працюють з неповним завантаженням. Замість трьох послідовно з'єднаних насосів на кожній нафтоперекачувальній станції (НПС) зазвичай увімкне-

но один магістральний насос. Маловитратні усталені режими НА супроводжуються зниженням ефективності та надійності їхньої роботи. Тому виникає потреба в оптимізації роботи НА способом регулювання режимів. Для цього на МН використовують різні комбінації включених НА НПС. Кожна зупинка чи запуск НА на НПС спричиняє виникнення нестационарних (перехідних) процесів в електричній [7] (провал напруги, погіршення стійкості електродвигунів) та гідравлічній (швидкоплинні зміни тиску та витрати транспортованої рідини) [12] підсистемах.

Проте сьогодні немає комплексного підходу для керування усталеними та перехідними режимами експлуатаційної ділянки на НПС України, тому виникає потреба розробити алгоритм координатно-параметричного поліоптимального керування режимами ЕГК, який

Інформація про авторів:

Яремак Ірина Ігорівна, канд. техн. наук, доцент, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки.

Email: yaremak_iryana@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-0698-0367>

Костишин Володимир Степанович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки. **Email:** kostyshyn@nung.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-8606-3931>

Цитування за ДСТУ: Яремак І. І., Костишин В. С. Керування режимами електрогідрравлічного комплексу на підставі системного підходу. Науковий вісник НЛТУ України. 2020, т. 30, № 3. С. 83–88.

Citation APA: Yaremak, I. I., & Kostyshyn, V. S. (2020). Control of modes of electrohydraulic complex on the basis of a system approach. *Scientific Bulletin of UNFU*, 30(3), 83–88. <https://doi.org/10.36930/40300315>

дасть змогу підвищити надійність та ефективність, покращити контроль за станом обладнання, а основне – технічно реалізувати обґрунтовані алгоритми оптимального керування підсистемами різної фізичної природи. Тому набуває особливої актуальності задача поліоптимального керування роботою експлуатаційної ділянки МН, яка полягає в розробленні комплексного закону керування перехідними та усталеними режимами електричної та гідравлічної підсистем НА НПС.

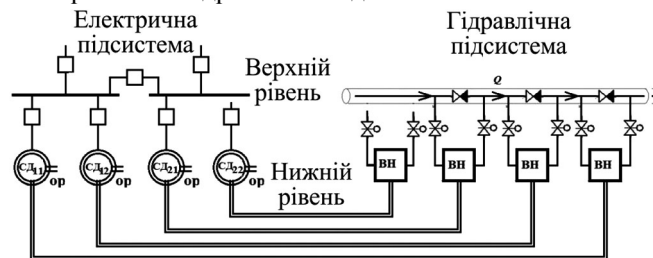


Рис. 1. Ієрархічна структурна схема підсистем експлуатаційної ділянки МН

Об'єкт дослідження – усталені та перехідні процеси, що виникають в магістральних електроприводних НА.

Предмет дослідження – методи і засоби багаточислової оптимізації та алгоритми поліоптимального керування роботою магістральних НА НПС МН, що дасть змогу розробити системи для визначення оптимального режиму електрогідравлічного комплексу.

Мета дослідження – розробити структуру ієрархічної системи координатно-параметричного поліоптимального керування усталеними та динамічними режимами електрогідравлічного комплексу для підвищення ефективності та стійкості роботи НА.

Для досягнення зазначеної мети потрібно виконати такі *основні завдання дослідження*: подати магістральний нафтопровід як складний ієрархічний електрогідравлічний комплекс, який містить електричну та гідравлічну підсистему; поєднати поліоптимальне керування усталеними та динамічними режимами роботи ієрархічної електрогідравлічної системи; визначити критерії глобальної оптимізації верхнього рівня та локальної оптимізації нижнього рівня ієрархічної системи експлуатаційної ділянки магістрального нафтопроводу; розробити закони дискретно-неперервного керування збудженням синхронного електродвигуна; виконати комплексне дослідження роботи ієрархічної електрогідравлічної системи; розробити функціональну схему автоматичного регулятора для реалізації координатно-параметричного керування режимами експлуатаційної ділянки магістрального нафтопроводу.

