УДК 681.5:62-83 DOI: https://doi.org/10.15407/techned2019.02.072

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ У РЕЖИМІ СТАБІЛІЗАЦІЇ РІВНЯ РІДИНИ В РЕЗЕРВУАРІ НА ОСНОВІ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ

О.М. Юрченко[1*], докт.техн.наук, **О.В. Чермалих**[2**], канд.техн.наук, **О.В. Данілін**[2***], канд.техн.наук
[1] **Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.**
[2] **Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.**
E-mail: yuon@ied.org.ua; alvalrik@gmail.com

З використанням синтезованої імітаційної моделі системи електричний двигун–насос–гідравлічна мережа досліджено електрогідравлічні процеси в насосному агрегаті в режимі підтримання постійного рівня рідини в резервуарі. Реалізовано основні математичні залежності, які зв'язують між собою приплив рідини, витрату й напір насоса, оберти електродвигуна, активну потужність та коефіцієнт корисної дії системи. При моделюванні розглянуто режим функціонування насосного агрегату для випадку зміни припливу рідини в припустимих межах від мінімального до максимального значень. Наведено графічні залежності, що відображають фазові траєкторії відносно гідравлічних характеристик та енергетичних показників. Бібл. 6, табл. 1, рис. 4.
Ключові слова: насосний агрегат, частотне регулювання, скалярне управління, стабілізація рівня.

Насосні установки належать до енергоємних промислових об'єктів. Тому при проектуванні та експлуатації насосних станцій у першу чергу необхідно забезпечити економічні режими їхньої роботи. Цьому питанню присвячено багато робіт вітчизняних та зарубіжних вчених. Найбільш вдало, на нашу думку, питання організації раціональної експлуатації насосних установок у різних режимах роботи викладено у статтях [3, 4, 6].

З енергетичної точки зору найбільш ефективним способом узгодження режимів роботи насосних агрегатів відносно витрати й напору є зміна частоти обертання робочих коліс із застосуванням регульованого електроприводу. Для керування насосами на сьогодні фактично всіма виробниками електротехнічної продукції пропонуються системи частотно-регульованого електроприводу на базі асинхронних або синхронних машин. Це пов'язано з можливістю реалізації енергоефективного управління насосними станціями різного технологічного призначення. У разі такого управління мінімізується число запусків насосів, що підвищує надійність роботи і строк служби механічного й електричного обладнання у разі відсутності гідравлічних ударів у мережі та кавітаційних режимів. Однак питання вибору і підтримання робочої точки насосного агрегату в оптимальних з точки зору енергоефективності діапазонах зміни витрати та напору [5] в сучасній науковій літературі розглянуто недостатньо.

Мета роботи полягає у підвищенні енергоефективності та довговічності системи електродвигун–насос–гідравлічна мережа в режимі стабілізації рівня рідини в резервуарі шляхом оптимізації процесу вибору робочої точки насосного агрегату відносно витрати та напору, що, у свою чергу, забезпечує мінімізацію споживання електроенергії [2, 5].

Для досягнення цієї мети в роботі синтезовано комп'ютерну модель насосного агрегату з частотним регулюванням обертів асинхронного двигуна в режимі підтримання постійного рівня рідини в резервуарі. Такій вимозі відповідають каналізаційні системи, водовідливні установки та інші об'єкти.

За об'єкт досліджень прийнято шахтні водовідливні установки, які працюють в умовах змінного припливу рідини. З використанням частотно-регульованого електроприводу в функції припливу підтримується постійним верхній рівень води у водозбірнику. Розглянуто промислову дільничну водовідливну установку, яка комплектується відцентровим секційним насосом ЦНС 38-66 і короткозамкненим асинхронним електродвигуном 4АМ160М-2. Основні характеристики насосу: за витратою – номінальна Q_{nom} = 0,0105 м^3/с; максимальна Q_{max} = 0,0133 м^3/с; мінімальна Q_{min} = 0,0078 м^3/с; за напором – номінальне значення H_{nom} = 66 м; максимальне значення коефіцієнта корисної дії η_{max} = 0,62.

