

2002. – Ч. 2. – С. 95–102. 4. Василів К.М., Галіновський О.М. Математична модель електромеханічної системи “Асинхронний генератор з модульованим збуджувачем – каскад асинхронних двигунів” // *Технічна електродинаміка*. – К., 1998. – Спец. вип. 2, т. 2, – С. 66–71. 5. Василів К.М. Математична модель автономної електроенергетичної системи на базі генератора з двофазно-трифазним безконтактним модульованим збуджувачем // *Технічна електродинаміка*. – 2002. – № 6. – С. 31–37. 6. Плахтына Е.Г. Математическое моделирование электромашинно-вентильных систем. – Львов, 1986. – 164 с. 7. Василів К.М. Метод квазікомбінованих схем і вузлових уточнень струмів для моделювання статичних перетворювача частоти // *Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 1999. – № 372. – С. 18–28. 8. Дижур Д.И. Метод моделирования на ЦВМ вентильных преобразовательных схем // *Изв. НИИПТ*. Сб. 16. – С. 46–53.

УДК 621.316.11:621.67

П.Ф. Гоголюк, В.Г. Лисяк, В.С. Костишин*

Національний університет “Львівська політехніка”,

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ ГРУПИ АГРЕГАТИВ – АСИНХРОННИЙ ДВИГУН – ВІДЦЕНТРОВА ПОМПА – З ПОСЛІДОВНИМ СПОЛУЧЕННЯМ ГІДРОТРАКТИВ ПОМП

© Гоголюк П. Ф., Лисяк В.Г., Костишин В.С., 2003

На підставі електрогідравлічної аналогії вперше створено математичну модель аналізу усталених режимів групи агрегатів із насиченими асинхронними двигунами та відцентровими помпами з послідовно сполученими гідротрактами. Запропоновано ефективний метод аналізу усталених режимів таких електроприймачів, як елементів вузла навантаження електропостачальної системи з урахуванням статичної напірної характеристики гідравлічної мережі.

The mathematical model intended for analysis of steady-state regimes in group of electric machines with saturated asynchronous motors, centrifugal pumps and hydrosections connected in series is created on the basis of electrohydraulic analogy. An effective method for steady-state regimes analysis of such electric receiving apparatus as elements of power distribution system load center is offered for the first time. Static characteristics of hydraulic network are taken into consideration.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розроблення прикладного математичного та програмного забезпечення автоматизованих систем проектування електропостачальних систем (ЕПС) відсутні ефективні математичні моделі електроприймачів, які складаються з нерозривно пов’язаних між собою пристроїв різної фізичної природи. Це не дозволяє здійснювати комплексний аналіз режимів і процесів підсистем інженерного забезпечення промислових і цивільних об’єктів з урахуванням їх нелінійних характеристик і взаємного зв’язку.

Аналіз результатів останніх досліджень. На теперішній час відсутня адекватна математична модель аналізу усталених режимів електроприймача, що складається з групи агрегатів – насичений асинхронний двигун–відцентрова помпа – з послідовним сполученням гідротрактів pomp із можливістю врахування нелінійних характеристик головного магнітного кола АД і взаємного впливу режимів ЕПС і гідравлічної мережі [1]. Відомі математичні моделі насиченого асинхронного двигуна [2, 3, 5] є недостатньо ефективними для створення адекватної математичної моделі агрегатів АД–ВП.

Задачі досліджень. Метою роботи є створення математичної моделі електроприймача, що складається з групи агрегатів – асинхронний двигун – відцентрова помпа – з послідовним сполученням гідротрактів pomp, як складового елемента вузла навантаження електропостачальних систем з урахуванням впливу насичення головного магнітного кола АД і статичних характеристик гідравлічної мережі на параметри координат усталених режимів ЕПС.