Наукова новизна дослідження полягає в тому, що вперше здійснено комплексне дослідження роботи ієрархічної електрогідравлічної системи, що дало змогу поєднати закони поліоптимального керування усталеними та динамічними режимами електроприводних насосних агрегатів. Розроблено функціональну схему автоматичного регулятора для реалізації координатно-параметричного керування режимами експлуатаційної ділянки магістрального нафтопроводу.

Практична значущість отриманих результатів. Розв'язок оптимізаційної задачі керування перехідними та усталеними режимами електрогідравлічного комплексу дає змогу за незначного збільшення часу перехідного процесу досягти розширення результуючої об-

ласті стійкості насосного агрегату з одночасним збереженням необхідної якості електропостачання та нафтоперекачування. Підвищення стійкості зумовлено реалізацією алгоритмів локально-оптимального керування, вибір яких здійснюється за допомогою запропонованої координатно-параметричного керування.

Матеріали і методи дослідження. Теоретична та методологічна основа дослідження базувалась на наукових працях і методологічних розробках фахівців теорії автоматичного керування та електричних кіл, наукових положеннях теорії відцентрових насосів (ВН). У процесі роботи використано такі методи: електрогідравлічної аналогії, системного аналізу, багаточислової оптимізації.

Аналіз літературних джерел. На сьогодні керування перехідними режимами електричної підсистеми ЕКГ здійснюють пристрої автоматичного введення резерву (АВР), релейного захисту (РЗ), автоматичного регулювання збудження синхронних двигунів (СД) [1]. Перелічені пристрої реалізують неадаптивні та неоптимальні за визначеним критерієм закони керування – просте форсування збудження або гасіння поля ротора СД, причому витримка часу форсування вибирається а posteriori, без урахування специфіки нафтоперекачування (спрацювання технологічних захистів, зміни моменту опору насоса, тощо). Використання засобів мікропроцесорної техніки усуває ці недоліки. Використання швидкодіючих цифрових обчислювальних комплексів дає змогу підвищити надійність, покращити контроль за станом обладнання НПС, а головне технічно реалізувати визначені алгоритми оптимального керування режимами електрогідравлічного комплексу. Під час перехідних процесів у гідравлічній підсистемі МН, спричинених зупинкою або запуском НА, істотно змінюється не тільки тиск, але і витрата нафти [10]. Тому перехідні процеси впливають на пропускну здатність МН. Окрім цього, під час експлуатації МН у ньому постійно виникають стрибки тиску [5]: планові, у разі перемикання режимів перекачування нафти та незаплановані і непередбачувані, які виникають під час аварійних вимкнень НА, спрацювання запірних засувок внаслідок аварійних ситуацій на трасі трубопроводу.

Викладення основного матеріалу

Для забезпечення неперервної та надійної роботи МН за наявної схеми транспортування регулюють їхні режими способом зміни тиску на вході та на виході НПС. Серед декількох можливих методів регулювання тиску на НПС, найбільш застосовуваним є метод дроселювання потоку нафти. Цей метод забезпечує регулювання витрати в МН, проте режими роботи НА НПС не є оптимальними. Виникає потреба у визначенні та встановленні оптимальних режимів роботи МН.

Технологічний режим ділянки МН є оптимальним, якщо він забезпечує екстремум (максимум чи мінімум) цільової функції під час виконання системи обмежень, які відображають умови перебігу технологічного процесу перекачування та вимоги, що ставлять до нього. Методи оптимального керування усталеними режимами НА технологічної ділянки МН розроблено в [11]. Визначення оптимального усталеного режиму здійснено способом максимізації глобальної такої цільової функції:

$$M = \Phi(\phi(Q)) \Rightarrow \max, \quad (1)$$

де: M – глобальна цільова функція; $\varphi_i(Q)$ – i -та локальна цільова функція за критеріями оптимальності залежно від витрати нафти Q .

