

Дискретные аналоги дифференциальных операторов и их применение в задачах электромеханики // Изв. вузов. Электромеханика. – 1990. – № 3. – С. 5–11. 4. Фильц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. – К.: Наук. думка, 1979. – 208 с. 5. Фильц Р.В. Оператор сдвига и его применение в задачах электромеханики // Изв. Вузов. Электромеханика. – 1991. – № 4. – С. 5–12. 6. Шуйский В. Расчет электрических машин. – Л.: Энергия, 1968. – 731 с. 7. Dorrell D.G. Calculation of unbalanced magnetic pull in small cage induction motors with skewed rotors and dynamic rotor eccentricity // IEEE Trans. on Energy Conversion. – 1996. – Vol. 11, № 3. – P. 483–488. 8. Toliyat H.A., Arefeen M.S., Parlos A.G. A method for dynamic simulation of air-gap eccentricity in induction machines // IEEE Trans. on Industry Application. – 1996. – Vol. 32, № 4. – P. 910–918. 9. Wazecha A., Weinreb K., Wegiel T. Modyfikacja funkcji permeancji szczeliny powietrznej uwzględniająca efekty nasyceniowe w silniku asynchronicznym z ekscentrycznością wirnika // Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Elektryka. – 2001. – Nr. 177. – S. 113–120.

УДК 621.316.11:621.67

П.Ф. Гоголюк, В.Г. Лисяк, В.С. Костишин\*  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра ЕПМС,

\*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
кафедра ЕПО

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ ГРУПИ АГРЕГАТИВ – АСИНХРОННИЙ ДВИГУН – ВІДЦЕНТРОВА ПОМПА – З ПАРАЛЕЛЬНИМ З’ЄДНАННЯМ ГІДРОТРАКТИВ ПОМП

© Гоголюк П.Ф., Лисяк В.Г., Костишин В.С., 2005

Створено математичну модель аналізу усталених режимів групи агрегатів із насиченими асинхронними двигунами та відцентровими помпами з паралельно з’єднаними гідротрактами pomp на підставі електрогідравлічної аналогії. Запропоновано ефективний метод аналізу усталених режимів таких електроприймачів, як елемент вузла навантаження електропостачальної системи з урахуванням статичної напірної характеристики гідравлічної мережі.

The mathematical model intended for steady state regime analysis of apparatus with saturated asynchronous motors and centrifugal pumps with pumps hydraulic tracts connected in parallel is created on the basis of electrohydraulic analogy. An efficient method of steady-state regimes analysis of such electric receiving devices as element of power distribution system load center with considering of static pressure characteristic of hydraulic network is offered.

**Постановка проблеми.** Відсутність ефективних математичних моделей аналізу режимів і процесів систем інженерного забезпечення промислових і цивільних об’єктів, які складаються з нерозривно пов’язаних між собою елементів різної фізичної природи, істотно ускладнює процес створення автоматизованих систем проектування таких об’єктів. Це створює значні проблеми під час аналізу режимів і процесів систем інженерного забезпечення з урахуванням нелінійності характеристик структурних елементів і їх взаємного впливу. Зокрема, досі відсутня математична модель аналізу усталених режимів електроприймача, який складається з групи агрегатів – асинхронний двигун (АД) – відцентрова помпа (ВП) – із паралельним з’єднанням гідротрактів pomp як елемента вузла навантаження електропостачальної системи. Таке технологічне з’єднання агрегатів найчастіше використовується на помпових станціях магістральних трубогінних систем.

**Аналіз результатів останніх досліджень.** Досі відсутня адекватна й ефективна математична модель аналізу усталених режимів електроприймача, утвореного групою агрегатів, кожний з яких складається з асинхронного двигуна та відцентрової помпи з паралельним з'єднанням гідротрактів усіх pomp, і яка враховувала б вплив нелінійності характеристик намагнічення головного магнітного кола АД і статичної напірної характеристики гідравлічної мережі на режими АД та відцентрової помпи.

**Задачі досліджень.** Метою роботи є створення ефективної математичної моделі одного з елементів вузлів навантаження ЕПС – електроприймача, що складається з групи агрегатів – насичений асинхронний двигун – відцентрова помпа з паралельним з'єднанням гідротрактів pomp, яка уможливує враховувати вплив насичення головного магнітного кола АД і статичних характеристик гідромережі на параметри координат усталених режимів ЕПС.

