

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА  
ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

УДК 621.316.11:621.67

doi: 10.31498/2225-6733.42.2021.240665

© Лисяк В.Г.<sup>1</sup>, Олійник М.Й.<sup>2</sup>**МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ АСИНХРОННОГО  
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ВІДЦЕНТРОВИМ НАСОСНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**

Проведено огляд та аналіз різних підходів до моделювання режимів роботи асинхронного електроприводу з відцентровими агрегатами насосних станцій. Показано, що сучасні дослідження з цієї тематики переважно зосереджені або на системах керування електроприводу насосів, або на гідравлічній підсистемі, або на оптимізації енергетичних та економічних макропоказників режимів роботи насосних станцій в цілому. Запропоновано математичну модель динамічних режимів роботи асинхронного електроприводного відцентрового насосного агрегату з трубопроводом, у якій зі збалансованим ступенем деталізації представлено електромеханічну та гідравлічну підсистеми. Проведено тестування розробленої моделі шляхом комп'ютерного симулювання низки експлуатаційних та аварійних режимів.

**Ключові слова:** математична модель, асинхронна машина, відцентровий насос, гідравлічна мережа.

*V.H. Lysiak, M.Y. Oliinyk. Simulation of dynamic operating modes of asynchronous electric drive with centrifugal pump load. A review and analysis of different approaches to modelling the operating modes of an asynchronous electric drive with centrifugal units of pumping stations has been performed. It has been shown that modern researches of this subject are mainly focused either on the control systems of the electric drive of pumps, or on the hydraulic subsystem, or on the optimization of energy and economic macro indicators of pumping stations in general. As a rule, in most works only one of the subsystems of the pumping station is modelled in an expanded form: either electromechanical or hydraulic; the other one is usually presented in a very simplified way (by approximating the experimentally obtained tabular data). This significantly limits the ability to study efficiently the physical processes that take place simultaneously in these inextricably linked subsystems, and extends the range of the proper specialists involved in solving relevant tasks. One way to solve this problem may be to develop a mathematical model in which both subsystems would be presented with a comparable level of detailing. The paper proposes a mathematical model of dynamic operating modes of an asynchronous electric centrifugal pump unit with a pipeline, in which the electromechanical and hydraulic subsystems are presented with a balanced level of detailing. The equations of the mathematical model are formed in orthogonal d-q coordinates rigidly connected to the rotor of the asynchronous machine in relative units using a system of basic quantities and are solved with respect to the first derivatives. The proposed model can be used for analyzing the operating modes of the existing high-capacity pumping stations and their power supply systems without making physical experiments, and for designing new facilities as well.*

**Keywords:** mathematical model, asynchronous machine, centrifugal pump, hydraulic network.

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, ORCID: 0000-0002-8371-6455, [vladyslav.h.lysiak@lpnu.ua](mailto:vladyslav.h.lysiak@lpnu.ua)

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, ORCID: 0000-0003-0285-1872, [mykhailo.y.oliinyk@lpnu.ua](mailto:mykhailo.y.oliinyk@lpnu.ua)

**Постановка проблеми.** Потужні насосні станції є стратегічно важливими об'єктами, які споживають значну кількість електроенергії [1]. Незважаючи на переважання квазістаціонарних режимів роботи (до них можна віднести тривалі режими великих розподільчих і магістральних станцій, координати яких змінюються дуже повільно в часі [2] внаслідок незначних змін витрат рідини), планові увімкнення (вимкнення) окремих насосних агрегатів, а також аварійні процеси можуть супроводжуватись багатократно підвищеним енергоспоживанням [3] та імовірністю пошкоджень. Враховуючи стратегічне значення таких потужних об'єктів, а також велику вартість (а нерідко – й неможливість) зупинки для проведення фізичних експериментів, оптимальним шляхом їх дослідження залишається комп'ютерне симулювання, що потребує відповідних інструментів. Загальновідомо, що асинхронні машини (АМ) переважають серед усього приводу, зокрема – відцентрових насосів (ВН); тому питання моделювання таких систем з метою досягнення їхньої максимальної енергоефективності залишаються актуальними.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Потужну систему перекачування рідини можна представити як сукупність двох підсистем різної фізичної природи: гідравлічної (ВН з трубопроводами (ТП)) та електромеханічної: система електропостачання регульованого електроприводу ВН, які нерозривно пов'язані між собою. Тому вбачається доцільним застосування комплексного підходу до моделювання таких об'єктів. На прикладі робіт, наведених нижче, на сьогодні можна виділити наступні основні напрямки сучасних досліджень систем перекачування рідини. Перша група – роботи, присвячені оптимізації макропоказників насосних станцій або їхніх каскадів в цілому [3, 4]. До другої групи можна віднести праці, в яких детально розглядається лише одна з підсистем насосної станції: електромеханічна [2, 5, 6] чи гідравлічна [7, 8], інша ж підсистема моделюється спрощено. Специфічним напрямком є розроблення спеціалізованих моделей для дослідження окремих показників, зокрема діагностики пошкоджень [9-11]; нерідко використовується імітаційне моделювання (напр., [8, 11]), яке, незважаючи на свою ефективність, не дає розуміння фізичної сутності процесів. Окрема група робіт присвячена моделюванню усталених режимів [12-14]. Так, у [13] на основі узагальненої моделі [14] розроблено систему керування усталеними режимами електротехнічного комплексу насосної станції. Остання група, яку доцільно виділити серед інших, це роботи, в яких наведені моделі динамічних режимів систем електропривод – ВН з високою деталізацією математичного опису кожної з підсистем [15, 16]. На нашу думку, спільним для всіх наведених прикладів досліджень є недостатність загального уніфікованого підходу до побудови моделі системи перекачування рідини.

