

**141 ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА,
ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

УДК 621.316.11:621.67

doi: 10.32782/2225-6733.44.2022.4

© Лисяк В.Г.*

**ДИНАМІЧНІ РЕЖИМИ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИХ
АСИНХРОННИХ ВІДЦЕНТРОВИХ ГІДРОАГРЕГАТІВ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ**

Проведено аналіз основних чинних нормативних положень, які регулюють функціонування трубопровідного транспорту. Обґрунтовано системний підхід до дослідження процесів у електротехнічних комплексах потужних насосних станцій, який передбачає композицію їхніх підсистем різної фізичної природи в єдине ціле. Показано, що модернізація насосного обладнання магістральних комплексів робить вагомим потенціал енергозбереження в динамічних режимах. Побудовано формалізовану математичну модель динамічних режимів паралельно працюючих асинхронних відцентрових гідроагрегатів узагальненої насосної станції, яка дозволяє врахувати вплив експлуатаційних та аварійних змін характеристик елементів гідравлічної підсистеми та фізичних параметрів рідини. Запропоновано перспективи використання, шляхи вдосконалення та розширення функціоналу одержаної моделі.

Ключові слова: асинхронний двигун, відцентровий насос, математична модель, трубопровід.

V.H. Lysiak. Dynamic modes of parallel asynchronous centrifugal hydraulic units of the electrotechnical complex of the pumping station. An analysis of the main current regulations governing the operation of pipeline transportation has been performed. Based on this analysis, an approach to the study of processes in electrical complexes of powerful pumping stations, which provides the composition of their subsystems of different physical nature into a single whole has been grounded. Gradual replacement of obsolete pumping equipment of main complexes of liquid transportation with small (75-80%) efficiency for new units with significantly higher (up to 90%) efficiency sets up significant and economically feasible energy saving potential not only in quasi-stationary but in dynamic modes as well. The review of the current state of scientific research of electrical complexes of pumping stations gives grounds to conclude that the generally accepted approach to modelling is not systematic enough. A mathematical model of dynamic modes of parallel asynchronous centrifugal hydraulic units of the electrical complex of the pumping station has been made up. The model is an effective tool for computer research of the pumping stations operation as a whole and their individual subsystems of different physical nature with the aim of improving the energy efficiency. The use in the model of such parameters of centrifugal pumps, which are determined by the geometric dimensions of their structural elements and the properties of the working fluid, makes it possible to take into account the impact of changes in the characteristics of hydraulic subsystem elements on operating modes. Formalization of the vector-matrix form of writing down the equations as well as the modular principle of model construction greatly facilitate the automation of the process of equation formation. Complementing the developed mathematical model with a physical model of the control system will make it possible to obtain an effective tool for forecasting future and

* канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, ORCID: 0000-0002-8371-6455, vladyслав.h.lysiak@lpnu.ua

optimizing the current modes of operation of such complexes without conducting physical experiments on powerful equipment.

Keywords: *asynchronous motor, centrifugal pump, mathematical model, pipeline.*

Постановка проблеми. Транспортування великих об'ємів рідини до розподільчих трубопроводів (ТП) забезпечують великі транзитні об'єкти – магістральні ТП та насосні станції (НС). Потужні НС магістральних нафто- та водопроводів є споживачами великих обсягів електроенергії. Однією з найпотужніших у світі систем магістральних нафтових ТП володіє Україна. «Магістральний трубопровід – технологічний комплекс, що функціонує як єдина система і до якого входить окремий трубопровід з усіма об'єктами і спорудами, зв'язаними з ним єдиним технологічним процесом, або кілька трубопроводів, якими здійснюються транзитні, міждержавні, міжрегіональні поставки продуктів транспортування споживачам, або інші трубопроводи, спроектовані та збудовані згідно з державними будівельними вимогами щодо магістральних трубопроводів» (закон України «Про трубопровідний транспорт» [1]); у цьому ж законі прописані алгоритми випробувань і діагностики магістральних ТП. У нормативних документах [2] і [3] сформульовані вимоги до безперебійності, надійності, безпеки експлуатації, дефектоскопії та діагностики діючих, а також проектування нових комплексів. Зазвичай, доступними є лише проведення регламентованих в [1] дефектоскопії та діагностики, а також моніторинг квазістаціонарних [4] експлуатаційних режимів. В інших випадках фізичне експериментування з перехідними процесами над такими діючими об'єктами є важко здійсненним або неможливим з цілої низки об'єктивних причин [5]. Зважаючи на нерозривність функціонування підсистем різної фізичної природи, з яких складаються такі комплекси, [1] та на проблематичність проведення натурних експериментів зі силовою частиною, перспективним є гібридне моделювання, яке передбачає поєднання комп'ютерної моделі силового обладнання та фізичної моделі мікропроцесорної системи автоматичного керування [6]. Оптимізація споживання енергії потребує всебічного аналізу стаціонарних і динамічних [7] режимів роботи як під час експлуатації діючих, так і на стадії проектування нових електротехнічних комплексів магістральних ТП.