**Виклад основного матеріалу.** Математичну модель усталених режимів досліджуваної групи агрегатів АД–ВП створено із використанням запису рівнянь стану в жорстко з'єднаних з обертовим магнітним полем статора АД  $d_s, q_s$  [2, 3, 5] й робочим колесом ВП  $d, q$  [1] відповідних окремих для АД і ВП ортогональних координатах.

Для формування рівнянь математичної моделі відцентрової помпи у відносних номінальних одиницях використано таку систему основних номінальних величин:

$$S_{ВП_{Hi}} = \rho g H_{ВП_{Hi}} Q_{ВП_{Hi}}; \quad (1)$$

$$Z_{ВП_{Hi}} = \rho g H_{ВП_{Hi}} / Q_{ВП_{Hi}}, \quad (2)$$

де  $H_{ВП_{Hi}}, Q_{ВП_{Hi}}, S_{ВП_{Hi}}, Z_{ВП_{Hi}}$  – відповідно номінальні гідравлічний напір й об'ємна витрата рідини та номінальні потужність і гідроопір відцентрової помпи  $i$ -го агрегата;  $\rho, g$  – відповідно питома густина рідини та пришвидшення вільного падіння.

Заступну електричну схему відцентрової помпи показано у [7]. Математичну модель відцентрової помпи сформовано за допомогою методу законів Кірхгофа на підставі її електричної заступної схеми (рис. 1 [1]), яка отримана з використанням принципу електрогідравлічної аналогії і має такий вигляд [1]:

$$Q_{\Sigma d_i} - Q_{M d_i} - Q'_{\infty d_i} = 0; \quad (3)$$

$$Q_{\Sigma q_i} - Q_{M q_i} - Q'_{\infty q_i} = 0; \quad (4)$$

$$Q'_{\infty d_i} - Q_{\mu d_i} - Q'_{T d_i} = 0; \quad (5)$$

$$Q'_{\infty q_i} - Q_{\mu q_i} - Q'_{T q_i} = 0; \quad (6)$$

$$Q'_{T d_i} - Q_{d d_i} - Q_{\Delta d_i} = 0; \quad (7)$$

$$Q'_{T q_i} - Q_{d q_i} - Q_{\Delta q_i} = 0; \quad (8)$$

$$k_v r_{M_i} Q_{M d_i} - \omega_r * \delta_i x_{M_i} Q_{M q_i} - H_{0 d_i} = 0; \quad (9)$$

$$\omega_r * \delta_i x_{M_i} Q_{M d_i} + k_v r_{M_i} Q_{M q_i} - H_{0 q_i} = 0; \quad (10)$$

$$\omega_r * \delta_i (x_{t_i} + x_{\mu H_i}) Q'_{\infty q_i} + \omega_r * \delta_i x_{\mu Q_i} Q_{\mu q_i} + H_{0 d_i} = 0; \quad (11)$$

$$\omega_r * \delta_i (x_{t_i} + x_{\mu H_i}) Q'_{\infty d_i} + \omega_r * \delta_i x_{\mu Q_i} Q_{\mu d_i} - H_{0 q_i} = 0; \quad (12)$$

$$\omega_r * \delta_i x_{\mu Q_i} Q_{\mu q_i} + k_v r_{\Delta Q_i} Q_{\Delta d_i} - \omega_r * \delta_i x_{\Delta Q_i} Q_{\Delta q_i} = 0; \quad (13)$$

$$k_v r_{\Delta Q_i} Q_{\Delta q_i} + \omega_r * \delta_i x_{\Delta Q_i} Q_{\Delta d_i} - \omega_r * \delta_i x_{\mu Q_i} Q_{\mu d_i} = 0; \quad (14)$$

$$\omega_r * \delta_i x_{\Delta H_i} Q_{d q_i} - k_v r_{\Delta H_i} Q_{d d_i} + k_v r_{\Delta Q_i} Q_{\Delta d_i} - \omega_r * \delta_i x_{\Delta Q_i} Q_{\Delta q_i} - H_{d d_i} = 0; \quad (15)$$

$$\omega_{r*6_i} x_{\Delta Q_i} Q_{\Delta d_i} + k_v r_{\Delta Q_i} Q_{\Delta q_i} - \omega_{r*6_i} x_{\Delta H_i} Q_{d d_i} - k_v r_{\Delta H_i} Q_{d q_i} - H_{d q_i} = 0; \quad (16)$$

$$\sqrt{H_{0 d_i}^2 + H_{0 q_i}^2} - \omega_{r*6_i} H_{0 H_i} = 0; \quad (17)$$

$$Q_{22 d_i} = \sqrt{Q_{22 d_i}^2 + Q_{22 q_i}^2} \cdot \cos(\Psi_{o Q_i}); \quad (18)$$