© Юрченко О.М., Чермалих О.В, Данілін О.В., 2019
ORCID ID: *http://orcid.org/0000-0002-2107-2308; **http://orcid.org/0000-0001-8609-7525;
***http://orcid.org/0000-0003-3207-1156

Паспортні номінальні дані двигуна: потужність P = 15000 Вт; лінійна напруга U = 380 В; струм статора I = 24,3 А; частота обертання ω = 310 рад/с; коефіцієнти корисної дії η = 0,91 і потужності $\cos\varphi$= =0,89; момент інерції J = 0,048 кг·м^2.

Запропонована імітаційна модель насосного агрегату (рис. 1) фактично містить дві взаємопов'язані складові – підсистему електроприводу *Subsystem* і безпосередньо математичну модель насоса.

У відповідності до сучасних тенденцій ідеологія побудови моделі передбачає відхід від традиційної структури швидкісних систем електроприводу, прив'язаних до обертів двигуна, й переходу до регулювання безпосередньо технологічних параметрів машини або установки. З точки зору технічної реалізації такий підхід підкріплено наявністю в каталогах провідних фірм різних технологічних сенсорів, котрі дають змогу будувати відповідні зворотні зв'язки. Основу обох частин моделі складають здебільшого однотипні блоки, що спрощують сам процес синтезу й налаштування моделі. Головною відмінністю запропонованої моделі від відомих є її цілісність відносно конкретного об'єкта – насосного агрегату в сукупності з насосом, двигуном та системою керування технологічним параметром.

Базовими елементами моделі обраного насоса є обчислювачі функцій *VF1…VF5*, побудовані на основі спеціалізованого блока *Fcn* із бібліотеки *User-Defined Functions* пакета *Simulink* середовища *MATLAB*. Цей блок спеціально призначено для наповнення моделі необхідним математичними виразами, що описують процеси в системі [5].