Заміна відцентрових насосів (ВН) НС на сучасні моделі з високим к.к.д. (близько 90% замість 75-80% у застарілих агрегатів) збільшує та робить відчутною частку потенціалу енергозбереження саме в динамічних режимах. Про це свідчить проведений в [8] аналіз, який доводить доцільність частотного керування електроприводом ВН, яка залежить, зокрема, і від к.к.д. самих ВН.

Наведені факти обґрунтовують необхідність удосконалення існуючих та створення нових безпечних засобів для ненатурного дослідження роботи великих багатоагрегатних НС.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У більшості робіт, присвячених дослідженню процесів, які відбуваються в технологічних комплексах ТП, зазвичай акцент робиться на поглибленні математичного опису лише однієї окремої підсистеми: або гідравлічної [9, 10], або електромеханічної [11, 12]. Застосування цільових функцій для оптимізації енергетичних та інших загальних показників технологічних комплексів НС [13, 14] дає важливу загальну інтегральну оцінку режимів їхньої роботи; імітаційні моделі (наприклад, [9, 15]) дають змогу одержати детальнішу інформацію про низку координат режиму. Такий підхід, однак, не відтворює сутності фізичних процесів. Праці [16], [17] присвячені достатньо детальному математичному опису гідравлічної та електромеханічної підсистем одиничного асинхронного електроприводного відцентрового насосного агрегату, однак моделювання динамічних режимів спільної їхньої роботи залишено невирішеним.

Аналіз цих та інших праць дає підстави зробити висновок про недостатню системність підходу до моделювання та дослідження процесів, які відбуваються в нерозривно пов'язаних електромеханічній та гідравлічній частинах електротехнічних комплексів магістральних ТП.

Метою даної роботи є побудова формалізованої математичної моделі динамічних режимів паралельно працюючих асинхронних відцентрових гідроагрегатів (АВН) електротехнічного комплексу насосної станції, яка дозволить досліджувати взаємний вплив складових його підсистем різної фізичної природи, оперуючи при цьому внутрішніми параметрами окремих елементів.

Виклад основного матеріалу. Для побудови узагальненої математичної моделі системи паралельно працюючих АВН НС використано представлені у [16] модель ВН та модель АД

(рівняння записані в системі d-q координат, жорстко зв'язаних зі спільним валом ВН та АД). Ідентифікація параметрів ВН здійснюється за геометричними розмірами його внутрішніх елементів із урахуванням впливу на параметри кінематичної в'язкості та густини робочої рідини [18].

Оскільки в загальному випадку паралельно можуть працювати неоднакові АВН, для запису рівнянь кожного з агрегатів використано окрему систему відносних одиниць з базовими величинами, характерними для кожного них [16].

На рис. 1 наведено узагальнену схему паралельного сполучення гідротрактами насосів АВН, які входять до складу багатоагрегатної НС.

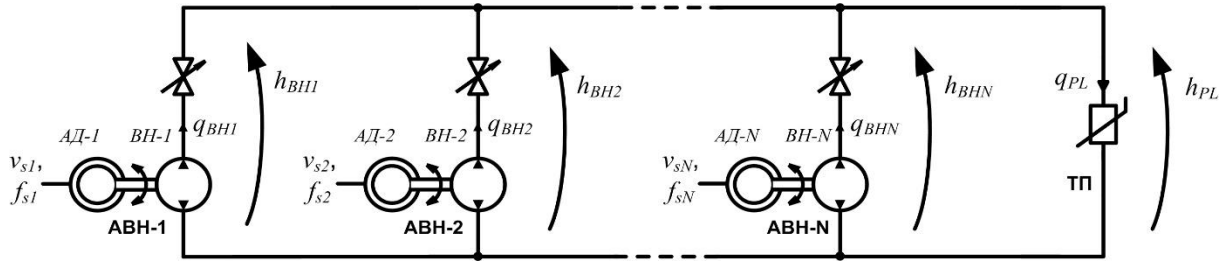


Рис. 1 – Узагальнена схема гідравлічних паралельних сполучень АВН багатоагрегатної НС