$$H_{d d_i} \cdot Q_{22 d_i} - H_{d q_i} \cdot Q_{22 q_i} = 0, \quad (19)$$

де  $Q_{m d_i}$ ,  $Q_{m q_i}$  – розрахункові об’ємні втрати рідини відцентрової помпи  $i$ -го агрегата, спричинені силами дискового тертя та гідравлічним гальмуванням;  $Q_{\mu d_i}$ ,  $Q_{\mu q_i}$  – розрахункові об’ємні втрати рідини, спричинені скінченною кількістю лопатей;  $Q_{\Delta d_i}$ ,  $Q_{\Delta q_i}$  – розрахункові об’ємні втрати рідини через ущільнення;  $Q_{\Sigma d_i}$ ,  $Q_{\Sigma q_i}$  – сумарні розрахункові об’ємні витрати рідини реальної відцентрової помпи;  $Q_{\infty d_i}$ ,  $Q_{\infty q_i}$  – розрахункові об’ємні витрати рідини ідеалізованої [2] відцентрової помпи;  $Q_{T d_i}$ ,  $Q_{T q_i}$  – розрахункові об’ємні витрати рідини теоретичної [2] відцентрової помпи;  $H_{d i}$ ,  $Q_{d i}$  – дійсний напір і дійсна об’ємна витрата рідини реальної [2] відцентрової помпи;  $\Psi_{o Q_i}$  – початкова фаза зображального вектора;  $H_{0 i} = \sqrt{H_{0 d_i}^2 + H_{0 q_i}^2}$  – розрахунковий напір ідеалізованої відцентрової помпи;  $H_{0 i n}$  – модуль зображувального вектора номінального напору неробочого режиму ВП;  $H_d(Q_d)$  – статична напірна характеристика гідравлічної мережі;  $r_{m i}$ ,  $x_{m i}$  – дисипативний і реактивний гідроопори, що відображають механічні втрати енергії відцентрової помпи від дискового тертя та гідравлічного гальмування;  $r_{\Delta H_i}$ ,  $x_{\Delta H_i}$  – дисипативний і реактивний гідроопори, що відображають гідравлічні втрати у спіральному відводі помпи;  $r_{\Delta Q_i}$ ,  $x_{\Delta Q_i}$  – дисипативний і реактивний гідроопори, що відображають вплив зворотних зв’язків через ущільнення на тиск рідини відцентрової помпи;  $x_{\mu H_i}$ ,  $x_{\mu Q_i}$  – реактивні гідроопори, що враховують відповідно вплив скінченної кількості лопатей робочого колеса відцентрової помпи на її тиск і об’ємну витрату рідини;  $x_i$  – внутрішній реактивний гідроопір відцентрової помпи;  $k_v$  – коефіцієнт в’язкості робочої рідини відцентрової помпи;  $\omega_{r*6_i}$  – відносна базова колова частота обертання спільного вала АД – ВП  $i$ -го агрегата;  $\omega_6$  – базове значення колової частоти ( $314,16 \text{ c}^{-1}$ ).

Зв’язок між усіма відцентровими помпами агрегатів і гідромережею встановлено на підставі того, що у випадку паралельного з’єднання гідротрактів pomp гідромережа перебуває під однако-вим для усіх pomp тиском, а результуюча об’ємна витрата  $Q_d$  дорівнює сумі об’ємних витрат окремих pomp. Рівняння зв’язку мають такий вигляд:

$$\sqrt{H_{d d_i}^2 + H_{d q_i}^2} - H_d(Q_d) = 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (20)$$

де  $Q_d = \sum_{k=1}^n \left( \sqrt{Q_{d d_k}^2 + Q_{d q_k}^2} \right)$  – дійсна витрата рідини групи агрегатів;  $H_d$  – дійсний напір робочої рідини;  $n$  – кількість паралельно сполучених гідротрактів агрегатів.

Рівняння математичної моделі асинхронного двигуна сформовані також у відносних номінальних одиницях із використанням такої системи основних номінальних величин:

$$S_{A D H_i} = 3 U_{\Phi H_i} I_{H_i} = \frac{3}{2} U_{m \Phi H_i} I_{m H_i}; \quad (21)$$

$$Z_{A D H_i} = U_{\Phi H_i} / I_{H_i}, \quad (22)$$

де  $U_{\Phi H_i}$ ,  $I_{H_i}$  – номінальні діючі ( $U_{m \Phi H_i}$ ,  $I_{m H_i}$  – амплітудні) значення фазної напруги та струму асинхронного двигуна  $i$ -го агрегата АД–ВП;  $S_{A D H_i}$ ,  $Z_{A D H_i}$  – номінальні значення потужності та опору асинхронного двигуна  $i$ -го агрегата.