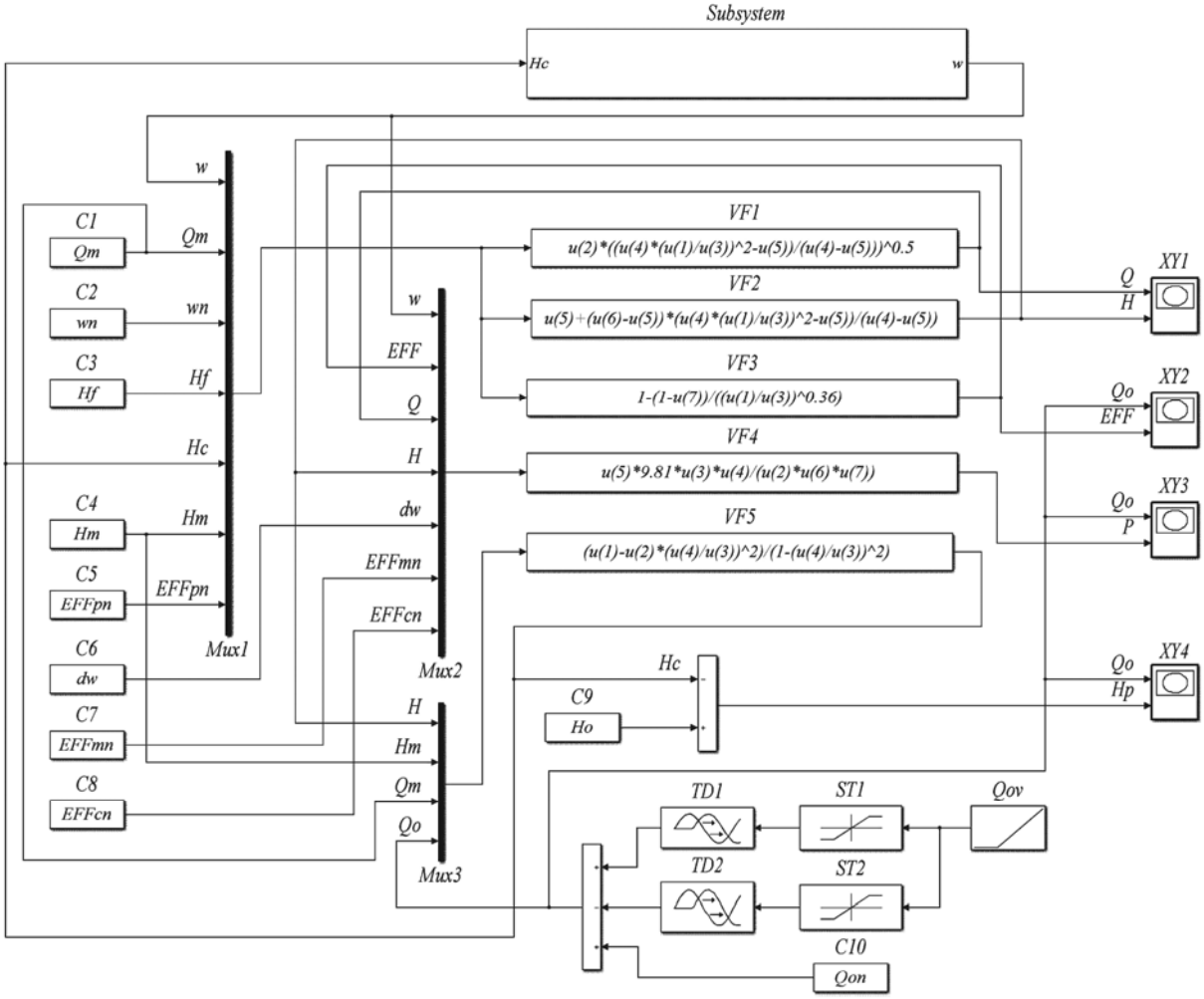


Рис. 1

У результаті обчислювачі *VF1*, *VF2*, *VF3, VF4*, *VF5* відповідно реалізують залежності витрати $Q = f(\omega)$, напору $H = f(\omega)$, ККД насоса $\eta = f(\omega)$ від обертів приводного двигуна ω, а також потужності $P = f(Q, H)$ й статичного напору $H_c = f(Q_o, H)$. Внутрішні функції $u(i)$ відповідають сигналам, які подаються на вхід об'єднувачів *Mux1…Mux3*. Таким чином, блоки *VF1*, *VF2*, *VF3* вибирають необхідні сигнали від *Mux1*, а для блоків *VF4*, *VF5* потрібні всі сигнали відповідно від *Mux2*, *Mux3*. Вхідні сигнали на об'єднувачі *Mux1*, *Mux2*, *Mux3* надходять від елементів *C1 … C8* у вигляді наступних констант: максимальних значень витрати Q_m =0,0133 м^3/с й напору H_m =66 м; номінальної частоти обер-

тання ω_n =310 рад/с; фіктивного напору H_f =95,5 м; густини води dw =1100 кг/м^3; коефіцієнтів корисної дії у відносних одиницях – насоса EFF_{pn}=0,62; двигуна EFF_{mn} =0,91 й перетворювача EFF_{cn} =0,96.

Величина рівня в резервуарі H_p знаходиться як різниця між висотою підйому рідини H_o та статичним напором H_c . Висота підйому залежить від місця встановлення насоса і є постійною величиною для конкретної установки. Таким чином, статичний напір визначає безпосередньо рівень рідини, який обчислюється через суматор, на позитивний вхід якого блоком *C9* подається значення висоти підйому рідини H_o = 60 м (номінальне значення для обраного насосного агрегату).

Основним і фактично єдиним зовнішнім впливом для насосного агрегату в режимі стабілізації рівня є приплив рідини Q_o у резервуар. Таким чином, виникає потреба в синтезі моделі за цією складовою.