**Метою даної роботи** є побудова на засадах уніфікованого підходу математичної моделі динамічних режимів асинхронного електроприводу з відцентровим насосним навантаженням (АЕВН), яка давала би змогу зі співставною деталізацією досліджувати процеси, які одночасно відбуваються у гідравлічній та в електромеханічній підсистемах як у цілому, так і в їхніх конструктивних елементах зокрема.

**Виклад основного матеріалу.** Для побудови математичної моделі рівняння записуємо у відносних одиницях із використанням характерної кожної з них підсистем АЕВН системи базових величин. З метою уніфікації моделі рівняння сформовані в жорстко зв'язаних зі спільним валом АЕВН ортогональних  $d-q$  координатах. На рисунку 1 представлена схема сполучень електромеханічної та гідравлічної підсистем АЕВН.

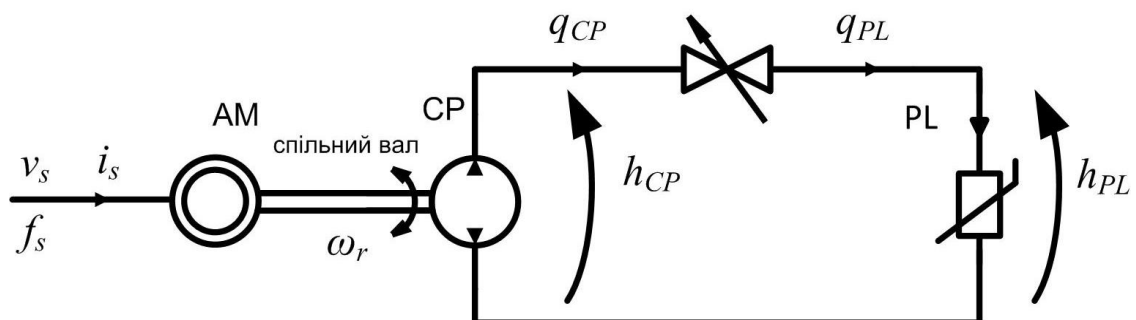


Рис. 1 – Структурна схема АЕВН

Рівняння моделі АМ сформовані на підставі узагальнених рівнянь електромеханічного перетворювача з урахуванням таких припущень: температурний режим є усталеним, параметри обмоток зосереджені; вебер-амперна характеристика магнітної системи є нелінійною, вплив форми осердя на розподіл магнітного поля не враховується. Рівняння сформовані з використанням такої системи базових величин:

$$\omega_{im,b} = \omega_s; V_{im,b} = \sqrt{2/3} V_{im,nom}; T_{im,b} = S_{im,b} / \omega_{im,b} = P_{im,nom} / (\eta_{im,nom} \cos \varphi_{im,nom} \omega_{im,nom});$$

$$Z_{im,b} = V_{im,b} / I_{im,b} = V_{im,nom}^2 \eta_{im,nom} \cos \varphi_{im,nom} \omega_{im,nom} / P_{im,nom},$$

де  $\omega_s, V_{im,nom}, P_{im,nom}, \eta_{im,nom}, \cos \varphi_{im,nom}$  – номінальні паспортні параметри АМ. За основу взято запропоновану в [17] модель насиченої АМ, особливістю якої є врахування насичення у вигляді залежного від потокозчеплення нелінійного магнітного опору її головного магнітного кола.

Для формування рівнянь гідравлічної підсистеми за основу взято наведену в [18] математичну модель ВН з трубопроводом, сформовану на базі представленої в [19, 20] моделі, що базується на принципі електрогідродинамічної аналогії, з урахуванням таких припущень: температурний режим роботи є усталеним, робоча рідина є нестисливою та однорідною. Це дає можливість дослідження роботи як в цілому ВН та ТП, так і основних їхніх внутрішніх конструктивних елементів з урахуванням впливу фізичних параметрів робочої рідини та режимів її pompування. Рівняння сформовані з використанням наступної системи базових величин:

$$\omega_{cp,b} = \omega_{cp,nom}; H_{cp,b} = H_{cp,nom}; Q_{cp,b} = Q_{cp,nom};$$

$$T_{cp,b} = S_{cp,b} / \omega_{cp,b} = \rho g H_{scp,b} Q_{scp,b} / \omega_{cp,b}; Z_{p,b} = \rho g H_{cp,b} / Q_{cp,b},$$

де  $\omega_{cp,nom}, H_{cp,nom}, Q_{cp,nom}$  – номінальні паспортні параметри ВН,  $\rho, g$  – густина робочої рідини та пришвидшення вільного падіння. Механічний момент  $T_m$  опору гідравлічної підсистеми з урахуванням дисипативних втрат енергії на вентилювання та тертя в підшипниках представлений з урахуванням наступних припущень: температурний режим є усталеним, вважаємо абсолютно жорсткими ротор АМ, робоче колесо ВН та спільний вал. За базове значення частоти, спільне для обох підсистем, приймаємо базове значення частоти АМ:  $\omega_b = \omega_{im,b}$ .