Для насиченого АД використано удосконалену математичну модель з урахуванням витіснення струму в роторі на підставі його двоконтурної заступної схеми [2, 4, 5]:

$$r_{s_i} I_{sds_i} - \omega_{s^*a_i} (x_{s_i} I_{sq_{s_i}} + \Psi_{\delta q_{s_i}}) - U_{sds_i} = 0; \quad (23)$$

$$r_{s_i} I_{sq_{s_i}} + \omega_{s^*a_i} (x_{s_i} I_{sds_i} + \Psi_{\delta ds_i}) - U_{sq_{s_i}} = 0; \quad (24)$$

$$r_{1r_i} I_{1rds_i} - (\omega_{s^*a_i} - \omega_{r^*a_i}) (x_{1r_i} I_{1rq_{s_i}} + \Psi_{\delta q_{s_i}}) / \omega_{s^*a_i} = 0; \quad (25)$$

$$r_{1r_i} I_{1rq_{s_i}} + (\omega_{s^*a_i} - \omega_{r^*a_i}) (x_{1r_i} I_{1rds_i} + \Psi_{\delta ds_i}) / \omega_{s^*a_i} = 0; \quad (26)$$

$$r_{2r_i} I_{2rds_i} - (\omega_{s^*a_i} - \omega_{r^*a_i}) (x_{2r_i} I_{2rq_{s_i}} + \Psi_{\delta q_{s_i}}) / \omega_{s^*a_i} = 0; \quad (27)$$

$$r_{2r_i} I_{2rq_{s_i}} + (\omega_{s^*a_i} - \omega_{r^*a_i}) (x_{2r_i} I_{2rds_i} + \Psi_{\delta ds_i}) / \omega_{s^*a_i} = 0; \quad (28)$$

$$I_{sds_i} + (I_{1rds_i} + I_{2rds_i}) - R_{mi_i} (\Psi_{\delta ds_i}, \Psi_{\delta q_{s_i}}) \Psi_{\delta ds_i} = 0; \quad (29)$$

$$I_{sq_{s_i}} + (I_{1rq_{s_i}} + I_{2rq_{s_i}}) - R_{mi_i} (\Psi_{\delta ds_i}, \Psi_{\delta q_{s_i}}) \Psi_{\delta q_{s_i}} = 0; \quad (30)$$

$$U_{smi} = \sqrt{U_{sds_i}^2 + U_{sq_{s_i}}^2} \quad (31)$$

$$U_{sds_i} = \sqrt{U_{sds_i}^2 + U_{sq_{s_i}}^2} \cdot \cos(\Psi_{oUs_i}), \quad (32)$$

$$\sqrt{U_{sds_i}^2 + U_{sq_{s_i}}^2} = \omega_{s^*a_i} \sqrt{\Psi_{\delta ds_i} I_{sq_{s_i}} - \Psi_{\delta q_{s_i}} I_{sds_i}}, \quad (33)$$

де  $I_{sds}$ ,  $I_{sq_s}$ ,  $I_{1rds}$ ,  $I_{1rq_s}$ ,  $I_{2rds}$ ,  $I_{2rq_s}$  – струми статора та зведені до нього струми ротора асинхронного двигуна в  $d_s, q_s$  координатах;  $\Psi_{\delta ds_i}, \Psi_{\delta q_{s_i}}$  – зведені до первинної обвитки статора потокозчеплення від магнітного потоку повітряного проміжку АД;  $\Psi_{oUs_i}$  – початкова фаза зображального вектора;  $U_{smi} = \sqrt{U_{sds_i}^2 + U_{sq_{s_i}}^2}$  – амплітудне значення фазної напруги живлення статора АД;  $r_s, x_s$  – опори розсіювання обмотки статора Т-подібної заступної схеми АД;  $r_{1r}, r_{2r}, x_{1r}, x_{2r}$  – зведені до статора резистивні та індуктивні опори розсіювання обвитки ротора двоконтурної Т-подібної заступної схеми асинхронного двигуна;  $\omega_{s^*a_i}$  – відносна базова колова частота напруги живлення статора АД  $i$ -го агрегата;  $R_{mi_i} (\Psi_{\delta ds_i}, \Psi_{\delta q_{s_i}})$  – нелінійний статичний магнітний опір головного магнітного кола АД.