Блок *C10* задає номінальне значення притоку Q_{on} = 0,0105 м^3/с, а елемент Q_{ov} формує темп його зміни за часом. Обмежувачі *ST1*, *ST2* визначають відповідно можливі максимальне Q_{omax} = 0,0125 м^3/с та мінімальне Q_{omin} = 0,0083 м^3/с значення припливу. Блоки часової затримки регулюють у моделі час зміни припливу на збільшення *TD1* і зменшення *TD2*. У результаті на виході суматора формується заданий закон зміни припливу за часом $Q_o(t)$.

Структура моделі частотно-регульованого електроприводу насоса в нерухомій системі координат α, β з урахуванням рекомендацій, наведених у [1], показана на рис. 2.

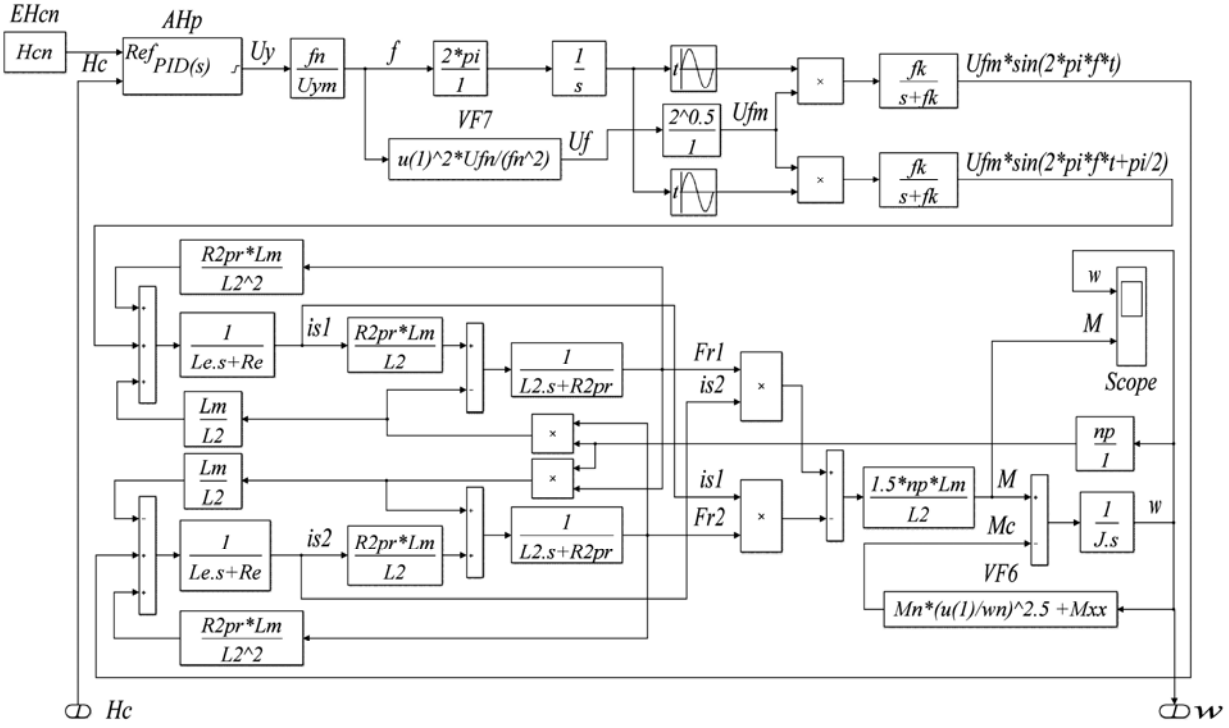


Рис. 2

Модель обраного асинхронного двигуна виконана з використанням блоків, передатні функції яких мають загальноприйняті позначення для наступних параметрів: еквівалентні опір R_e = 1,57 Ом та індуктивність L_e = 0,0051 Гн, приведений опір $R2_{pr}$ = 0,17 Ом та повна індуктивність L_2 = 0,118 Гн ротора, індуктивність контура намагнічування L_m = 0,115 Гн. Також враховується повний момент інерції насосного агрегату J = 0,0058 кг·м^2 та кількість пар полюсів двигуна np = 1.