Виклад основного матеріалу. Для створення математичної моделі усталених режимів досліджуваної групи агрегатів АД–ВП використано запис рівнянь стану в ортогональних (d, q) координатах, які, зокрема, жорстко зв'язані з обертовим магнітним полем статора асинхронного двигуна й робочим колесом відцентрової помпи.

Рівняння математичної моделі відцентрової помпи сформовані у відносних номінальних одиницях із використанням такої системи основних номінальних величин

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

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

де $H_{впн_i}$, $Q_{впн_i}$, $S_{впн_i}$, $Z_{впн_i}$ – відповідно номінальні гідравлічний напір й об'ємна витрата рідини та номінальні потужність і гідравлічний опір відцентрової помпи i -го агрегату; ρ, g – відповідно питома густина рідини та пришвидшення вільного падіння.

Математична модель відцентрової помпи формується в методі законів Кірхгофа на підставі її електричної заступної схеми (рис. 1), яка отримана з використанням принципу електрогідравлічної аналогії, та має такий вигляд [1]:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

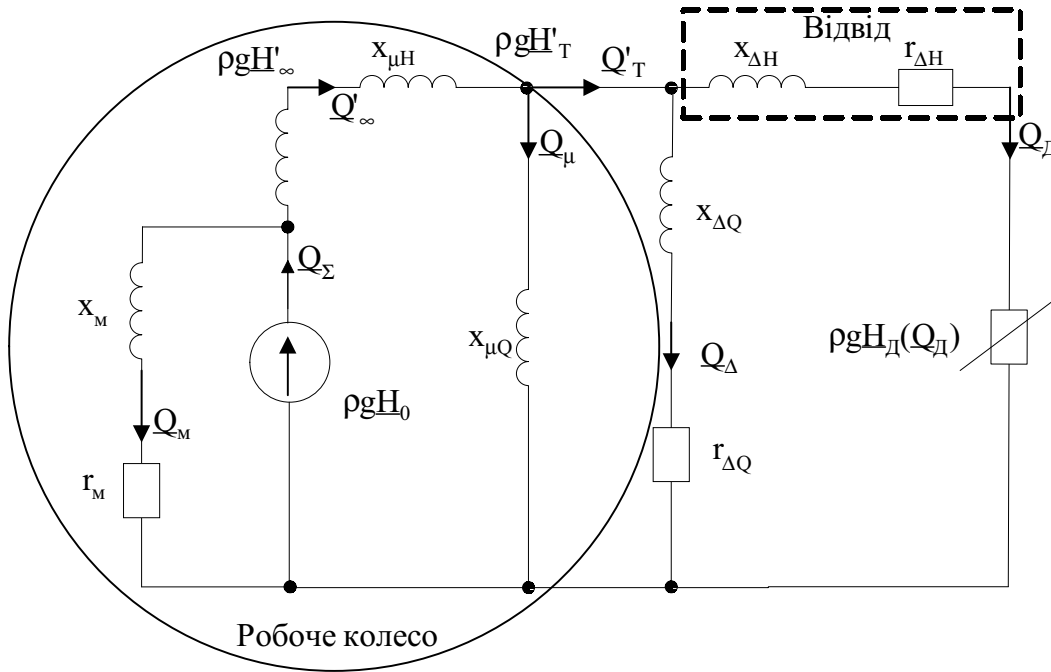


Рис. 1. Заступна електрична схема відцентрової помпи

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

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

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

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

де $Q_{M d_i}$, $Q_{M q_i}$ – розрахункові об’ємні втрати рідини відцентрової помпи i -го агрегату, спричинені силами дискового тертя та гідравлічним гальмуванням; $Q_{\mu d_i}$, $Q_{\mu q_i}$ – розрахункові об’ємні втрати рідини, спричинені скінченною кількістю лопастей; $Q_{\Delta d_i}$, $Q_{\Delta q_i}$ – розрахункові об’ємні втрати рідини через ущільнення; $Q_{\Sigma d_i}$, $Q_{\Sigma q_i}$ – сумарні розрахункові об’ємні витрати рідини відцентрової помпи; $Q_{\infty d_i}$, $Q_{\infty q_i}$ – розрахункові об’ємні витрати рідини ідеалізованої (без втрат і нескінченною кількістю лопастей) відцентрової помпи; $Q'_{T d_i}$, $Q'_{T q_i}$ – розрахункові об’ємні витрати рідини теоретичної (без втрат і скінченною кількістю