Узагальнена система АВН багатоагрегатної НС, у складі якої N відцентрових насосів паралельно працюють на спільний трубопровід, описується системою з $19 \cdot N + 2$ рівнянь:

$$\overline{\mathbf{D}}_i = \overline{\mathbf{P}}_i \times \overline{\mathbf{Q}}_i + \overline{\mathbf{P}}_{0i} \times \mathbf{h}_{0i} + \overline{\mathbf{V}}_i, \quad i = \overline{1, N} \quad (16 \cdot N \text{ рівнянь}); \quad (1)$$

$$h_{L,d} q_{33,q} - h_{L,q} q_{33,d} = 0, \quad i = \overline{1, N} \quad (N \text{ рівнянь}); \quad (2)$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{T_{am,b_i} (\psi_{\delta,d} i_{s,q} - \psi_{\delta,q} i_{s,d}) - T_{cp,b_i} H_{0,nom_i} \omega_i \frac{\omega_{am,b_i}}{\omega_{cp,b_i}} \sqrt{(q_{11,d} + q_{44,d})^2 + (q_{11,q} + q_{44,q})^2} - \Delta T_{m0_i} \omega_i^2}{J_{\Sigma_i} \omega_{am,b_i}}, \quad i = \overline{1, N} \quad (N \text{ рівнянь}); \quad (3)$$

$$\left(\frac{H_{cp,b_i}}{H_{cp,b_{i+1}}} \right)^2 (h_{L,d}^2 + h_{L,q}^2) = (h_{L_{i+1},d}^2 + h_{L_{i+1},q}^2), \quad i = \overline{1, N-1} \quad (N-1 \text{ рівнянь}); \quad (4)$$

$$h_L = \left(\frac{H_{cp,b_i}}{H_b} \right) \sqrt{h_{L,d}^2 + h_{L,q}^2}, \quad i - \text{довільне в діапазоні від 1 до } N \quad (1 \text{ рівняння}); \quad (5)$$

$$q_L = \sum_{i=1}^N \frac{Q_{cp,b_i}}{Q_b} q_{L_i} \quad (1 \text{ рівняння}); \quad (6)$$

$$dq_L/dt = -(r_L/L_L) q_L + (1/L_L) h_L - (1/L_L) h_{st} \quad (1 \text{ рівняння}), \quad (7)$$

де $\overline{\mathbf{Q}}_i = (q_{11i}, q_{22i}, q_{33i}, q_{44i}, i_{s_i}, i_{r_i}, e_{\delta_i}, \psi_{\delta_i})_i$; $\overline{\mathbf{P}}_{0i} = (-1/L_{1i}, -1/L_{2i}, -1/L_{3i}, 1/L_{mech_i}, 0, 0, 0, 0)_i$;

$\mathbf{h}_{0i} = \omega_i^2 H_{0,nom_i} \left(\frac{\omega_{am,b_i}}{\omega_{cp,b_i}} \right)^2 \left(\cos(\omega_i \omega_{am,b_i} t + \Psi_{0cp_i}) + j \sin(\omega_i \omega_{am,b_i} t + \Psi_{0cp_i}) \right) = h_{0,d} + j h_{0,q}$;

$\overline{\mathbf{D}}_i = (dq_{11i}/dt, dq_{22i}/dt, dq_{33i}/dt, dq_{44i}/dt, di_{s_i}/dt, di_{r_i}/dt, d\psi_{\delta_i}/dt, 0)_i$;

$\overline{\mathbf{V}}_i = (0, 0, 0, 0, v_{s_i}/L_{s_i}, 0, 0, 0)_i$; ω_{am,b_i} , T_{am,b_i} – базові значення частоти та моменту i -го АД;

ω_{cp,b_i} , H_{cp,b_i} , Q_{cp,b_i} – базові значення частоти, напору та об'ємної витрати робочої рідини i -го ВН;

H_b, Q_b – базові значення напору та об’ємної витрати ТП;

$$\tilde{\mathbf{P}}_i = \begin{pmatrix} \frac{r_{11_i}}{L_{11_i}} & \frac{r_{21_i}}{L_{12_i}} & \frac{r_{22_i}}{L_{12_i}} & \frac{r_{32_i}}{L_{13_i}} & \frac{r_{33_i}}{L_{13_i}} & \frac{r_{23_i}}{L_{12_i}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{r_{11_i}}{L_{21_i}} & \frac{r_{21_i}}{L_{22_i}} & \frac{r_{22_i}}{L_{22_i}} & \frac{r_{32_i}}{L_{23_i}} & \frac{r_{33_i}}{L_{23_i}} & \frac{r_{23_i}}{L_{22_i}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{r_{11_i}}{L_{31_i}} & \frac{r_{21_i}}{L_{32_i}} & \frac{r_{22_i}}{L_{32_i}} & \frac{r_{32_i}}{L_{33_i}} & \frac{r_{33_i}}{L_{33_i}} & \frac{r_{23_i}}{L_{32_i}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-r_{mech_i}(q_{L_i})}{L_{mech_i}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-R_{s_i}}{L_{s_i}} - j\omega_{s_i} & 0 & 0 & \frac{-1}{L_{s_i}} & \frac{-j\omega_{s_i}}{L_{s_i}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-\omega_{s_i} R_{r_i}}{L_{r_i}} - j(\omega_{s_i} - \omega_{r_i}) & \frac{-\omega_{s_i}}{L_{r_i}} & \frac{j(\omega_{s_i} - \omega_{r_i})}{L_{r_i}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & -R_{m_i}(\psi_{\delta_i}) - \frac{j\omega_{s_i}}{R_{a_i}} & 0 \end{pmatrix}$$