Загальну математичну модель АЕВН сформовано з описаних вище моделей її підсистем. Для зручності при її використанні у системах комп'ютерної математики рівняння розв'язані відносно перших похідних. Рівняння (1) описує електромеханічну, а рівняння (2), (3) і (4) – гідравлічну підсистеми. Зокрема, рівняння (4) встановлює згідно [19] виконання умови колінеарності зображальних векторів дійсного напору та дійсної витрати на виході ВН. Рівняння (5) руху спільного вала АЕВН об'єднує електромеханічні та гідравлічні координати режиму АМ та ВН.

$$\begin{pmatrix} d\mathbf{i}_s/dt \\ d\mathbf{i}_r/dt \\ d\psi_\delta/dt \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_s/L_{\sigma s} - j\omega_s & 0 & -1/L_{\sigma s} & -j\omega_s/L_{\sigma s} \\ 0 & -\omega_s R_r/L_{\sigma r} - j(\omega_s - \omega_r) & -\omega_s/L_{\sigma r} & j(\omega_s - \omega_r)/L_{\sigma r} \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & -R_m(\psi_\delta) - j\omega_s/R_a \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \\ \mathbf{e}_\delta \\ \psi_\delta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{v}_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} dq_{11}/dt \\ dq_{22}/dt \\ dq_{33}/dt \\ dq_{44}/dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11}/L_{11} - r_{21}/L_{12} & r_{22}/L_{12} - r_{32}/L_{13} & r_{33}/L_{13} - r_{23}/L_{12} & 0 \\ r_{11}/L_{21} - r_{21}/L_{22} & r_{22}/L_{22} - r_{32}/L_{23} & r_{33}/L_{23} - r_{23}/L_{22} & 0 \\ r_{11}/L_{31} - r_{21}/L_{32} & r_{22}/L_{32} - r_{32}/L_{33} & r_{33}/L_{33} - r_{23}/L_{32} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r_{mech}(q_L)/L_{mech} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \mathbf{q}_{11} \\ \mathbf{q}_{22} \\ \mathbf{q}_{33} \\ \mathbf{q}_{44} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1/L_{11} \\ -1/L_{21} \\ -1/L_{31} \\ 1/L_{mech} \end{pmatrix} \times \mathbf{h}_0; \quad (2)$$

$$\frac{dq_L}{dt} = -\frac{r_L}{L_{L1}} q_L + \frac{1}{L_L} h_L - \frac{1}{L_L} h_{st}; \quad (3)$$

$$h_{Ld}q_{33q} - h_{Lq}q_{33d} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J_{\Sigma}\omega_b} \left( T_{sm,b} (\Psi_{\delta d} i_{sq} - \Psi_{\delta q} i_{sd}) - T_{cp,b} H_{0,nom} \omega_r \frac{\omega_b}{\omega_{cp,b}} \sqrt{(q_{11d} + q_{44d})^2 + (q_{11q} + q_{44q})^2} - \Delta T_{m0} \omega_r^2 \right), \quad (5)$$