Оскільки основними критеріями оптимальності є ефективність та надійність підсистем НА НПС [4], то цільові функції відповідно для ВН та СД формалізовані у вигляді поліномів третього степеня за критеріями ефективності (φ_1, φ_2) та надійності (φ_3, φ_4) залежно від витратного навантаження агрегату Q .

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= a_1 Q^3 + a_2 Q^2 + a_3 Q + a_4 \Rightarrow \max; \\ \varphi_2 &= b_1 Q^3 + b_2 Q^2 + b_3 Q + b_4 \Rightarrow \max; \\ \varphi_3 &= c_1 Q^3 + c_2 Q^2 + c_3 Q + c_4 \Rightarrow \max; \\ \varphi_4 &= d_1 Q^3 + d_2 Q^2 + d_3 Q + d_4 \Rightarrow \max, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де: φ_1, φ_2 – відповідно цільові функції за критеріями ефективності ВН та ЕД; φ_3, φ_4 – відповідно цільові функції за критеріями режимної надійності ВН та ЕД; $a_1, a_2, a_3, a_4; b_1, b_2, b_3, b_4; c_1, c_2, c_3, c_4; d_1, d_2, d_3, d_4$ – коефіцієнти апроксимації характеристик ефективності та надійності ВН та ЕД.

Графіки цільових функцій за критеріями (1) залежно від навантаження НПС для НА "СТД-2500-2 та НМ-3600-230" зображено на рис. 2 [11].

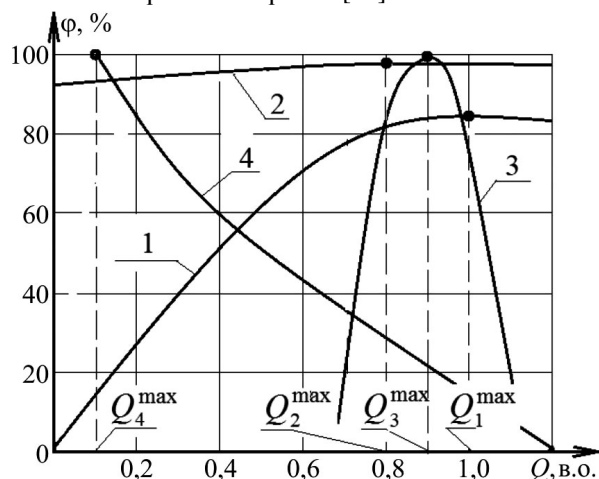


Рис. 2. Графіки локальних цільових функцій ефективності (криві 1 і 2) та надійності (криві 3 і 4) ЕД та ВН залежно від витратного навантаження Q для НА типу "СТД-2500-2 та НМ-3600-230"

Запропонований у роботі [11] підхід дав змогу формалізувати глобальну цільову функцію багатокритеріальної задачі оптимального керування в маловитратних усталених режимах за критеріями ефективності та надійності роботи НА НПС. З використанням апарату багатоцільової оптимізації (БО) [8] визначено поліоптимальне значення витрати рідини при недовантажених усталених режимах НПС. У разі зміни кількості, запуску та зупинки робочих НА необхідно також реалізувати оптимальне керування неусталеними (перехідними) режимами.

В опрацьованих літературних джерелах відсутній комплексний підхід для керування усталеними та перехідними режимами МН України. Тому застосування системного підходу для оптимізації роботи електроприводних НА НПС є актуальною задачею. Оскільки оптимізацію системи керування планується здійснити відповідною зміною як координат об'єкта, так і параметрів регулятора змінної структури, то цей клас нестационарних систем керування з оптимізацією відносять до систем координатно-параметричного керування [9].

Результати дослідження

Оптимальність процесів складної системи експлуатаційної ділянки МН потрібно оцінювати не за одним критерієм, а комплексом інтегральних критеріїв (цільових функцій), які характеризують показники надійності та ефективності перехідних і усталених режимів.