На підставі балансу електромагнітного моменту АД з механічним моментом ВП за умови однакової частоти обертання їх спільного вала встановлено рівняння зв'язку між АД та ВП, яке має такий вигляд:

$$\Psi_{\delta ds_i} I_{sq_{s_i}} - \Psi_{\delta q_{s_i}} I_{sds_i} - (H_{0d_i} Q_{\Sigma d_i} - H_{0q_i} Q_{\Sigma q_i}) S_{\dot{A}i_i} / S_{\dot{A}i_i} - \Delta M_i (\omega_{r^*a_i}) = 0, \quad (34)$$

де  $\Delta M_i (\omega_{r^*a_i})$  – момент, який враховує механічні втрати під час обертання ротора АД.

Розв'язанню підлягає нелінійна система скінченних рівнянь (3)–(20) і (23)–(34), яка в матрично-векторному вигляді має такий вигляд:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}, \quad (35)$$

де  $\mathbf{x} = (\mathbf{Q}, \mathbf{H}, \mathbf{I}, \mathbf{U}, \Psi_{\delta}, \boldsymbol{\omega})_t$  – вектор-стовпець координат режиму групи агрегатів АД–ВП;

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &= (\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2, \dots, \mathbf{Q}_i, \dots, \mathbf{Q}_n)_t; & \mathbf{H} &= (\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \dots, \mathbf{H}_i, \dots, \mathbf{H}_n)_t; & \mathbf{I} &= (\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2, \dots, \mathbf{I}_i, \dots, \mathbf{I}_n)_t; \\ \mathbf{U} &= (\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2, \dots, \mathbf{U}_i, \dots, \mathbf{U}_n)_t; & \Psi_{\delta} &= (\Psi_{\delta 1}, \Psi_{\delta 2}, \dots, \Psi_{\delta i}, \dots, \Psi_{\delta n})_t; & \boldsymbol{\omega} &= (\boldsymbol{\omega}_1, \boldsymbol{\omega}_2, \dots, \boldsymbol{\omega}_i, \dots, \boldsymbol{\omega}_n)_t; \\ \mathbf{Q}_i &= (Q_{\Sigma d_i}, Q_{\Sigma q_i}, Q_{\mu d_i}, Q_{\mu q_i}, Q_{\Delta d_i}, Q_{\Delta q_i}, Q_{\lambda d_i}, Q_{\lambda q_i}, Q_{\Sigma d_i}, Q_{\Sigma q_i}, Q_{\mu d_i}, Q_{\mu q_i}, Q_{\Delta d_i}, Q_{\Delta q_i}, Q_{\lambda d_i}, Q_{\lambda q_i})_t; \\ \mathbf{H}_i &= (H_{0d_i}, H_{0q_i}, H_{\lambda d_i}, H_{\lambda q_i})_t; & \mathbf{I}_i &= (I_{sds_i}, I_{sq_{s_i}}, I_{1rds_i}, I_{1rq_{s_i}}, I_{2rds_i}, I_{2rq_{s_i}})_t; & \mathbf{U}_i &= (U_{sds_i}, U_{sq_{s_i}})_t; \\ \Psi_{\delta i} &= (\Psi_{\delta ds_i}, \Psi_{\delta q_{s_i}})_t; & \boldsymbol{\omega}_i &= (\omega_{r^*a_i}, \omega_{s^*a_i})_t. \end{aligned}$$

Нелінійну систему скінченних рівнянь (35) найдоцільніше розв'язати методом Ньютона, робоча формула якого має такий вигляд [5]:

$$\mathbf{x}^{(l+1)} = \mathbf{x}^{(l)} - \Delta \mathbf{x}^{(l)}, \quad (36)$$

де  $\Delta \mathbf{x}^{(l)}$  – вектор-стовпець поправок.

Компоненти вектор-стовпця поправок обчислюються шляхом розв'язання системи лінеаризованих рівнянь стану АД–ВП методом Гаусса такого вигляду:

$$\mathbf{W}(\mathbf{x}^{(l)}) \Delta \mathbf{x}^{(l)} = \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(l)}). \quad (37)$$

Матриця Якобі для нелінійної системи рівнянь (32) має такий вигляд:

$$\mathbf{W}(\mathbf{x}) = \partial \mathbf{f}(\mathbf{x}) / \partial \mathbf{x} = \begin{vmatrix} \mathbf{W}_Q & \mathbf{W}_H & \mathbf{W}_I & \mathbf{W}_U & \mathbf{W}_\Psi & \mathbf{W}_\omega \end{vmatrix} \quad (38)$$

і формується на засадах, викладених у [7].