де  $t$  – час;  $\omega_s, \omega_r$  – колова частота напруги обвитки статора АМ та колова частота обертання спільного з ВН вала;  $\mathbf{v}_s = (v_{sd}, v_{sq})_t$ ,  $\mathbf{i}_s = (i_{sd}, i_{sq})_t$ , та  $\mathbf{i}_r = (i_{rd}, i_{rq})_t$  – напруга і струм статора, а також зведений до обмотки статора струм ротора АМ;  $\Psi_{\delta} = (\Psi_{\delta d}, \Psi_{\delta q})_t$  – зведене до обвитки статора потокозчеплення від магнітного потоку повітряного проміжку АМ;  $R_s, L_{\sigma s}, R_r, L_{\sigma r}$  – активні опори та індуктивності розсіяння статора та зведені до статора активні опори та індуктивності розсіяння ротора АМ відповідно;  $R_a$  – еквівалентний опір, який враховує втрати активної енергії у сталевому осердді АМ;  $\mathbf{h}_0 = \omega_r^2 H_{0,nom} (\omega_b / \omega_{cp,b})^2 (\cos(\omega_r \omega_b t + \Psi_{0cp}) + j \sin(\omega_r \omega_b t + \Psi_{0cp})) = h_{0d} + j h_{0q}$  – зображальний вектор фіктивного напору  $h_0 = \sqrt{h_{0d}^2 + h_{0q}^2}$  ( $H_{0,nom}$  – номінальне значення,  $\Psi_{0cp}$  – довільне) ідеалізованого ВН [18, 19];  $\mathbf{h}_L = h_{Ld} + j h_{Lq}$  – зображальний вектор дійного напору  $h_L = \sqrt{h_{Ld}^2 + h_{Lq}^2}$  на виході ВН;  $h_{st}$  – статичний протинапір ТП;  $\mathbf{q}_L = q_{33d} + j q_{33q}$  – зображальний вектор об’ємної витрати рідини  $q_L = \sqrt{q_{33d}^2 + q_{33q}^2}$  на виході ВН;  $\mathbf{q}_{11}, \mathbf{q}_{22}, \mathbf{q}_{33}, \mathbf{q}_{44}$  – зображальні вектори інших витрат заступної схеми ВН;  $r_{mech}(q_L)$  – еквівалентний нелінійний опір, який враховує дисипативні втрати механічної енергії у ВН залежно від режиму її помпуння [21];  $r_{11} = r_{12} = R_{\mu Q,nom}$ ;  $r_{22} = r_{23} = R_{\Delta Q,nom}$ ;  $r_{33} = R_{\Delta Q,nom} + R_{\Delta H,nom}$ ;  $L'_{11} = (L_{12} L_{21} / (L_{11}^2 L'') - 1 / L_{11})^{-1}$ ;  $L'_{22} = L''$ ;  $L'_{33} = (L_{32} L_{23} / (L_{33}^2 L'') - 1 / L_{33})^{-1}$ ;  $L'_{12} = L'_{21} = L_{11} L' / L_{12}$ ;  $L'_{13} = L'_{31} = L_{11} L_{33} L' / (L_{12} L_{23})$ ;  $L'_{23} = L'_{32} = L_{33} L' / L_{23}$ , де  $L'' = L_{12} L_{21} / L_{11} - L_{22} + L_{23} L_{32} / L_{33}$ , де  $L_{11} = L_{t,nom} + L_{\mu H,nom} + L_{\mu Q,nom}$ ;  $L_{12} = L_{21} = L_{\mu Q,nom}$ ;  $L_{23} = L_{32} = L_{\Delta Q,nom}$ ;  $L_{33} = L_{\Delta Q,nom} + L_{\Delta H,nom}$ ;  $L_{22} = L_{\mu Q,nom} + L_{\Delta Q,nom}$ ;  $r_L, L_L$  – інші еквівалентні дисипативні гідроопори та гідроіндуктивності ВН і ТП;  $T_e = \Psi_{\delta d} i_{sq} - \Psi_{\delta q} i_{sd}$ ,  $T_m$  – крутний електромагнітний момент двигуна та механічний момент опору виконавчого механізму відповідно;  $\Delta T_0 \omega_r^2$ ;  $\Delta T_0$  – за відсутності інших даних приймаємо рівним 0,02;  $J_{\Sigma}$  – сумарний момент інерції АЕВН, кг·м<sup>2</sup>. Нелінійний статичний магнітний опір головного магнітного кола АМ представлено у вигляді апроксимаційного полінома  $R_m(\Psi_{\delta}) = I_{mn} (a_0 + a_2(\Psi_{\delta d}^2 + \Psi_{\delta q}^2) + a_4(\Psi_{\delta d}^2 + \Psi_{\delta q}^2)^4)$ , де  $a_0 = 0,82$ ;  $a_2 = 0,148$ ;  $a_4 = 0,044$ ;  $I_{mn} = 1/(x_{\sigma} + x_a)$ , де  $x_{\sigma}, x_a$  – відносні індуктанси розсіяння та намагнічення АМ в номінальному режимі [22]. В даному випадку нехтуємо впливом частоти на  $R_m$ , оскільки він стає суттєвим при частотах більше 100 Гц [23].

Слід зазначити, що в наведені рівняння та вирази входять відносні значення параметрів АМ та ВН; виняток складає лише сумарний момент інерції  $J_{\Sigma}$ , кг·м<sup>2</sup>. Розрахунок параметрів гідроопорів та гідроіндуктивностей ВН детально висвітлений у [19, 21].

Для тестових розрахунків було обрано ВН типу 14НДс-Н та АМ типу 4АН355М6У3 (їх параметри наведені в таблицях 1 і 2). Момент інерції  $J_{\Sigma}$  сполученої абсолютно жорстким валом системи АМ–ВН складав 10,5 кг·м<sup>2</sup>.

Таблиця 1

Параметри АМ типу 4АН355М6У3

$P_{nom}$ , kW	$\eta_{nom}$	$V_{s,nom}$ , V	$n_{nom}$ , rpm	$\cos\phi_{nom}$	$T_{max}^*$	$T_{min}^*$	$T_s^*$	$I_s^*$	$p_0$	$R_s^*$	$L_s^*$	$R_r^*$	$L_r^*$	$R_a^*$
250	0,935	380	985	0,9	2,2	0,9	1,4	7	3	0,0277	0,1274	0,0543	0,4459	52,5

Тестування розробленої моделі здійснювалось в системі Mathcad шляхом комп’ютерного симулювання низки експлуатаційних та аварійних режимів. Окремі результати комп’ютерного

симулювання наведені на рисунках 2-7. У початковий момент часу відбувався прямий пуск агрегату АМ-ВН із закритою засувкою на виході ВН. Після стабілізації частоти обертання спільного вала в момент часу 1 с починалось плавне (протягом 0,5 с, за лінійним законом) відкриття цієї засувки. На 8-й секунді симулювався початок аварійного режиму повної несиметричності живлення АМ, після чого з 15-ї секунди – відновлення нормального режиму роботи. У момент часу 20 с протягом 0,1 с моделювалась повна розгерметизація місця з'єднання ВН з ТП, а в момент часу 25 с протягом 0,5 с за лінійним законом – закриття засувки з метою припинення аварійного витoku рідини.