Для здійснення впливу на режими електричної та гідравлічної підсистем, визначимо канали керування роботою НА. Згідно з даними роботи [4], підведення енергії в електродвигун та насос здійснюється двокабельно. До СД електрична енергія підводиться до трьох фазних обмоток статора СД (енергетичними параметрами є діючі значення фазної напруги U_{OC} та струму I_{OC}) та до обмотки ротора (енергетичними параметрами є напруга U_{OP} та струм збудження I_{OP} (постійного струму з частотою $f_{OP} = 0$)) (рис. 3). Для підвищення стійкості роботи СД застосовують керування струмом збудження обмотки ротора [10].

Вихід механічної енергії з СД відбувається через вал НА і одночасно є входом у ВН із енергетичними параметрами – обертовим моментом M та кутовою частотою обертання ω . Окрім згаданої вище механічної енергії у насос підводиться через вхідний патрубок рідина, гідравлічна потужність якої $N_{Гвх} = \rho g H_{вх}$ характеризується параметрами – підпірним напором $H_{вх}$ та об'ємною витратою $Q_{вх}$. Очевидно, що через напірний патрубок ВН отримують корисну гідравлічну потужність $N_{Гвх}$ з енергетичними параметрами – вихідним напором $H_{вих}$ і витратою $Q_{вих}$. Отже, параметрами оптимізації режимів ВН є витрата нафти $Q_{вих}$ і струм збудження СД I_{OP} . Оскільки на МН декілька зазвичай насосів з'єднують послідовно (режим перекачування "з насоса в насос"), то $Q_{вих} = Q$.

У світовій практиці у сфері нафтопостачання широкого застосування набули НА з регульованим електричним приводом [6]. Оскільки вітчизняні МН працюють з неповним завантаженням, можна прогнозувати, що використання зазначеної прогресивної технології також може бути доцільним для елементів нафтотранспортної системи. За умови встановлення регульованого електроприводу, з'являється ще один параметр керування – частота обертання електроприводного двигуна f (рис. 3).

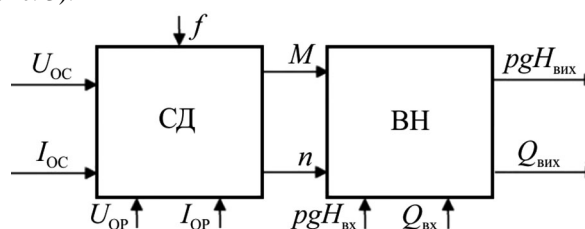


Рис. 3. Канали керування роботою НА

Визначені канали і параметри керування дадуть змогу оптимізувати перехідні та усталені режими ділянки МН. Оптимізацію маловитратних усталених режимів МН доцільно здійснювати на підставі методики, запропонованої в [4]. Для комплексного дослідження режимів роботи ЕГК сформуємо задачу поліоптимального керування неусталеними режимами. На першому етапі необхідно досягти мінімального відхилення параметрів неусталеного режиму для елементів верхнього рівня. Для цього потрібно забезпечити якісне (за напругою U)

електропостачання СД (цільова функція ψ_e^{BP}) і якісне (за тиском P) перекачування (цільова функція ψ_c^{BP}). У векторній формі задача подана у вигляді (1):

$$\psi = \int_0^{t_{ав}} (Z - Z_{ном})^2 dt \Rightarrow \min; \quad (3)$$

$$Z = \{U, P\}, \psi = \{\psi_e^{BP}, \psi_c^{BP}\},$$

де $t_{ав}$ – тривалість перехідного процесу.

На другому етапі необхідно здійснити локальну оптимізацію перехідних режимів окремих НА нижнього рівня за узагальненим критерієм ψ_c^{HP} (максимальної стійкості та швидкодії, мінімального коливання) або за критерієм ψ_e^{HP} швидкого гасіння поля ротора з подальшою ресинхронізацією СД.

Зазвичай критерії глобальної (ВР) та локальної (НР) оптимізації взаємозв'язані та мають суперечливий характер. Зокрема, попарно суперечливі цільові функції ψ_e^{BP} і ψ_c^{HP} , ψ_c^{BP} і ψ_e^{HP} . Також не узгоджуються між собою різні критерії одного ієрархічного рівня: ψ_e^{BP} і ψ_c^{BP} , ψ_e^{HP} і ψ_c^{HP} . Окрім цього, деякі цільові функції або їх складові залежать від параметрів режиму і можуть трансформуватися за час перехідного чи усталеного процесу. Наприклад, чутливість кута навантаження δ СД до напруги U на інтервалі її аварійного зниження повинна бути мінімальною, а при відновленні U – максимальною.