Обчислювач *VF6* формує потрібну залежність статичного моменту M_c двигуна насоса від його частоти обертання

$$M_c = M_n \left(\omega/\omega_n\right)^{2,5} + M_{xx},$$

де M_n = 48 Н·м – номінальний момент двигуна, M_{xx} = 2,4 Н·м – момент холостого ходу.

Модель системи керування перетворювачем частоти для скалярного закону регулювання містить два канали: за частотою синусоїдальної напруги f та її амплітудою U_{fm}. Обчислювач *VF7* задає рекомендований для турбомеханізмів закон скалярного управління

$$U_f = U_{fn}\left(f/f_n\right)^2,$$

де U_{fn} = 220 В – номінальна фазна напруга двигуна, f_n = 50 Гц – номінальна частота мережі.

Таким чином, на виході перетворювача частоти відносно нерухомої системи координат з використанням блоків регульованих синусоїд формуються два сигнали за напругою статора U_α, U_β із зсувом на 90 електричних градусів

$$U_\alpha = U_{fm} \sin\left(2\pi ft + \pi/2\right), \qquad U_\beta = U_{fm} \sin\left(2\pi ft\right).$$

Аперіодичні ланки враховують частоту комутації вентилів інвертора f_k = 4000 Гц.

За структурою модель системи керування виконана з ПІД-регулятором рівня рідини в резервуарі *AHp*. Такий вибір пов'язано з тим, що перетворювачі частоти із скалярним регулюванням, які сьогодні пропонуються на ринку електротехнічної продукції, вже мають вбудований ПІД-регулятор технологічного параметра.

Наявність перехресних зв'язків моделі між струмами статора is_1, is_2 й потокозчепленням ротора Fr_1, Fr_2 ускладнює отримання виразу для визначення параметрів регулятора K_p, K_i, K_d. В такому випадку можливе використання методики для лінеаризованої системи частотно-регульованого електроприводу з подальшим коригуванням коефіцієнтів у процесі налаштування моделі

$$K_p = \frac{L_e J}{a_p T_{uz} R_e K_h 1,5 np L_m / L_2}, \qquad K_i = \frac{J}{a_p T_{uz} K_h 1,5 np L_m / L_2},$$

де a_p – параметр налаштування контура рівня рідини в резервуарі; T_{uz} = 0,005 с – стала часу перетворювача частоти; $K_h = H_m / \omega_n$ – коефіцієнт передачі насоса, мс/рад.

Диференційна складова регулятора в даній системі погіршує якість протікання перехідних процесів, тому доцільно прийняти K_d = 0 [5].

Блок *EHcn* задає на вході системи номінальне значення статичного напору H_{cn} = 52 м.

Авторами запропоновано наступний технологічний алгоритм функціонування моделі:

$0 \le t < 10$ с – номінальний режим роботи насосного агрегата за припливом Q_{on}, витратою Q_n, напором H_n і рівнем H_{pn};

$10 \le t < 65$ с – зменшення припливу до мінімального значення Q_{omin};

$65 \le t < 100$ с – підтримання усталеного мінімального значення припливу;

$100 \le t < 200$ с – збільшення притоку до максимального значення Q_{omax};

$200 \le t < 220$ с – підтримання усталеного максимального значення припливу;

t = 220 с – час закінчення моделювання.

Протікання динамічних процесів в електроприводі насосного агрегату при частотному регулюванні ілюструють діаграми, показані на рис. 3, з яких видно відпрацювання системою за обертами й моментом двигуна відповідно до заданого закону зміни припливу.