Таблиця 2

Параметри ВН типу 14НДс-Н

$H_{nom}$ , m	$Q_{nom}$ , m <sup>3</sup> /h	$H_{max}$ , m	$Q_{max}$ , m <sup>3</sup> /h	$\eta_{nom}$	$n_{nom}$ , rpm	$P_{hydr-nom}$ , kW	$H_{0.nom}$ *	$R_{\Delta Q}$ *	$L_{\Delta Q}$ *	$R_{\Delta H}$ *	$L_{\Delta H}$ *	$L_t$ *	$L_{\mu H}$ *	$L_{\mu Q}$ *	$R_{mech}$ *	$L_{mech}$ *
45	1260	50,16	3518	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

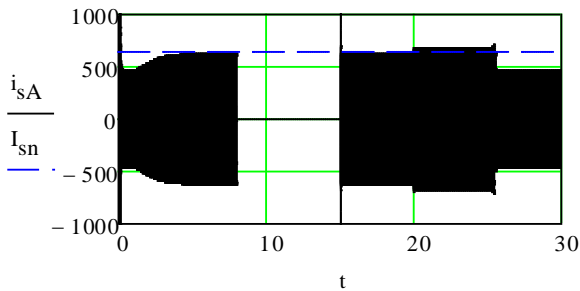


Рис. 2 – Струм фази А статора АМ, А

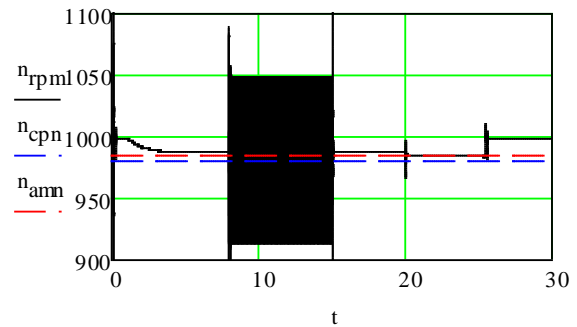


Рис. 3 – Швидкість обертання спільного вала, об/хв

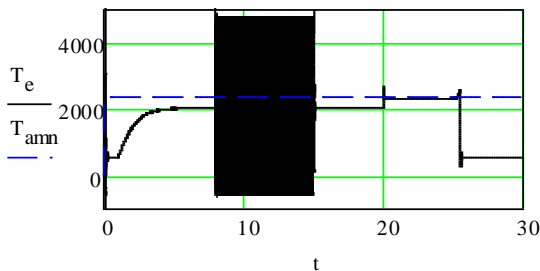


Рис. 4 – Електромагнітний момент АМ, Н·м

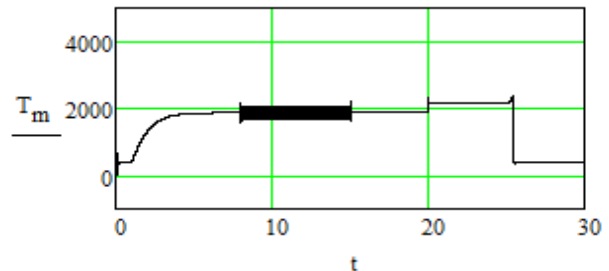


Рис. 5 – Механічний момент опору ВН, Н·м

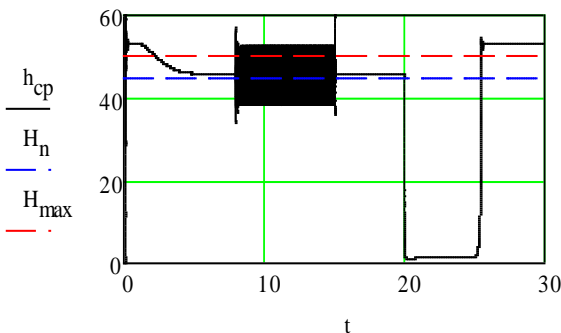


Рис. 6 – Напір робочої рідини ВН, м

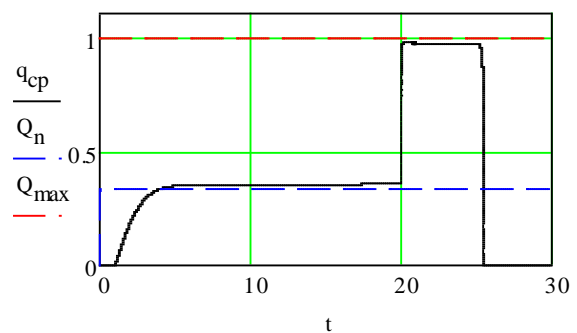


Рис. 7 – Об'ємна витрата робочої рідини ВН, м<sup>3</sup>/с

Для перевірки коректності моделі на рисунках наведені паспортні показники ВН (номінальний напір, максимальний напір в режимі повністю перекритої засувки на виході, а також об'ємна витрата в режимі повного обриву трубопроводу). Слід зазначити, що залежні від частоти обертання робочого колеса паспортні показники ВН задані для номінальної частоти; в інших режимах за інших частот обертання вони відрізняються від заданих. Крім цього, на графіки додані амплітудне значення номінального струму АМ, обчислене за її паспортними даними, номінальне значення крутного електромагнітного моменту (за номінальної частоти та потужності), а також номінальні значення частот обертання АМ і ВН.