Для однозначності розв'язку системи рівнянь (35) необхідно задати статичну напірну характеристику гідравлічної мережі  $H_d(Q_d)$ , яку апроксимовано поліномом

$$H_{d*H}(Q_{d*H}) = H_{0*H} + (1 - H_{0*H}) Q_{d*H}^2, \quad (39)$$

де  $H_{0*H} = 0,2$ .

Для обчислення початкових наближень шуканих невідомих спочатку необхідно задати початковими їхні номінальні значення. Потім обчислити уточнені значення нульових наближень, розв'язавши системи рівнянь (3)–(16), (23)–(30).

Тестовий розрахунок множини усталених режимів здійснювався шляхом зміни єдиної для всіх агрегатів напруги живлення  $U_s$  у межах від 1,1 до 0,6  $U_{сн}$  та регулювання частоти  $\omega_s$  за законом Костенка (33). При цьому підтримувалося номінальне значення результуючого тиску  $H_d$  ( $H_{d*H}(Q_{d*H}) = 1$ ). Як показали дослідження, доцільно лише один раз розрахувати початкові наближення. За початкові наближення для розрахунку наступного усталеного режиму потрібно брати результати розрахунку попереднього режиму.

За допомогою створеної математичної моделі проведено тестові розрахунки координат усталених режимів агрегата АД–ВП, який складається з трьох pomp та трьох асинхронних двигунів. Гідротракти цих pomp з'єднані паралельно та працюють на спільну гідромережу; кожна з pomp приводиться в рух окремим асинхронним двигуном, приєднаним до шин підстанції потужної електропостачальної системи через перетворювач частоти:

1. Перша та третя помпи **НМ-1250-260** приводяться в рух двигунами **АС3-1764-8**.

Кількісні значення номінальних параметрів помпи **НМ-1250-260**:

$$x_m = 11,261; r_m = 0,268; x_t = 0,059; x_{\mu H} = 0,003; x_{\mu Q} = 0,259; x_{\Delta Q} = 11,60; r_{\Delta Q} = 24,95; x_{\Delta H} = 0,440;$$

$$r_{\Delta H} = 0,00507; H_{0H} = 1,387; H_{дн} = 260 \text{ м}; Q_{дн} = 0,3472 \text{ м}^3/\text{с}; P_H = 1107 \text{ кВт}; n_H = 3000 \text{ об/хв.}$$

Кількісні значення номінальних параметрів двигуна **АС3-1764-8**:

$$r_s = 0,0033; x_s = 0,0333; r_{r1} = 0,0033; x_{r1} = 0,0587; r_{r2} = 0,0387; x_{r2} = 0,0162; x_a = 1,678;$$

$$P_H = 1600 \text{ кВт}; U_H = 6 \text{ кВ}; k_{\max} = 2,1; \cos \varphi_H = 0,9; n_H = 2975 \text{ об/хв}; \Delta M_i(\omega_{r*G_i}) = 0,04.$$

2. Друга помпа **10НД-10\*2** приводиться в рух двигуном **ДВДА-215/39-12/16**.

Кількісні значення номінальних параметрів помпи **10НД-10\*2**:

$$x_m = 19,286; r_m = 0,385; x_t = 0,089; x_{\mu H} = 0,003; x_{\mu Q} = 0,365; x_{\Delta Q} = 10,47; r_{\Delta Q} = 30,34; x_{\Delta H} = 0,458;$$

$$r_{\Delta H} = 0,00457; H_{0H} = 1,423; H_{дн} = 285 \text{ м}; Q_{дн} = 0,2222 \text{ м}^3/\text{с}; P_H = 722 \text{ кВт}; n_H = 3000 \text{ об/хв.}$$

Кількісні значення номінальних параметрів двигуна **ДВДА-215/39-12/16**:

$$r_s = 0,008; x_s = 0,0958; r_{r1} = 0,011; x_{r1} = 0,131; r_{r2} = 0,265; x_{r2} = 0,184; x_a = 2,85;$$

$$P_H = 1000 \text{ кВт}; U_H = 6 \text{ кВ}; k_{\max} = 2,1; \cos \varphi_H = 0,9; n_H = 2975 \text{ об/хв}; \Delta M_i(\omega_{r*G_i}) = 0,04.$$

Нелінійний статичний магнітний опір головного магнітного кола асинхронного двигуна апроксимовано поліномом

$$R_{mi}(\Psi_{\delta ds_i}, \Psi_{\delta qs_i}) = I_{mi} \left( a_0 + a_1 \cdot (\Psi_{\delta ds_i}^2 + \Psi_{\delta qs_i}^2) + a_4 \cdot (\Psi_{\delta ds_i}^2 + \Psi_{\delta qs_i}^2)^4 \right), \quad (40)$$

де  $a_0 = 0,82$ ;  $a_1 = 0,148$ ;  $a_4 = 0,044$ ;  $I_{mi} = 1/(x_{s_i} + x_{a_i})$ .