Узгодження цілей поліоптимального керування раціонально можна здійснити шляхом адаптивної зміни цілових умов нижнього ієрархічного рівня. При цьому для різних випадків необхідно реалізувати один із перелічених законів дискретно-неперервного керування збудженням СД: 1) оптимальне керування усталеними режимами роботи ЕГК; 2) керування за змінним узагальненим критерієм оптимальності ψ_c^{HP} ; 3) керування за цільовою функцією ψ_e^{HP} ; 4) форсування збудження СД.

Перемикання керування здійснюють за допомогою регулятора змінної структури, що здійснює координатно-параметричне керування. Вмикання локального алгоритму 1–4 для кожного НА здійснюється залежно від виконання цілових умов ψ_e^{BP} , ψ_c^{BP} і дії РЗ, АВР (задає вплив ВР), а також ряд обмежень на зміну показників режиму НА: потужностей, струмів, ковзання, тощо (задає вплив НР). Однак, проведені на імітаційній моделі ЕГК дослідження показали доцільність введення компромісної уступки з боку ВР, яку можна реалізувати шляхом переведення умов ψ_e^{BP} і ψ_c^{BP} в розряд обмежень, причому ψ_e^{BP} варто подати в інтегральній формі.

З практичної точки зору найзручніше виконати контроль саме параметра напруги U на ВР. Для цього необхідно визначити допустимі значення амплітуди і тривалості її зміни, тобто визначення меж синхронної динамічної стійкості НА в координатах U та $t_{ав}$, де області стійкості R^1 , R^2 знаходяться вище граничної кривої, яка відділяє їх від області нестійких режимів R^3 (рис. 4). Як видно цього з рисунку, залежно від приналежності параметра U до однієї із областей R^1 , R^2 , R^3 аналізатор напруги (АН) дає дозвіл відповідно на керування збудженням СД за законами 1, 2 та 3.

Якщо параметр керування U належить до області R^1 (усталений режим), то основним каналом керування є витратне навантаження станції Q , оптимальне значення якого визначають методом БО [4] за законом 1. Реаліза-

цію поліоптимального керування усталеного режиму здійснюють дроселюванням або шляхом регулювання частоти обертання СД (за умови наявності на НПС регульованого електроприводу).

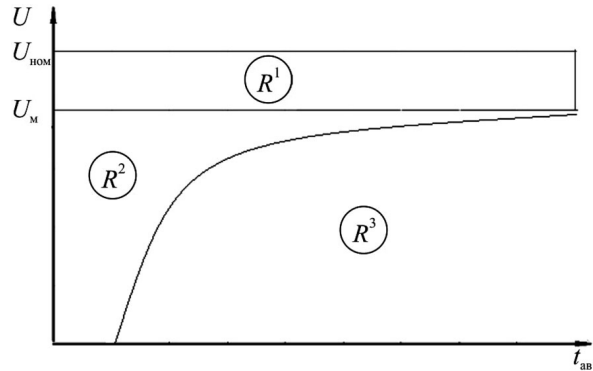


Рис. 4. Зона локальних керувань та границя стійкості СД, отримані для моделі стрибкоподібного збільшення напруги $U_{ном}$ – номінальне значення напруги; U_M – мінімально допустиме за умовами нормального режиму роботи значення напруги U ; $U_M = 0,95U_{ном}$

Якщо АН визначає приналежність режиму зоні R^2 (перехідний режим), то вмикається таймер зі змінним порогом часу і здійснюється керування за законами другої зони [1] внаслідок чого відновлюється стійка робота НА. У разі приналежності режиму зоні R^3 (перехідний режим), досягнення стійкої роботи неможливе, тому здійснюється керування за законами третьої зони (гасіння поля збудження з наступною ресинхронізацією СД).