де $q_L = \sqrt{q_{Ld}^2 + q_{Lq}^2} = \sqrt{q_{33d_i}^2 + q_{33q_i}^2}$ (i – довільне в діапазоні від 1 до N), $h_L = \sqrt{h_{Ld}^2 + h_{Lq}^2}$ – сумарна об’ємна витрата робочої рідини на вході трубопроводу та напір цієї рідини, відповідно; h_{st} – статичний протинапір трубопроводу; $\mathbf{v}_{si} = v_{sid} + jv_{siq}$, ω_{si} , ω_{ri} – напруга статора, частота напруги статора АД та частота обертання вала i -го АВН; t – час. Детальне пояснення інших величин, що входять до складу вищенаведених рівнянь, наведено в [16], [18].

Кожний окремих АВН описується рівняннями (1), (2) та (3); паралельне з’єднання ВН усіх АВН та робота їх усіх на спільний ТП задається рівняннями (4), (5) та (6); спрощену модель ТП представлено рівнянням (7).

Працездатність і коректність моделі було верифіковано в системі Mathcad шляхом її адаптації до двоагрегатної системи АВН, яка складається з однакових агрегатів (їхні параметри наведені в таблицях 1 і 2; електроживлення обох АД відбувалось зі спільних шин від системи з $R_{с.ном} = 0,04$ Ом, $X_{с.ном} = 0,32$ Ом), та виконання тестових розрахунків нижчеописаних експлуатаційних та аварійних режимів. Момент інерції ВН враховано як 15% моменту інерції АД.

Таблиця 1

Параметри АД-1, АД-2 типу 4АН355М6У3

$P_{ном}$, кВт	$\eta_{ном}$	$V_{s,ном}$, В	$n_{ном}$, об/хв	$\cos\phi_{ном}$	p_0	$T_{макс}^*$	$T_{мін}^*$	T_s^*	I_s^*	$J_{ам}$, кг·м ²
250	0,935	380	985	0,9	3	2,2	0,9	1,4	7	9,5

Таблиця 2

Параметри ВН-1, ВН-2 типу 14НДс-Н

$H_{ном}$, М	$Q_{ном}$, М ³ /ГОД	$\eta_{ном}$	$n_{ном}$, об/хв	$P_{с,ном}$, кВт	$H_{0,ном}^*$	$R_{\Delta Q}^*$	$L_{\Delta Q}^*$	$R_{\Delta H}^*$	$L_{\Delta H}^*$	L_t^*	$L_{\mu H}^*$	$L_{\mu Q}^*$	R_{mech}^*	L_{mech}^*
45	1260	0,809	980	154	1,302	29,47	9,49	$6,627 \cdot 10^{-4}$	0,4144	0,00876	0,0352	0,2375	7,180	0,02287

Прямий пуск АД-1 агрегату АВН-1 починався у момент часу $t = 0,1$ с; прямий пуск АД-2 агрегату АВН-2 починався у момент часу $t = 2,0$ с (гідравлічні запірні вентиля ВН були закриті до завершення процесу пуску відповідних їм АД). Після завершення пуску АД-1 в момент часу $t = 5,0$ с на протязі 0,5 с плавно відкрився гідравлічний запірний вентиль насоса ВН-1; після завершення пуску АД-2 в момент часу $t = 8,0$ с на протязі 0,5 с плавно відкрився гідравлічний

запірний вентиль насоса ВН-2. Вплив повної розгерметизації (обриву) ТП змодельовно шляхом короткого замикання, яке виникло в момент часу $t = 11,0$ с і рівномірно наростало протягом $0,1$ с. Після виникнення цієї аварійної ситуації в момент часу $t = 13,0$ с протягом $0,5$ с плавно одночасно перекрилися гідравлічні запірні вентилі насосів обох агрегатів. Окремі результати комп'ютерних експериментів наведені на рис. 2-9. На цих же рисунках додатково наведені каталожні параметри ВП та розраховані за каталожними даними номінальні параметри АД.