### Висновки

Розроблено математичну модель динамічних режимів потужного асинхронного електроприводу з відцентровим насосним навантаженням. Співставний рівень деталізації математичного опису гідравлічної та електромеханічної підсистем уможливило одночасне дослідження як процесів, що відбуваються у цих підсистемах у цілому, так і процесів, що відбуваються в окремих їхніх конструктивних елементах. Наукова новизна роботи полягає в тому, що розроблена в ній математична модель одиничного об'єкту зможе стати основою для побудови узагальненої математичної моделі комплексу довільної конфігурації за модульним принципом, що надалі дасть змогу автоматизувати процес формування рівнянь. Модель дає змогу проводити комп'ютерні дослідження режимів роботи потужних комплексів транспортування рідини без проведення натурних експериментів. Використання моделі може стати чи не єдиним доступним засобом під час проектування нових об'єктів, розроблення автоматичних систем керування, а також для прогнозування режимів роботи діючих об'єктів. У подальшому планується розроблення математичної моделі динамічних режимів багатоагрегатного електротехнічного комплексу «електропостачальна система – помпова станція» з комбінованим (послідовним / паралельним) сполученням ВН гідравлічної підсистеми. Розроблення побудованої за модульним принципом узагальненої математичної моделі, а не моделі конкретного об'єкта, значно розширить сферу практичного застосування, оскільки це дасть змогу легко адаптувати її до конкретних конфігурацій сполучень та складу обладнання.

### Перелік використаних джерел:

1. Energy efficiency analysis of fixed-speed pump drives with various types of motors / V. Goman, S. Oshurbekov, V. Kazakbaev, V. Prakht [et al.] // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 24, iss. 9. – Pp. 1-12. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/app9245295>.
2. 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).
3. 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.
4. Багатоцільова оптимізація усталених 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>.
5. Мелихов А.Ю. Разработка энергосберегающего алгоритма управления плавным пуском асинхронных двигателей насосной станции. Часть 2. Математическая модель энергетической подсистемы насосной станции / А.Ю. Мелихов, Ю.В. Колоколов // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – № 1.3 (35). – С. 369-374.
6. Костишин В.С. Аналіз показників ефективності та надійності роботи насосного агрегата на засадах системного підходу / В.С. Костишин, І.І. Яремак // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2017. – № 1. – С. 50-60.
7. 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 информаци-

- онные технологии. – 2009. – № 3.2 (37). – С. 263-267.
8. Андрущак С.В. Математическое и имитационное моделирование процесса транспортирования и дозирования шлама / С.В. Андрущак, П.В. Беседин // Научные ведомости Белгородского государственного университета. – 2016. – № 16. – С. 115-122. – (Серия: Экономика. Информатика).
  9. Harihara P. Fault Diagnosis of Centrifugal Pumps Using Motor Electrical Signals / P. Harihara, A. Parlos // Centrifugal Pumps. – 2012. – Pp. 15-32. – Mode of access: <https://doi.org/10.5772/26439>.
  10. Fault diagnosis of centrifugal pumps based on the intrinsic time-scale decomposition of motor current signals / S. Alabied, O. Hamomd, A. Daraz, F. Gu, A. D. Ball // 2017 23rd International Conference on Automation and Computing (ICAC). – Huddersfield, 2017. – Pp. 1-6. – Mode of access: <https://doi.org/10.23919/ICoAC.2017.8082027>.
  11. Misiunas D. Burst Detection and Location in Pipelines and Pipe Networks with application in water distribution systems / D. Misiunas. – 113 p. – Mode of access: <http://www.iea.lth.se/publications/Theses/LTH-IEA-1038.pdf>.
  12. Яремак І.І. Багатоцільова оптимізація усталених режимів роботи електроприводних насосних станцій магістральних нафтопроводів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / Яремак Ірина Ігорівна; Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2018. – 20 с.
  13. Paranchuk Y.S. Energy efficient power supply system and automatic control of the complex «power supply – pumping station» modes / Y.S. Paranchuk, V.H. Lysiak // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2018. – № 3. – Pp. 115-124. – Режим доступу: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-3/16>.
  14. Лысяк В.Г. Математическая модель электротехнического комплекса системы энергоснабжения / В.Г. Лысяк, Ю.Л. Шелех, М.Б. Сабат // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 733-743. – Режим доступу: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2017-17-4-733-743>.
  15. 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.
  16. Яремак І.І. Керування режимами електрогідравлічного комплексу на підставі системного підходу / І.І. Яремак, В.С. Костишин // Науковий вісник НЛТУ України. – 2020. – № 30(3). – С. 83-88. – Режим доступу: <https://doi.org/10.36930/40300314>.
  17. Mathematical Modeling and Simulation of Transients in Power Distribution Systems with Valve Devices and Dynamic Loading / P. Gogolyuk, T. Grechyn, A. Ravlyk, I. Grinberg // Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting. – 2003. – Pp. 1580-1585.
  18. Lysiak V. Modeling of Hydraulic Load of Electric Drive in Electrical Complex of Pumping Station / V. Lysiak, M. Oliinyk, Yu. Shelekh // Energy Engineering and Control Systems. – 2018. – Vol. 4, no. 1. – Pp. 31-36. – Mode of access: <https://doi.org/10.23939/jeecs2018.01.031>.
  19. Костишин В. С. Моделирование режимів роботи відцентрових насосів на основі електрогідравлічної аналогії : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.15.13 / Костишин Володимир Степанович; Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2003. – 36 с.
  20. Kostyshyn V.S. Creation of object-oriented model of centrifugal pump on the basis of electrohydrodynamic analogy method / V.S. Kostyshyn, I.I. Yaremak, P.O. Kurlyak // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2019. – № 6. – Pp. 72-79. – Mode of access: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/11>.
  21. Kostyshyn V.S. Simulation of performance characteristics of centrifugal pumps by the electrohydrodynamic analogy method / V.S. Kostyshyn, P.O. Kurlyak // Journal of Hydrocarbon Power Engineering. – 2015. – Vol. 2, № 1. – Pp. 24-31.
  22. Шелепетень Т. М. Обчислення інтегральних параметрів електромагнітних апаратів з допомогою цифрових моделей / Т.М. Шелепетень // Технічна електродинаміка : спец. вип. за матер. II Міжнародної наук.-техн. конф. «Математичне моделювання в електротехніці і елект-