Формалізація програми, яка формує необхідні дії, відбувається так: вводиться вектор логічних змінних $r = \{r_{ij}\}$, де $n = 1, 2$ – порядковий номер шин; $j = 1, 2, 3$ – номер області R (див. рис. 4)

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } U \in R^j; \\ 0 & \text{при } U \notin R^j. \end{cases} \quad (4)$$

Аналогічно аналізатором обмежень (АО) розглядаються значення контрольованих параметрів режиму на ЕГК (кута навантаження δ , струму i , моментів електромагнітного m_e та опору m_o), тільки для спрощення граничні значення перелічених вище величин ($\delta_{зр}$, $i_{зр}$, $m_{e зр}$, $m_{o зр}$) приймаються незалежними від часу перехідного процесу $t_{ав}$. Для цього визначається область контрольованих параметрів кожного СД F_{nl}^x обмежена поверхнею розмежування, що представлений у формулі (5)

$$X_{nl} \in F_{nl}^x, \quad (5)$$

де $X_{nl} = \{\delta_{nl}, i_{nl}, m_{e nl}, m_{o nl}\}$ – вектор контрольованих параметрів l -го СД на n -й шині. Відповідно присвоюється значення 0 або 1 визначеній компоненті вектора логічної змінної $k = \{k_{nl}\}$;

$$k_{nl} = \begin{cases} 0 & \text{при } X_{nl} \in F_{nl}^x; \\ 1 & \text{при } X_{nl} \notin F_{nl}^x. \end{cases} \quad (6)$$

Безпосереднє вимірювання кута δ і електромагнітного моменту m_e СД ускладнене. Однак давачі δ і m_e непрямої дії можна порівняно просто побудувати. Допустимі значення контрольованих параметрів визначаються заводом-виготовлювачем СД ($i_{зр}$, $m_{e зр}$) із умов функціонування технологічних захистів ($m_{o зр}$) або за допомогою імітаційної моделі НА ($\delta_{зр}$).

Зазвичай спрацювання пристроїв РЗ, АВР верхнього рівня керування, а також вимкнення вимикача на голов-

ному кінці лінії, що живить секцію підстанції (внаслідок помилкових дій персоналу, помилкового спрацювання РЗ, тощо), спричиняє випадання із синхронізму СД, під'єднаних до аварійної шини, що визначає обов'язкове гасіння поля ротора СД з подальшою ресинхронізацією (закон керування 3). Окрім цього, дія АРВ на секційному вимикачі повинна супроводжуватись форсуванням збудження (закон керування 4) ЕД, що під'єднані до шини, на якій електропостачання не порушено. Отже, необхідне додаткове формування сигналів a_1, a_{2n} про спрацювання системи керування верхнього рівня, які доповнюватимуть інформацію від аналізатора тиску (АТ) і гідромережі (сигнал a_3).

У таблиці наведено комбінації локальних керувальних дій збудження трьох СД і логічні формули вихідних функцій автоматичного регулятора (АР), який формує дані комбінації залежно від вхідних сигналів $r_{nj}, k_{nl}, a_1, a_{2n}, a_3$.

Таблиця. Комбінація локальних керувальних дій і логічні формули вихідних функцій автоматичного регулятора

Вихідна функція керування	Номер локального керування			Логічна формула вихідних функцій
	СД ₁	СД ₂	СД ₃	
У ₁	1	1	1	$r_{11} \vee r_{21}$
У ₂	2	2	1	$r_{12} \vee r_{21} \vee (k_{11} \vee k_{12})$
У ₃	3	3	1	$[r_{13} \wedge (k_{11} \vee k_{12}) \wedge a_{12} \wedge a_3] \vee r_{21}$
У ₄	3	3	4	$[r_{13} \wedge (k_{11} \vee k_{12})] (a_{11} \vee r_{21})$
У ₅	2	3	1	$r_{12} \vee k_{12} \vee r_{21}$
У ₆	3	2	1	$r_{12} \vee k_{11} \vee r_{21}$
У ₇	1	1	2	$r_{11} \vee r_{22}$
У ₈	1	1	3	$r_{11} \vee (r_{13} \wedge k_{21} \wedge a_{22} \wedge a_3)$
У ₉	4	4	3	$(r_{11} \vee a_1) \vee (r_{23} \wedge k_{21})$

Функціональну схему автоматичного регулятора наведено на рис. 5. Оскільки від кожної шини ПС живляться по два СД (один зі всіх резервний), можна прийняти, що ймовірність одночасного порушення електропостачання всіх трьох СД дуже мала.