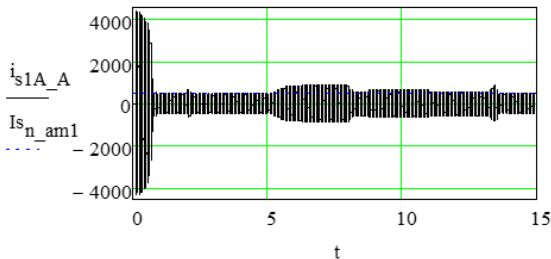


Рис. 2 – Струм фази А статора АД-1, А

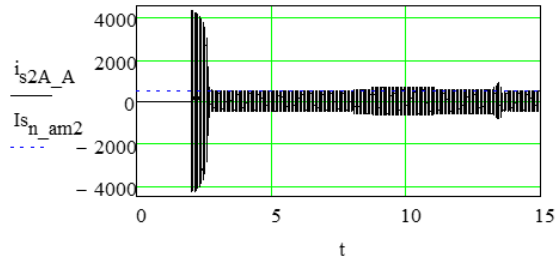


Рис. 3 – Струм фази А статора АД-2, А

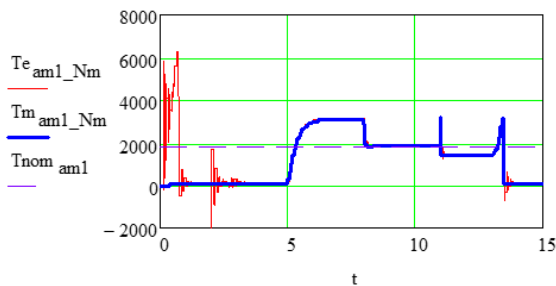


Рис. 4 – Електромагн. і мех. моменти АД-1, Н·м

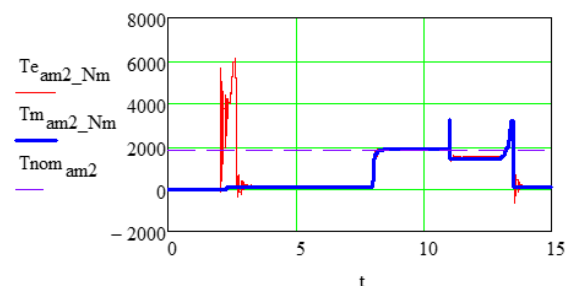


Рис. 5 – Електромагн. і мех. моменти АД-2, Н·м

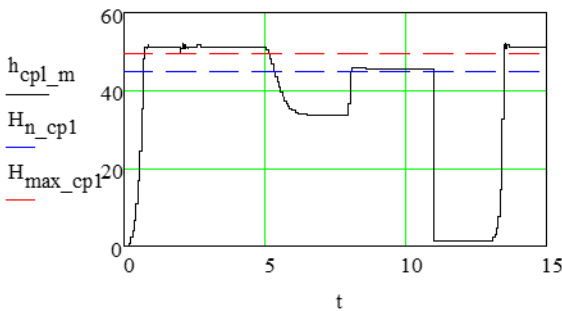


Рис. 6 – Напір робочої рідини ВН-1, м

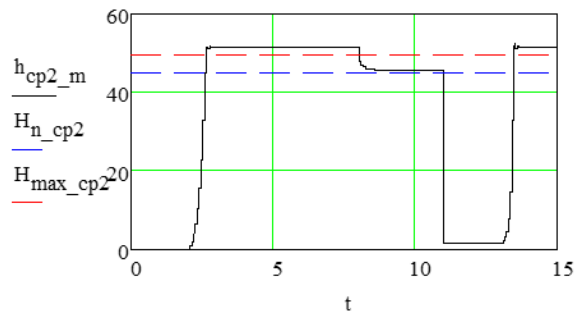


Рис. 7 – Напір робочої рідини ВН-2, м

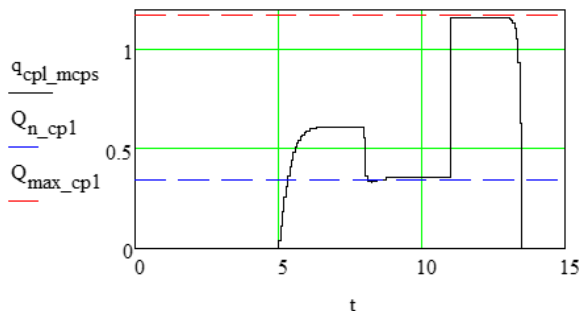


Рис. 8 – Витрата робочої рідини ВН-1, м³/с

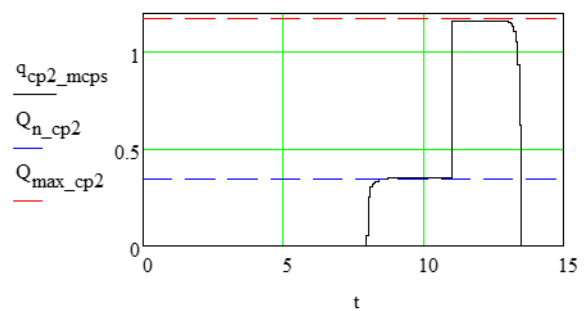


Рис. 9 – Витрата робочої рідини ВН-2, м³/с

Збіжність номінальних каталожних параметрів агрегатів та одержаних в результаті комп'ютерних експериментів координат граничних і номінальних стаціонарних режимів, а також