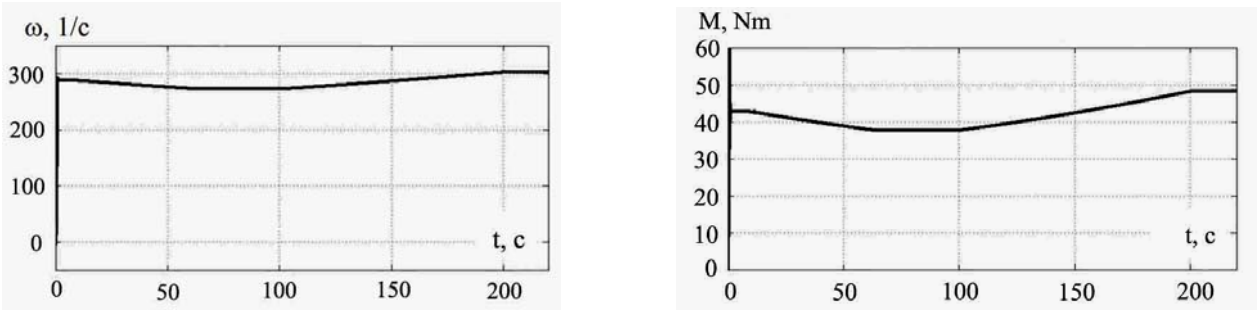
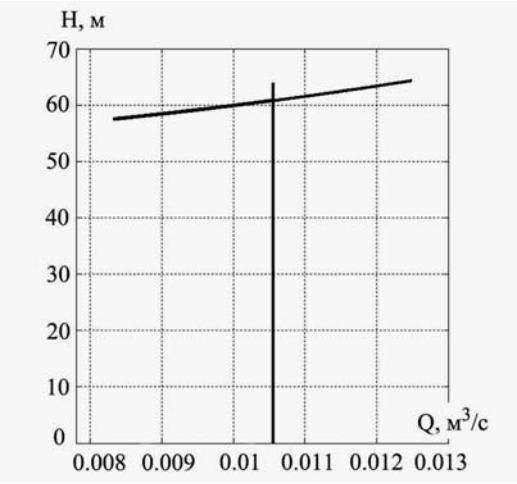


Рис. 3

Візуалізацію функціонування системи забезпечують спеціалізовані блоки *XY1*, *XY2*, *XY3*, *XY4* (рис. 1), які реалізують у вигляді графіків відповідні функції $H=f(Q)$, $EFF=f(Q_o)$, $P=f(Q_o)$, $H_p=f(Q_o)$. Вертикальна лінія на рисунках позначає початок процесу моделювання в номінальному режимі відносно припливу й витрати.

Рис. 4 представляє фазові портрети характеристик гідравлічної складової насосного агрегату на ділянці моделювання.



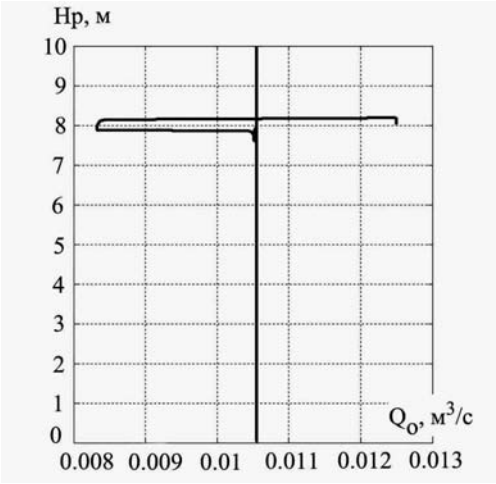


Рис. 4

У площині Q – H представлено фрагмент характеристики гідравлічної мережі, на якій знаходяться робочі точки оптимального режиму відносно значень витрати Q і напору H в залежності від обертів двигуна. Фазова траєкторія рівня H_p у функції припливу Q_o ілюструє процес підтримання його величини постійною й номінальною H_{pn} = 8 м в усталених режимах і деяку розбіжність у значеннях – у разі перехідних процесів відносно припливу. Останній фактор пов'язано з інерційністю об'єкта в цілому і в реальних системах така ситуація буде залежати від темпу зміни припливу в резервуар. Для прийнятого при моделюванні темпу зміни припливу розбіжність складає менше 2 %.