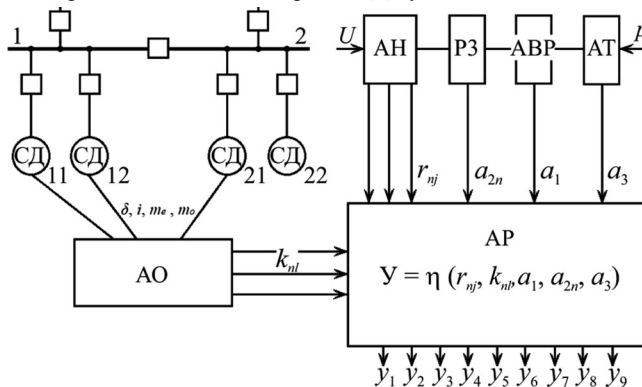


Рис. 5. Структурна схема ієрархічної системи координатно-параметричного керування режимами електрогідравлічного комплексу: АО – аналізатор обмежень; АН – аналізатор напруги; РЗ – релейний захист; АВР – автоматичне введення резерву; АТ – аналізатор тиску; АР – автоматичний регулятор; η – вектор булевих функцій; U – вектор вихідних функцій автоматичного регулятора

Розв'язок задачі оптимального керування перехідними режимами ЕГК дає змогу за незначного збільшення часу перехідного процесу досягти розширення результуючої області стійкості НА в координатах $U, t_{ас}$ з одночасним збереженням необхідної якості електропостачання та нафтоперекачування. Підвищення стійкості зумовлено реалізацією алгоритмів локально-оптимального керування, вибір яких здійснюється за допомогою

запропонованого координатно-параметричного керування. Порівняння поліоптимального керування з одноцільовим керуванням за критерієм максимальної швидкодії, що забезпечує максимальну область стійкості СД, який живиться від шин нескінченної потужності, проведено із застосуванням імітаційної моделі ЕГК [2]. У цій моделі електромагнітні перехідні процеси в СД описані повними рівняннями Парка-горєва, а гідравлічні (в трубопроводній мережі) – диференційними рівняннями гідравлічного удару за уточненого значення гідравлічного моменту опору m_o ВН.

Поєднання законів поліоптимального керування ustalеними та динамічними режимами роботи ЕГК дасть змогу підвищити ефективність та надійність його елементів.

Висновки

Поєднання поліоптимального керування ustalеними та динамічними режимами роботи електрогідравлічного комплексу за допомогою розробленої ієрархічної системи керування дало змогу підвищити ефективність та розширити область стійкості роботи НА з одночасним збереженням якості електропостачання та нафтоперекачування. Реалізація координатно-параметричного поліоптимального керування досягається за допомогою регулятора змінної структури. Вимоги до його характеристик формують на підставі отриманих законів керування.