характер протікання перехідних процесів в електромеханічній та гідравлічній підсистемах НС дають підстави зробити висновок про коректність розробленої математичної моделі.

Висновки

Розроблено математичну модель динамічних режимів паралельно працюючих асинхронних відцентрових гідроагрегатів електротехнічного комплексу насосної станції. Одержана модель є ефективним інструментом для комп'ютерних досліджень режимів роботи насосних станцій як в цілому, так і їхніх окремих підсистем різної фізичної природи з урахуванням взаємного впливу з метою підвищення енерго- та ресурсоефективності. Застосування в моделі таких параметрів відцентрових насосів, ідентифікація яких проводиться за геометричними габаритами їх конструктивних елементів і властивостями робочої рідини, дозволяє врахувати вплив експлуатаційних та аварійних змін характеристик елементів гідравлічної підсистеми на режими роботи. Формалізація векторно-матричної форми запису рівнянь та модульний принцип побудови моделі значно розширюють можливості її практичного застосування для досліджень режимів роботи електротехнічних комплексів багатоагрегатних насосних станцій шляхом автоматизації процесу формування рівнянь. Доповнення розробленої математичної моделі фізичною моделлю системи керування дасть змогу одержати ефективний інструмент для прогнозування майбутніх та оптимізації поточних режимів роботи таких комплексів без проведення фізичних експериментів на силовому обладнанні.

Перелік використаних джерел:

1. Про трубопровідний транспорт [Електронний ресурс]: Закон України від 15.05.1996 р. № 192/96-ВР // Відомості Верховної Ради (ВВР). – 1996. – № 29. – Ст. 139. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/192/96-%D0%B2%D1%80#Text>.
2. ДБН В.2.5-74:2013 Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. – Введ. 2014-01-01. – Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. – 172 с. – Режим доступу: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1084>.
3. Про затвердження Правил безпеки під час експлуатації магістральних нафтопроводів: Наказ Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду від 23.05.2007 р. № 110. – Держгірпромнагляду, 2007. – 78 с. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1389-07>.
4. Моделювання усталених режимів електромережі із синхронним електроприводом гідравлічного навантаження / В.Г. Лисяк, М.Й. Олійник, М.Б. Сабат, Ю.Л. Шелех // Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2019. – Вип. 1, № 1. – С. 36-45. – Режим доступу: <https://doi.org/10.23939/sepes2019.01.036>.
5. Федоров А.В. Система бесперебойного электроснабжения технологических объектов нефтегазового комплекса : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Алексей Вячеславович Федоров. – Санкт-Петербург, 2016. – 20 с.
6. MMC-HVDC Simulation and Testing Based on Real-Time Digital Simulator and Physical Control System / K. Ou [et al.] // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2014. – Vol. 2, no. 4. – Pp. 1109-1116. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2337512>.
7. Мукани Эме Б. Режимы работы систем электроснабжения объектов нефтегазовых месторождений : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Борис Мукани Эме. – Москва, 2011. – 25 с.
8. Мухортов И.С. Повышение энергетической эффективности группы электроприводов систем поддержания пластового давления : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Иван Сергеевич Мухортов. – Самара, 2014. – 25 с.
9. Андрушак С.В. Математическое и имитационное моделирование процесса транспорта и дозирования шлама / С.В. Андрушак, П.В. Беседин // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Экономика. Информатика. – 2016. – № 16. – С. 115-122.
10. Мелихов А.Ю. Разработка энергосберегающего алгоритма управления плавным пуском асинхронных двигателей насосной станции. Часть 3. Математическая модель