На рис. 1, 2, 3 і 4 показано результати розрахунків у вигляді графічних залежностей координат режиму агрегата АД – ВП від напруги живлення статорів асинхронних двигунів за умови підтримання номінального значення результуючого тиску. На цих графіках усі координати режиму подано в іменованих одиницях.

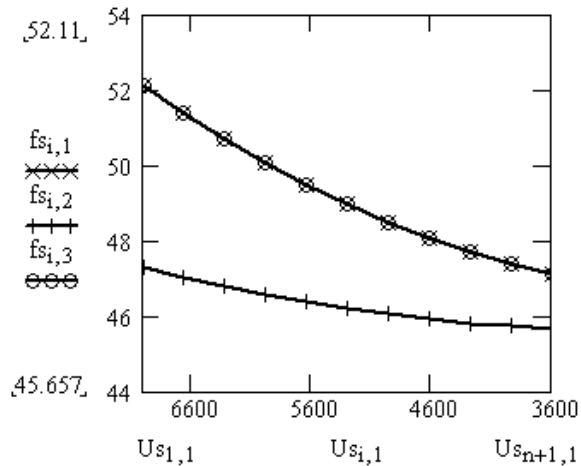


Рис. 1. Залежності частоти напруги статорів електродвигунів агрегатів від напруги