родинаміці». – К., 1998. – С. 169-172.

23. Пустоветов М. Компьютерное моделирование асинхронных двигателей и трансформаторов. Примеры взаимодействия с силовыми электронными преобразователями / М. Пустоветов, К. Солтус, И. Синявский. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 199 с.

**References:**

1. Goman V., Oshurbekov S., Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V. Energy efficiency analysis of fixed-speed pump drives with various types of motors. *Applied Sciences*, 2019, vol. 24, iss. 9, pp. 1-12. doi: 10.3390/app9245295.
2. Kutsyk A.S., Lozynskiy A.O., Kinchur O.F. Matematichna model' sistemi «chastotno-kerovaniy elektroprivod – nasos – vodop-rovidna merezha» [Mathematical model of the system «frequency-controlled electric drive - pump - water supply network»]. *Visnik Natsional'nogo universitetu «L'viv's'ka politehnika». Seriya: Elektroenergetichni ta elektromekhanichni sistemi – Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Series of Electrical Power and Electromechanical Systems*, 2015, no. 834, pp. 48-55. (Ukr.)
3. Leznov B.S. Primenenie reguliruemogo elektroprivoda v nasosnykh ustanovkakh sistem vodonab-zheniia i vodootvedeniia [The use of an adjustable electric drive in pumping installations of water supply and sewerage systems]. *Ekologicheskie sistemy: elektronnyi zhurnal energoservisnoi kompanii – Ecological systems: an electronic journal of an energy service company*, 2010, no. 11, pp. 9-12. (Rus.)
4. Yaremak I.I., Kostyshyn V.S. Bagatotsil'ova optimizatsiia ustalenikh rezhimiv roboti elektroprivodnoi naftoperekachuval'noi stantsii [Multi-objective optimization of steady operating modes of electric oil pumping station]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, 2018, vol. 1, pp. 15-21. doi: 10.30929/1995-0519.2018.1.15-21. (Ukr.)
5. Melikhov A.Yu., Kolokolov Yu.V. Razrabotka energosberegaiushchego algoritma upravleniia plavnym puskom asinkhronnykh dvigatelei nasosnoi stantsii. Chast' 2. Matematicheskai model' energeticheskoi podsistemy nasosnoi stantsii [Development of an energy-saving algorithm for controlling the smooth start of asynchronous motors of a pumping station. Part 2. Mathematical model of the power subsystem of the pumping station]. *Sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii – Control systems and information technology*, 2009, no. 1.3 (35), pp. 369-374. (Rus.)
6. Kostyshyn V.S., Yaremak I.I. Analiz pokaznikov effektivnosti ta nadiinosti roboti nasosnogo agregata na zasadakh sistemnogo pidkhodu [Analysis of efficiency and reliability of the pump unit on the basis of a systematic approach]. *Rozvidka ta rozrobka naftovikh i gazovikh rodovishch – Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, 2017, no. 1, pp. 50-60. (Ukr.)
7. Melikhov A.Yu. Razrabotka energosberegaiushchego algoritma upravleniia plavnym puskom asinkhronnykh dvigatelei nasosnoi stantsii. Chast' 3. Matematicheskai model' gidravlicheskoj pod-sistemy 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 the hydraulic subsystem of the pumping station]. *Sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii – Control systems and information technology*, 2009, no. 3.2 (37), pp. 263-267. (Rus.)
8. Andrushhak S.V., Besedin P.V. Matematicheskoe i imitatsionnoe modelirovanie protsessa transportirovaniia i do-zirovaniia shlama [Mathematical and simulation modeling of the process of transportation and dosing of sludge]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika – Belgorod State University. Scientific Bulletin. Series: Economics. Information technologies*, 2016, no. 16, pp. 115-122. (Rus.)
9. Harihara P., Parlos A. (2012). Fault Diagnosis of Centrifugal Pumps Using Motor Electrical Signals. *Centrifugal Pumps*, 2012, pp. 15-32. doi: 10.5772/26439.
10. Alabied S., Hamomd O., Daraz A., Gu F., Ball A.D. Fault diagnosis of centrifugal pumps based on the intrinsic time-scale decomposition of motor current signals. *23rd International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, 2017, pp. 1-6. doi: 10.23919/ICoAC.2017.8082027.
11. Misiunas D. Burst Detection and Location in Pipelines and Pipe Networks with application in water distribution systems. Lund, 2004. 113 p. Available at : <http://www.iea.lth.se/publications/Theses/LTH-IEA-1038.pdf>.