- гидравлической подсистемы насосной станции / А.Ю. Мелихов // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – № 3-2(37). – С. 263-267.
11. Костишин В.С. Аналіз показників ефективності та надійності роботи насосного агрегату на засадах системного підходу / В.С. Костишин, І.І. Яремак // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2017. – № 1. – С. 50-60.
 12. Куцик А.С. Математична модель системи «частотно-керований електропривод – насос – водопровідна мережа» / А.С. Куцик, А.О. Лозинський, О.Ф. Кінчур // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2015. – № 834. – С. 48-55. – (Серія: Електроенергетичні та електромеханічні системи).
 13. Яремак І.І. Багатоцільова оптимізація установчих режимів роботи електроприводної нафтоперекачувальної станції / І.І. Яремак, В.С. Костишин // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2018. – Вип. 1. – С. 15-21. – Режим доступу: <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2018.1.15-21>.
 14. Лезнов Б.С. Применение регулируемого электропривода в насосных установках систем водоснабжения и водоотведения / Б.С. Лезнов // Экологические системы: электронный журнал энергосервисной компании. – Кременчуг, 2010. – № 11. – С. 9-12.
 15. Misiunas D. Burst Detection and Location in Pipelines and Pipe Networks with application in water distribution systems / D. Misiunas. – Sweden : Lund, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation Lund University, 2004. – 113 p.
 16. Лисяк В.Г. Моделювання динамічних режимів роботи асинхронного електроприводу з відцентровим насосним навантаженням / В.Г. Лисяк, М.Й. Олійник // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. – Маріуполь: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2021. – Вип. 42. – С. 113-121. – (Серія: Технічні науки). – Режим доступу: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.42.2021.240665>.
 17. Костишин В.С. Дослідження динамічних режимів роботи електроприводних відцентрових насосних агрегатів за допомогою їхніх комп'ютерно-орієнтованих Bond Graph моделей / В.С. Костишин, П.О. Курляк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 2. – С. 148-153.
 18. Костишин В.С. Моделювання режимів роботи відцентрових насосів на основі електрогидравлічної аналогії : дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.13 / Костишин Володимир Степанович; Івано-Франківський національний техн. ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2003. – 342 с.

References:

1. *Zakon Ukrainy № 192/96-VR vid 15.05.1996 r. Pro truboprovodnyi transport* [Law of Ukraine № 192/96-BP dated 15.05.1996. About pipeline transport] Available at: www.zakon.rada.gov.ua/laws/show/192/96-%D0%B2%D1%80#Text (accessed 14 January 2021). (Ukr.)
2. *Derzhavni budivel'ni normi V.2.5-74:2013 Vodopostachannia. Zovnishni merezhi ta sporudy. Osnovni polozhennia proektuvannia* [State construction standards V.2.5-74:2013 Water supply. Zovnishni merezhi ta sporudi. Basic provisions of the design]. Kyiv, 2013. 172 p. Available at: www.dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1084 (accessed 14 January 2021). (Ukr.)
3. *Nakaz Derzhavnoho komitetu Ukrainy z promyslovoi bezpeky, okhorony pratsi ta hirnychoho nahliadu № 1389/14656 vid 19.12.2007 r. Pro zatverdzhennia Pravyl bezpeky pid chas ekspluatatsii mahistralnykh naftoprovodiv* [Order of the State Committee of Ukraine for Industrial Safety, Labor Protection and Mining Supervision № 110 dated 23.05.2007. On approval of the Safety Rules during the operation of main oil pipelines]. Kyiv, 2007. 78 p. Available at: www.zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1389-07 (accessed 14 January 2021). (Ukr.)
4. Lysiak V.H., Oliinyk M.I., Sabat M.B., Shelekh Yu.L. Modeliuvannia ustalenykh rezhymiv elektromerezh iz synkhronnym elektropyvodom hidravlichnoho navantazhennia [Simulation of steady-state power grid modes with synchronous electric drive hydraulic load]. *Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy – Electrical Power and Electromechanical Systems*, 2019, vol. 1, № 1, pp. 36-45. doi: 10.23939/sepes2019.01.036. (Ukr.)
5. Fedorov A.V. *Systema bespereboinoho elektrosnabzhenyia tekhnolohycheskykh objektov nefte hazovoho kompleksa*. Avtoref. diss. kand. techn. nauk [Uninterruptible power supply system of technological facilities of the oil and gas complex. Cand. tech. sci. diss. thesis]. St. Petersburg,