лопастей) відцентрової помпи; $H_{дi}, Q_{дi}$ – дійсний напір і дійсна об'ємна витрата рідини реальної відцентрової помпи; H_{0iH} – модуль зображального вектора розрахункового номінального напору ВП; $H_{ГМ}(Q_{ГМ})$ – статична напірна характеристика гідравлічної мережі; r_{Mi}, x_{Mi} – дисипативний і реактивний гідроопори, що відображають механічні втрати енергії відцентрової помпи від дискового тертя та гідравлічного гальмування; $r_{дHi}, x_{дHi}$ – дисипативний і реактивний гідроопори, що відображають гідравлічні втрати в спіральному відводі помпи; $r_{дQi}, x_{дQi}$ – дисипативний і реактивний гідроопори, що відображають вплив зворотних зв'язків через ущільнення на тиск рідини відцентрової помпи; $x_{μHi}, x_{μQi}$ – реактивні гідроопори, що враховують відповідно вплив скінченної кількості лопастей робочого колеса відцентрової помпи на її тиск і об'ємну витрату рідини; x_{ci} – внутрішній реактивний гідроопір відцентрової помпи; k_v – коефіцієнт в'язкості робочої рідини відцентрової помпи; $\omega_{r*бi}$ – відносна базова колова частота обертання спільного валу АД – ВП i -го агрегату; $\omega_б$ – базове значення колової частоти ($314,16 \text{ c}^{-1}$).

Зв'язок між усіма відцентровими помпами агрегатів і гідромережею встановлено на підставі того, що в разі послідовного сполучення гідротрактів помп крізь них проходить однаковий потік робочої рідини з об'ємною витратою Q_d , а сумарний напір H_d дорівнює сумі тисків окремих помп. Крім того, гідромережа вважається суто активним навантаженням для відцентрових помп, тобто зображальні вектори напору та витрати робочої рідини для кожної з помп і гідравлічної мережі є колінеарними. У зв'язку з тим, що рівняння стану кожної з ВП і гідромережі сформовані у власних відносних номінальних одиницях, рівняння зв'язку між ними необхідно записати у відносних базових одиницях. Тоді рівняння зв'язку між помпами та гідромережею матимуть такий вигляд:

$$\arctg\left(\frac{\sum_{k=1}^n (H_{дqk} H_{впнк} / H_б)}{\sum_{k=1}^n (H_{дdk} H_{впнк} / H_б)}\right) - \arctg(Q_{дqi} / Q_{дdi}) = 0; i = \overline{1, n}; \quad (18)$$

$$(Q_{впni} / Q_б) \sqrt{Q_{дdi}^2 + Q_{дqi}^2} - (Q_{впn(i+1)} / Q_б) \sqrt{Q_{дd(i+1)}^2 + Q_{дq(i+1)}^2} = 0; i = \overline{1, n-1}; \quad (19)$$

$$\sum_{k=1}^n \left(H_{впнк} / H_б \sqrt{H_{дdk}^2 + H_{дqk}^2} \right) - H_d(Q_d) H_{ГМН} / H_б = 0, \quad (20)$$

де n – кількість послідовно сполучених гідротрактів відцентрових помп агрегатів АД – ВП; $H_б, Q_б$ – відповідно базовий напір і об'ємна витрата робочої рідини; $H_{ГМН}$ – номінальний напір гідравлічної мережі.