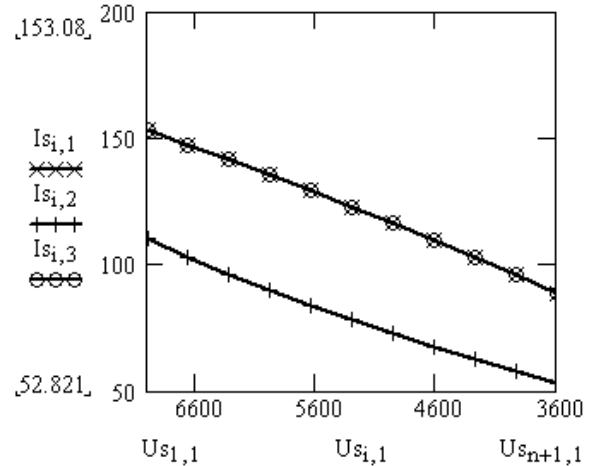


Рис. 2. Залежність струмів статорів електродвигунів агрегатів від напруги

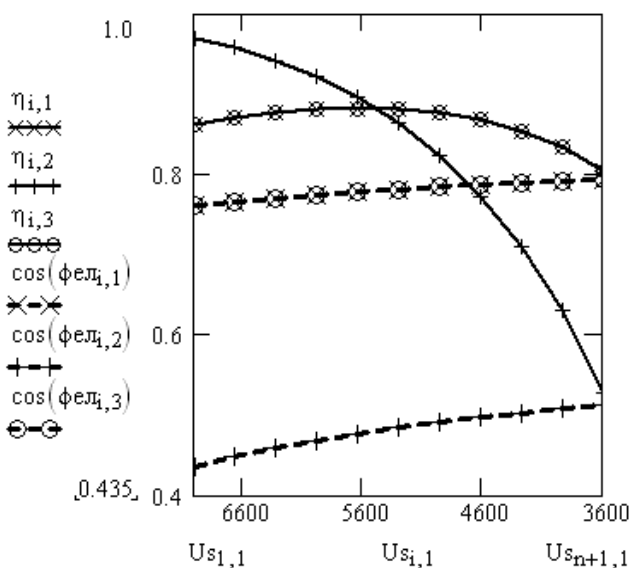


Рис. 3. Залежність ККД і  $\cos(\varphi)$  електродвигунів агрегатів від напруги

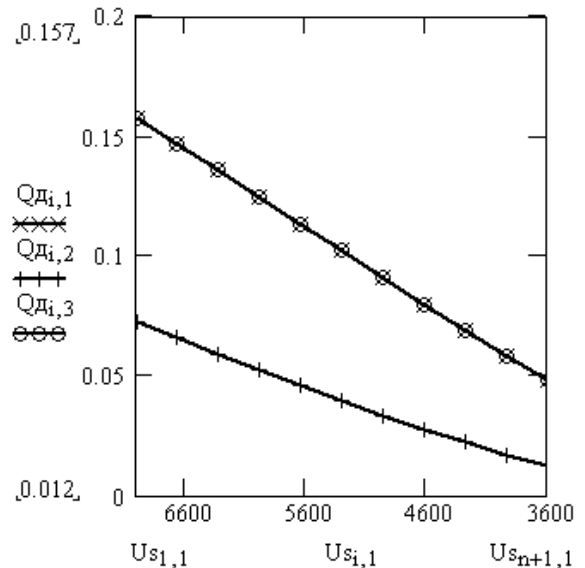


Рис. 4. Залежність об'ємних витрат рідини агрегатів від напруги

**Висновки.** В результаті цієї роботи створено математичну модель усталеного режиму елемента вузла навантаження ЕПС, що складається з групи агрегатів – асинхронний двигун – відцентрова помпа – 3 паралельним з'єднанням гідротрактів помп. Встановлено, що застосування паралельного з'єднання гідротрактів ВП є ефективним лише у разі комплектування агрегатів помпами, які мають достатньо близькі значення конструкційних параметрів номінальних тисків робочої рідини на виході, оскільки в іншому випадку режими роботи помп виходять далеко за межі допустимих значень. Отримані результати показали доцільність подальших досліджень із метою створення узагальненої математичної

моделі аналізу усталених режимів електропостачальних систем з урахуванням впливу статичної характеристики гідравлічної мережі.

1. Костишин В.С. Моделирование режимов работы відцентрових насосів на основі електрогідравлічної аналогії. – Івано-Франківськ: Факел, 2000. – 163 с. 2. Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах / Под ред. Н.И. Соколова. – М.: Энергия, 1970. – 400 с. 3. Сипайлов Г.А., Лоос А.В. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высш. шк., 1980, – 176 с. 4. Сивокобыленко В.Ф., Павлюков В.А. Параметры и схемы замещения асинхронных электродвигателей с вытеснением тока в роторе // Электрические станции. – 1976. – № 2. – С. 51–54. 5. Фильц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. – К.: Наук. думка, 197. – 208 с. 6. Перхач В.С. Математичні задачі електроенергетики. – Львів: Вища шк., 1989. – 464 с.

УДК 612.335.43 – 501.72

Л.Ф. Карплюк, Б.Л. Карплюк, Б.Я. Панченко  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра ЕАП

## СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ДЛЯ ТЯГОВОГО ЧАСТОТНО КЕРОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

© Карплюк Л.Ф., Карплюк Б.Л., Панченко Б.Я., 2005

**Проаналізовано побудову електромеханічної системи тягового електроприводу. Наведено результати дослідження. Результати можуть бути використані під час розроблення тягових електроприводів.**

**The control system of drive electric trains has been analysed. The conclusions have been drawn from the results of the research. The result may be used during the designing electric drives.**

**Постановка задачі.** Більшість транспортних засобів з електричною трансмісією отримують живлення від електричних мереж постійного струму. Електрична енергія може подаватися ззовні або від внутрішнього джерела енергії – акумуляторних батарей, автономної енергетичної установки з первинним дизельним або газотурбінним двигуном та генератором електричної енергії.

Важливою вимогою до системи електроприводу є забезпечення регулювання оператором рівня віддачі потужності електроприводом в усталених режимах та регулювання моментів тягових двигунів в динамічних режимах. При цьому рівень цих параметрів не повинен перевищувати допустимих для електричного та механічного обладнання максимальних значень.

Тобто необхідно формувати характеристики з регулюванням моменту і віддачі заданого значення потужності в усталених режимах.

**Аналіз останніх досліджень.** Сьогодні в нашій країні на електротранспорті застосовують переважно електроприводи з реостатно контакторними системами регулювання двигунами постійного струму послідовного та змішаного збудження. Перевагою таких систем є забезпечення природними властивостями двигунів тягової характеристики, тобто характеристики з постійною віддачею потужності ( $P_{дв}=M \cdot \omega$ ). Основним недоліком цих систем є значні втрати електроенергії в пускових та гальмівних реостатах, механічне зношення релейно-контакторної апаратури.

У нових розробках використовують тягові електроприводи з тиристорно-імпульсними системами керування з двигунами постійного струму. Тиристорно-імпульсна система керування має