2016. 20 p. (Rus.)
6. Ou K., Rao H., Cai Z., Guo H., Lin X., Guan L., Maguire T., Warkentin B., Chen Y. MMC-HVDC Simulation and Testing Based on Real-Time Digital Simulator and Physical Control System. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2014, vol. 2, no. 4, pp. 1109-1116. doi: **10.1109/JESTPE.2014.2337512**.
 7. Mukani Eme B. *Rezhimy raboty sistem elektrosnabzheniia ob'ektov neftegazovykh mestorozhdenii*. Avtoref. diss. kand. techn. nauk [Modes of operation of power supply systems of oil and gas fields. Cand. tech. sci. diss. thesis]. Moscow, 2011. 25 p. (Rus.)
 8. Mukhortov I.S. *Povyshenie energeticheskoi effektivnosti gruppy elektroprivodov sistem podderzhaniiia plastovogo davleniia*. Avtoref. diss. kand. techn. nauk [Improving the energy efficiency of a group of electric drives of reservoir pressure maintenance systems. Cand. tech. sci. diss. thesis]. Samara, 2014. 25 p. (Rus.)
 9. Andrushak S.V., Besedin P.V. Matematicheskoe i imitatsionnoe modelirovanie protsessa transporta i dozirovaniia shlama [Mathematical and simulation modeling of the process of sludge transport and dosing]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika. Informatika – Belgorod State University. Scientific Bulletin. Series: Economics. Information technologies*, 2016, № 16, pp. 115-122. (Rus.)
 10. Melikhov A.Iu. Razrabotka energosberegaiushchego algoritma upravleniia plavnym puskom asinkhronnykh dvigatelei nasosnoi stantsii. Chast' 3. Matematicheskaia model' gidravlicheskoj podsystemy nasosnoi stantsii [Development of an energy-saving algorithm for controlling the smooth start of asynchronous motors of a pumping station. Part 3. Mathematical model of hydraulic sub-system of pumping station]. *Sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii – Automation and Remote Control*, 2009, № 3-2(37), pp. 263-267. (Ukr.)
 11. Kostishin V.S., Iaremak I.I. Analiz pokaznikov effektivnosti ta nadiinosti roboti nasosnogo agregatu na zasadakh sistemnogo pidkhodu [Analysis of efficiency and reliability of the pump unit on the basis of a systematic approach]. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovishch – Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, 2017, № 1, pp. 50-60. (Ukr.)
 12. Kutsik A.S., Lozins'kii A.O., Kinchur O.F. Matematichna model' sistemi «chastotno-kerovanii elektroprivod – nasos – vodoprovodna mreza» [Mathematical model of the system «frequency-controlled electric drive - pump - water supply network»]. *Visnik Natsional'nogo universitetu «Lviv's'ka politekhnika». Serii: Elektroenergetichni ta elektromekhanichni sistemi – Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series: Electrical Power and Electromechanical Systems*, 2015, № 834, pp. 48-55. (Ukr.)
 13. Iaremak I.I., Kostishin V.S. Bagatotsil'ova optimizatsiia ustanovchikh rezhimiv roboti elektroprivodnoi naftoperekachuval'noi stantsii [Multi-purpose optimization of the operating modes of the electric oil pumping station]. *Visnik Kremenchuts'kogo natsional'nogo universitetu imeni Mikhaila Ostrograds'kogo – Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University*, 2018, vol. 1, pp. 15-21. doi: **10.30929/1995-0519.2018.1.15-21**. (Ukr.)
 14. Leznov B.S. Primenenie reguliruemogo elektroprivoda v nasosnykh ustanovkakh sistem vodosnabzheniia i vodootvedeniia [Application of the regulated electric drive in pump installations of systems of water supply and drainage]. *Ekologicheskie sistemy: elektronnyi zhurnal energoservisnoi kompanii – Ecological systems: electronic journal of the energy service company*, 2010, № 11, pp. 9-12. (Rus.)
 15. Misiunas D. Burst Detection and Location in Pipelines and Pipe Networks with application in water distribution systems. Lund, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation Lund University Publ., 2004. 113 p.
 16. Lysiak V.H., Oliinyk M.Y. Modeliuvannia dinamichnikh rezhimiv roboti asinkhronnogo elektroprivodu z vidtsentrovim nasosnim navantazhenniam [Simulation of dynamic operating modes of asynchronous electric drive with cen-trifugal pump load]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Serii: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2021, vol. 42, pp. 113-121. doi: **10.31498/2225-6733.42.2021.240665**. (Ukr.)
 17. Kostishin V.S., Kurliak P.O. Doslidzhennia dinamichnikh rezhimiv roboti elektroprivodnykh vidtsentrovnykh nasosnykh agregativ za dopomogoiu ikhnykh komp'uterno-orientovanykh Bond Graph

modelei [Investigation of dynamic modes of operation of electric centrifugal pump units using their computer-oriented Bond Graph models]. *Visnik Vinnits'kogo politekhnichnogo institutu – Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, 2012, № 2, pp. 148-153. (Ukr.)

18. Kostishin V.S. *Modeliuvannia rezhimiv roboti vidtsentrovikh nasosiv na osnovi elektrogidravlichnoï analogii*. Diss. dokt. techn. nauk [Modeling of operation modes of centrifugal pumps based on electrohydraulic analogy. Doct. tech. sci. diss.]. Ivano-Frankivsk, 2003. 342 p. (Ukr.)

Рецензент: М.Б. Сабат
канд. техн. наук, доцент, НУ «Львівська політехніка»

Стаття надійшла 15.11.2021