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

$$S_{адн_i} = 3U_{Фн_i} I_{н_i} ; \quad (21)$$

$$Z_{адн_i} = U_{Фн_i} / I_{н_i} , \quad (22)$$

де $U_{Фн_i}$, $I_{н_i}$, $S_{адн_i}$, $Z_{адн_i}$ – відповідно номінальні значення фазної напруги, струму, потужності й опору асинхронного двигуна i -го агрегату АД–ВП.

Проведеними дослідженнями встановлено, що наведені в [2, 3, 5] математичні моделі насиченого АД в ортогональних координатах є недостатньо ефективними для аналізу усталених режимів агрегатів АД–ВП. У цьому зв'язку запропонована удосконалена математична модель насиченого асинхронного двигуна з урахуванням витіснення струму в роторі на підставі його двоконтурної заступної схеми [4], яка має такий вигляд:

$$r_{s_i} I_{sd_i} - \omega_{s^*} \delta_i (x_{s_i} I_{sq_i} + \Psi_{\delta q_i}) - U_{sd_i} = 0 ; \quad (23)$$

$$r_{s_i} I_{sq_i} + \omega_{s^*} \delta_i (x_{s_i} I_{sd_i} + \Psi_{\delta d_i}) - U_{sq_i} = 0 ; \quad (24)$$

$$r_{1r_i} I_{1rd_i} - (\omega_{s^*} \delta_i - \omega_{r^*} \delta_i) (x_{1r_i} I_{1rq_i} + \Psi_{\delta q_i}) / \omega_{s^*} \delta_i = 0 ; \quad (25)$$

$$r_{1r_i} I_{1rq_i} + (\omega_{s^*} \delta_i - \omega_{r^*} \delta_i) (x_{1r_i} I_{1rd_i} + \Psi_{\delta d_i}) / \omega_{s^*} \delta_i = 0 ; \quad (26)$$

$$r_{2r_i} I_{2rd_i} - (\omega_{s^*} \delta_i - \omega_{r^*} \delta_i) (x_{2r_i} I_{2rq_i} + \Psi_{\delta q_i}) / \omega_{s^*} \delta_i = 0 ; \quad (27)$$

$$r_{2r_i} I_{2rq_i} + (\omega_{s^*} \delta_i - \omega_{r^*} \delta_i) (x_{2r_i} I_{2rd_i} + \Psi_{\delta d_i}) / \omega_{s^*} \delta_i = 0 ; \quad (28)$$

$$I_{sd_i} + (I_{1rd_i} + I_{2rd_i}) - R_{мн_i} (\Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i}) \Psi_{\delta d_i} = 0 ; \quad (29)$$

$$I_{sq_i} + (I_{1rq_i} + I_{2rq_i}) - R_{мн_i} (\Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i}) \Psi_{\delta q_i} = 0 ; \quad (30)$$

I_{sd} , I_{sq} , I_{1rd} , I_{1rq} , I_{2rd} , I_{2rq} – відповідно струми статора та зведені до нього струми ротора АД в ортогональних координатах; $\Psi_{\delta d_i}$, $\Psi_{\delta q_i}$ – зведені до первинної обвитки статора потокозчеплення від магнітного потоку повітряного проміжку АД в ортогональних координатах;

$U_{sm_i} = \sqrt{U_{sd_i}^2 + U_{sq_i}^2}$ – амплітудне значення фазної напруги живлення статора АД; r_s , x_s – резистивний та індуктивний опір розсіювання обмотки статора Т-подібної заступної схеми асинхронного двигуна; 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; $\omega_{s^*} \delta_i$ – відносна базова колова частота напруги живлення статора АД i -го агрегату; $R_{мн_i} (\Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i})$ – нелінійний статичний магнітний опір головного магнітного кола АД.