Чисельні значення за основними змінними насосного агрегату в режимі стабілізації рівня рідини в резервуарі при змінному припливі для певних ділянок процесу моделювання наведено в таблиці.

$t_{мод}$	$Q_o = Q$	H	H_p	P	EEF	ω	M	f	U_f
с	м^3/с	м	м	кВт	в.о.	рад/с	Н·м	Гц	В
5	0,0105	60	8,00	13	0,610	288	43	48	200
35	0,0094	59	7,85	11,3	0,606	280	40	46	188
80	0,0083	57	8,00	9,824	0,602	272	37	45	179
150	0,0105	60	8,15	12,9	0,609	287	42	47	198
210	0,0125	64	8,00	16,1	0,617	303	48	50	220

Рівність припливу та витрати $Q_o = Q$ є обов'язковою умовою підтримання рівня постійним. Відповідно до зміни припливу за прийнятим законом скалярного регулювання змінюються значення частоти f, фазної напруги U_f і частоти обертання ω, а момент M відповідає ступеневій залежності від обертів двигуна. Слід зазначити, що отримане значення потужності P = 13000 Вт для номінального режиму відрізняється від паспортного, яке становить P_o = 15000 Вт. Це пов'язано з тим, що в теоретичних розрахунках закладаються максимальні значення витрати й напору насоса. Але щодо припливу є обмеження максимального значення потрібним запасом за висотою резервуару, щоб не було переливу рідини. Таким чином, є можливість обирати обладнання насосного агрегату з меншою встановленою потужністю. Крім того, запропонований принцип побудови моделі системи стабілізації рівня рідини у водозбірнику дає змогу в усьому можливому діапазоні зміни припливу здійснювати управління електроприводом насоса в першій зоні, не виходячи за межі номінальних значень частоти, напруги й обертів двигуна. Така реалізація виключає перехід у другу зону, де змінюється закон частотного регулювання на підтримання постійного значення потужності P = const, що не відповідає необхідній вимозі для турбомеханізмів.

Висновки. Синтезовано імітаційну модель насосного агрегату, зорієнтовану на регулювання безпосередньо технологічних параметрів установки насос–двигун у режимі підтримання постійного рівня рідини в резервуарі незалежно від припливу, а не на регулювання частоти обертання двигуна електроприводу, що притаманно іншим сучасним моделям. Розроблена модель дає змогу оптимізувати процес вибору робочої точки насосного агрегату відносно витрати та напору при відсутності надлишкового напору з мінімізацією споживання електроенергії.

Коефіцієнт корисної дії двигуна на всій ділянці моделювання близький до максимального і не нижче 91 % його значення, чим забезпечується енергоефективність функціонування насосного агрегату в цілому. Діапазон регулювання обертів двигуна незначний і становить 93 % від номінального режиму, що відповідає рекомендованому мінімальному 90 %.

Застосування синтезованої моделі доцільне для насосних агрегатів у режимі стабілізації рівня на етапах їхньої модернізації або проектування. Потрібно тільки ввести параметри конкретної установки з подальшою можливістю коригування розрахункових значень витрати, напору й потужності в бік їхнього зменшення.

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008. 368 с.
2. Лезнов Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. М.: Машиностроение, 2013. 176 с.
3. Сотник М.І., Бойко В.С., Хованський С.О. Енергоефективність функціонування електромеханічних систем у складі мереж водопостачання. *Журнал інженерних наук*. 2014. Т. 1. № 4. С. 1–18.
4. Сотник Н.И., Бойко В.С. Энергетические процессы в электромеханической системе сети водоснабжения и ее электрическая модель. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2015. Вип. 4/2015 (32). С. 61-68.
5. Фащиленко В.Н. Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий. М.: Горная книга, 2011. 260 с.
6. Чермалых А.В., Майданский И.Я., Доценко О.Б., Затирка Ю.И. Моделирование технологических режимов работы насосных установок с частотно-регулируемым электроприводом. *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах.* 2014. Вип. 1/2014 (2). С. 49-52.