References

- Bin, Wu, & Mehdi, Narimani. (2016). *High - Power Converters and AC Drives*, Second Edition, 447 p. <https://doi.org/10.1002/9781119156079>
- Gasiyarov, V. R., Maklakov, A. S., Voronin, S. S., & Maklakova, E. A. (2015). Automatic Control System of Speed of Synchronous Motor. *Procedia Engineering, International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015)*, 129, 57–62. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.008>
- Khomenko, V. I., Nizimov, V. B., & Kolychev, S. V. (2015). Stability increasing of the synchronous machine by improvement of the excitation system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1, no. 8(73), 31–36. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36498>
- Kostyshyn, V. S., & Yaremak, I. I. (2017). Mathematical model of reliability and efficiency of pumping unit of an oil pumping station. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5(161), 62–68.
- Kril, S. (2015). Automatic pressure control system on ops with actuator with variable full stroke time. *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytet Ukrainy "Kyivskiy Politekhnichnyi Instytut Imeni Ihoria Sikorskoho" (Visnyk NTUU "KPI")*. *Informatyka, Upravlinnia ta Obchysluvalna Tekhnika*, 62, 71–78. [In Ukrainian].
- Luo, Y., Yuan, S., Sun, N., & Guo, Y. (2015). Energy-saving control model of inverter for centrifugal pump systems. *Advances in Mechanical Engineering*, 7(7), 1–12. <https://doi.org/10.1177/1687814015589491>
- Pivnyak, G. G., Zhezhelenko, I. V., Papaika, Y. A., & Nesen, L. I. (2016). *Transients in Electric Power Supply Systems*. Switzerland, Trans Tech Publications Ltd, (5th ed. add. and revised), 392 p.
- Rangaiah, G. P. (2009). *Multi-Objective Optimization: Techniques and Applications in Chemical Engineering*. Vol. 1. Singapore, World Scientific, 435 p.
- Rutkovsky, V. Yu., Zemlyakov, S. D., Sukhanov, V. M., & Glumov, V. M. (2003). Some new directions in development of the theory and application of the adaptive coordinate-parametric control. *Probl. Upravlen.*, 2, 2–10. [In Russian].

10. Serediuk, M., Grygorskyi, S. (2016). The patterns of change in volume flow of oil pipeline in the processes of startups of pumping units. *International scientific journal*, 11(21), Vol. 1, 96–101.
11. Yaremak, I., & Kostyshyn, V. (2018). Multi-objective optimization of steady operating modes of electric oil pumping station. *Scientific journal "Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University"*, 1(108), 15–21. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2018.1.15-21>
12. Zhifeng, L., Peng, W., Dazhuan, W., & Leqin, W. (2011). Experimental and numerical study of transient flow in a centrifugal pump during startup. *Journal of mechanical science and technology*, 25(3), 749–757. <https://doi.org/10.1007/s12206-011-0107-7>

I. I. Yaremak, V. S. Kostyshyn

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

CONTROL OF MODES OF ELECTROHYDRAULIC COMPLEX ON THE BASIS OF A SYSTEM APPROACH

The analysis showed that today there is no comprehensive approach to control steady-state and transient modes of electric pumping units of oil pumping stations of Ukraine, so there is a need to develop an algorithm for coordinate-parametric polyoptimal control modes of electrohydraulic complex, which will increase reliability and efficiency, improve the control over the condition of equipment, moreover, it will allow technical implementing of reasonable algorithms for optimal control of subsystems of different physical nature. The theoretical and methodological basis of the study was based on scientific works and methodological developments of specialists in the theory of automatic control and electric circuits, and also scientific provisions of the theory of centrifugal pumps. The following methods were used in the process of research: electrohydraulic analogy, system analysis, and multi-purpose optimization. The main oil pipeline is presented as a complex hierarchical electrohydraulic complex, which contains electrical and hydraulic subsystems. The study revealed that the operating modes of oil pumping stations in Ukraine are underloaded and require the development and implementation of optimal control algorithms. It is proposed to combine polyoptimal control of steady and dynamic modes of operation of hierarchical electrohydraulic system. Therefore, we have established the criteria of global optimization of the upper level and local optimization of the lower level of hierarchical system of an operational section of the main oil pipeline. On the basis of researches performed, the authors developed a functional scheme of an automatic regulator and defined the laws of the discrete-continuous control of excitation current of the synchronous electric motor. By means of the regulator of variable structure, we implemented the algorithms of coordinate-parametric polyoptimal control of operation of electric driven pumping units. The combination of control of steady and dynamic modes of operation by means of the developed hierarchical control system will allow increasing efficiency and expanding the area of stability of work of the pumping unit with simultaneous preservation of the necessary quality of power supply and oil pumping.

Keywords: electric motor; centrifugal pump; excitation current; voltage; flow-rate; main oil pipeline.