Рівняння зв'язку між асинхронними двигуном і відцентровою помпою сформовано на підставі балансу електромагнітного моменту АД з механічним моментом ВП за умови однакової частоти обертання їх спільного вала. Це рівняння має такий вигляд:

$$\Psi_{\delta d_i} I_{sq_i} - \Psi_{\delta q_i} I_{sd_i} - (H_{0d_i} Q_{\Sigma d_i} - H_{0q_i} Q_{\Sigma q_i}) S_{впн_i} / S_{адн_i} - \Delta M_i (\omega_{r^*} \delta_i) = 0 , \quad (31)$$

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

Розв'язанню підлягає нелінійна система скінченних рівнянь (3)–(20) і (23)–(31), яка в матрично-векторному вигляді має такий вигляд:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}, \quad (32)$$

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

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &= (\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2, \dots, \mathbf{Q}_i, \dots, \mathbf{Q}_n)_t; \quad \mathbf{H} = (\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \dots, \mathbf{H}_i, \dots, \mathbf{H}_n)_t; \quad \mathbf{I} = (\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2, \dots, \mathbf{I}_i, \dots, \mathbf{I}_n)_t; \\ \mathbf{U} &= (\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2, \dots, \mathbf{U}_i, \dots, \mathbf{U}_n)_t; \quad \mathbf{\Psi}_\delta = (\mathbf{\Psi}_{\delta 1}, \mathbf{\Psi}_{\delta 2}, \dots, \mathbf{\Psi}_{\delta i}, \dots, \mathbf{\Psi}_{\delta n})_t; \quad \boldsymbol{\omega} = (\boldsymbol{\omega}_1, \boldsymbol{\omega}_2, \dots, \boldsymbol{\omega}_i, \dots, \boldsymbol{\omega}_n)_t; \\ \mathbf{Q}_i &= (\mathbf{Q1}_i, \mathbf{Q2}_i)_t; \quad \mathbf{Q1}_i = (\mathbf{Q}_{\text{M}d_i}, \mathbf{Q}_{\text{M}q_i}, \mathbf{Q}'_{\infty d_i}, \mathbf{Q}'_{\infty q_i}, \mathbf{Q}'_{\text{T}d_i}, \mathbf{Q}'_{\text{T}q_i})_t; \quad \mathbf{H}_i = (\mathbf{H}_{0d_i}, \mathbf{H}_{0q_i}, \mathbf{H}_{\text{д}d_i}, \mathbf{H}_{\text{д}q_i})_t; \\ \mathbf{Q2}_i &= (\mathbf{Q}_{\Sigma d_i}, \mathbf{Q}_{\Sigma q_i}, \mathbf{Q}_{\mu d_i}, \mathbf{Q}_{\mu q_i}, \mathbf{Q}_{\Delta d_i}, \mathbf{Q}_{\Delta q_i}, \mathbf{Q}_{\text{д}d_i}, \mathbf{Q}_{\text{д}q_i})_t; \quad \mathbf{I}_i = (\mathbf{I}_{\text{sd}_i}, \mathbf{I}_{\text{sq}_i}, \mathbf{I}_{\text{1rd}_i}, \mathbf{I}_{\text{1rq}_i}, \mathbf{I}_{\text{2rd}_i}, \mathbf{I}_{\text{2rq}_i})_t; \\ \mathbf{U}_i &= (\mathbf{U}_{\text{sd}_i}, \mathbf{U}_{\text{sq}_i})_t; \quad \mathbf{\Psi}_{\delta i} = (\mathbf{\Psi}_{\delta d_i}, \mathbf{\Psi}_{\delta q_i})_t; \quad \boldsymbol{\omega}_i = (\boldsymbol{\omega}_{\text{r}*\delta_i}, \boldsymbol{\omega}_{\text{s}*\delta_i})_t. \end{aligned}$$