УДК 62.83.52

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ В РЕЖИМЕ СТАБИЛИЗАЦИИ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В РЕЗЕРВУАРЕ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

О.Н. Юрченко[1], докт.техн.наук, **А.В. Чермалых**[2], канд.техн.наук, **О.В. Данилин**[2], канд.техн.наук
[1] - **Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.**
[2] - **Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского», пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина. E-mail: yuon@ied.org.ua; alvalrik@gmail.com**

Исследованы электрогидравлические процессы в насосном агрегате в режиме поддержания постоянного уровня жидкости в резервуаре с помощью синтезированной имитационной модели системы электрический двигатель–насос–гидравлическая сеть. Реализованы основные математические зависимости, связывающие между собой приток жидкости, расход и напор насоса, обороты электродвигателя, активную мощность и коэффициент полезного действия системы. При моделировании рассмотрен режим функционирования насосного агрегата для случая изменения притока жидкости в допустимых пределах от минимального до максимального значений. Приведены графические зависимости, отображающие фазовые траектории относительно гидравлических характеристики и энергетических показателей. Библ. 6, табл. 1, рис. 4.
Ключевые слова: насосный агрегат, частотное регулирование, скалярное управление, стабилизация уровня.

RESEARCH OF THE WORK OF PUMPING UNITS IN THE MODE OF STABILIZATION OF THE LIQUID LEVEL IN THE RESERVOIR BASED ON THE IMITATION MODEL

O.M. Yurchenko[1], **O.V. Chermalykh**[2], **O.V. Danilin**[2]
[1] - **The Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine, pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,**
[2] - **National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.**
E-mail: yuon@ied.org.ua; alvalrik@gmail.com

The article investigates electrohydraulic processes in the pump unit in the mode of maintaining a constant liquid level in the reservoir with the use of imitation model of the system that includes an asynchronous electric drive with frequency regulation and a pump with a hydraulic network. The mathematical components of the model implement the main dependencies that relate the fluid inflow, flow rate and pump head, electric motor angular velocity, active power and system efficiency. The sub-drive of the electric drive is a structural model that implements the required scalar law of voltage regulation using frequency and contains a PID controller in the level stabilization loop. During the simulation, the variable operation mode of the pump unit is considered for the case of liquid inflow change within the acceptable limits from the minimum to the maximum values. Graphic dependencies, that represent phase trajectories with respect to hydraulic characteristics and energy parameters, are shown and analyzed. References 6, table 1, figures 4.
Key words: pumping unit, frequency regulation, scalar control, level stabilization.

1. German-Galkin S.G. Matlab & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC. SPb.: KORONA-Vek, 2008. 368 p. (Rus)
2. Leznov B.S. Variable frequency electric drive of pumping units. Moskva: Mashinostroenie, 2013. 176 p. (Rus)
3. Sotnik N.I., Boiko V.S., Khovanskyy S.O. Energy efficiency of functioning of electromechanical systems as part of water supply networks. *Zhurnal inzhenernykh nauk*. 2014. Vol. 1. No 4. Pp. 1–18. (Ukr)
4. Sotnik N.I., Boiko V.S. Energy processes in the electromechanical system of the water supply network and its electric model. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy*. 2015. Vyp. 4/2015 (32). Pp. 61-68. (Rus)
5. Fashchilenko V.N. Adjustable electric drive of pumping and fan installations of mining enterprises. Moskva: Gornaia kniga, 2011. 260 p. (Rus)
6. Chermalykh O.V., Maidanskyi I.Y., Dotsenko O.B., Zatirka Yu.I. Modeling of technological modes of operation of pumping units with frequency-controlled electric drive. *Problemy enerhoresursozberezhennia v elektrotekhnichnykh systemakh*. 2014. Vyp. 1/2014 (2). Pp. 49-52. (Rus)

Надійшла 15.12.2017
Остаточний варіант 05.09.2018