12. Yaremak I.I. *Bagatotsil'ova optimizatsiia ustalenykh rezhimiv roboti elektroprivodnykh nasosnykh stantsii magistral'nykh naftoprovodiv*. Avtoref. diss. kand. techn. nauk [Multi-purpose optimization of steady-state modes of operation of electric pumping stations of main oil pipelines. Thesis of Cand. tech. sci. diss.]. Ivano-Frankivsk, 2018. 20 p. (Ukr.)
13. Paranchuk Y.S., Lysiak V.H. Energy efficient power supply system and automatic control of the complex «power supply – pumping station» modes. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2018, no. 3, pp. 115-124. doi: [10.29202/nvngu/2018-3/16](https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-3/16).
14. Ly`syak V.G., Shelekh Yu.L., Sabat M.B. Matematicheskaia model' elektrotekhnicheskogo kompleksa sistemy energosnabzheniia [Mathematical model of electrotechnical complex for power supply system]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki – Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 733-743. doi: [10.17586/2226-1494-2017-17-4-733-743](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2017-17-4-733-743). (Rus.)
15. Kostyshyn V.S., Kurliak P.O. Doslidzhennia dinamichnykh 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]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, 2012, no. 2, pp. 148-153. (Ukr.)
16. Yaremak I.I., Kostyshyn V.S. Keruvannia rezhymamy elektrohivavlichnoho kompleksu na pidstavi systemnoho pidkhodu [Control of modes of electrohydraulic complex on the basis of a system approach]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy – Scientific Bulletin of Ukrainian National Forestry University*, 2020, no. 30 (3), pp. 83-88. doi: [10.36930/40300314](https://doi.org/10.36930/40300314). (Ukr.)
17. Gogolyuk P., Grechyn T., Ravlyk A., Grinberg I. Mathematical Modeling and Simulation of Transients in Power Distribution Systems with Valve Devices and Dynamic Loading. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Toronto, 2003, pp. 1580-1585.
18. Lysiak V., Oliinyk M., Shelekh Yu. Modeling of Hydraulic Load of Electric Drive in Electrical Complex of Pumping Station. *Energy Engineering and Control Systems*, 2018, vol. 4, no. 1, pp. 31-36. doi: [10.23939/jeecs2018.01.031](https://doi.org/10.23939/jeecs2018.01.031).
19. Kostyshyn V.S. *Modeliuvannia rezhymiv roboty vidtsentrovnykh nasosiv na osnovi elektrohivavlichnoi analohii*. Avtoref. diss. dokt. techn. nauk [Modeling of operation modes of centrifugal pumps based on electrohydraulic analogy. Thesis of Doct. tech. sci. diss.]. Ivano-Frankivsk, 2003. 36 p. (Ukr.)
20. Kostyshyn V.S., Yaremak I.I., Kurlyak P.O. Creation of object-oriented model of centrifugal pump on the basis of electro-hydrodynamic analogy method. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2019, no. 6, pp. 72-79. doi: [10.29202/nvngu/2019-6/11](https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/11).
21. Kostyshyn V.S., Kurlyak P.O. Simulation of performance characteristics of centrifugal pumps by the electro-hydrodynamic analogy method. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 24-31.
22. Shelepeten T.M. Obchyslennia intehralnykh parametriv elektromahnitnykh aparativ z dopomohoiu tsyfrovnykh modelei [Calculation of integrated parameters of electromagnetic devices using digital models]. *Tekhnichna elektrodynamika : spets. vyp. za mater. II Mizhnarodnoi nauk.-tekhn. konf. «Matematychni modeliuvannia v elektrotekhnitsi i elektrodynamitsi» – Technical electrodynamics: special. issue according to the materials of the II International scientific and technical. conf. «Mathematical modeling in electrical engineering and electrodynamics»*, Kiev, 1998, pp. 169-172. (Ukr.)
23. Pustovetov M., Soltus K., Sinyavskij I. *Komp'yuternoe modelirovanie asinkhronny`kh dvigatelej i transformatorov. Primery` vzaimodejstviya s silovy`mi e`lektronny`mi preobrazovatelyami* [Computer simulation of induction motors and transformers. Examples of interaction with power electronic converters]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publ., 2013. 199 p. (Rus.)

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

Стаття надійшла 01.03.2021