Нелінійну систему скінченних рівнянь (32) найдоцільніше розв'язати методом Ньютона, робоча формула якого має такий вигляд [5]:

$$\mathbf{x}^{(i+1)} = \mathbf{x}^{(i)} - \Delta \mathbf{x}^{(i)}, \quad (33)$$

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

Компоненти вектор-стовпця поправок обчислюються розв'язанням системи лінеаризованих рівнянь стану АД–ВП методом Гавса такого вигляду:

$$\mathbf{W}(\mathbf{x}^{(i)}) \Delta \mathbf{x}^{(i)} = \mathbf{f}(\mathbf{x}^{(i)}). \quad (34)$$

Матриця Якобі для нелінійної системи рівнянь (32) має вигляд

$$\mathbf{W}(\mathbf{x}) = \partial \mathbf{f}(\mathbf{x}) / \partial \mathbf{x} = \left| \left| \begin{array}{cccccc} \mathbf{W}_Q & \mathbf{W}_H & \mathbf{W}_I & \mathbf{W}_U & \mathbf{W}_\Psi & \mathbf{W}_\omega \end{array} \right| \right|, \quad (35)$$

де

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_I &= \text{diag}(\mathbf{W}_{1,1I}, \dots, \mathbf{W}_{n,nI}); \quad \mathbf{W}_U = \text{diag}(\mathbf{W}_{1,1U}, \dots, \mathbf{W}_{n,nU}); \quad \mathbf{W}_\Psi = \text{diag}(\mathbf{W}_{1,1\Psi}, \dots, \mathbf{W}_{n,n\Psi}); \\ \mathbf{W}_\omega &= \text{diag}(\mathbf{W}_{1,1\omega}, \dots, \mathbf{W}_{n,n\omega}); \end{aligned}$$

$$\mathbf{W}_H = \left| \left| \begin{array}{cccccc} \mathbf{W}_{1,1H} & \bullet & \dots & \bullet & \dots & \bullet & \bullet \\ \bullet & \mathbf{W}_{2,2H} & \dots & \bullet & \dots & \dots & \bullet \\ \bullet & \bullet & \dots & \dots & \dots & \bullet & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \mathbf{W}_{i,iH} & \dots & \dots & \bullet \\ \bullet & \bullet & \dots & \dots & \dots & \bullet & \dots \\ \bullet & \bullet & \dots & \bullet & \dots & \mathbf{W}_{n-1,n-1H} & \bullet \\ \mathbf{W}_{n,1H} & \mathbf{W}_{n,2H} & \dots & \mathbf{W}_{n,iH} & \dots & \mathbf{W}_{n-1,nH} & \mathbf{W}_{n,nH} \end{array} \right| \right|;$$

$$W_Q = \left(\begin{array}{c|c|c|c|c|c|c|c} W_{1,1Q} & \bullet & \dots & \bullet & \dots & \bullet & \bullet \\ \bullet & W_{2,2Q} & \dots & \bullet & \dots & \dots & \bullet \\ \bullet & \bullet & \dots & \dots & \dots & \bullet & \dots \\ \dots & \dots & \dots & W_{i,iQ} & \dots & \dots & \bullet \\ \bullet & \bullet & \dots & \dots & \dots & \bullet & \dots \\ \bullet & \bullet & \dots & \bullet & \dots & W_{n-1,n-1Q} & \bullet \\ W_{n,1Q} & W_{n,2Q} & \dots & W_{n,iQ} & \dots & W_{n-1,nQ} & W_{n,nQ} \end{array} \right),$$

де $W_{i,iQ} = \left(\begin{array}{c|c} W_{i,iQ1} & W_{i,iQ2} \end{array} \right)$.

У нижченаведених матрицях для всіх значень $i = \overline{1,n}$ рядки (1)–(15) відповідають рівнянням (3)–(17); рядки (16)–(24) відповідають рівнянням (23)–(31); рядок 25 відповідає рівнянню (18). Рядок 26 відповідає рівнянню (19) для $i = \overline{1,n-1}$ й рівнянню (20) для $i = n$.

$$W_{i,iQ1} = \left(\begin{array}{c|c|c|c|c|c} -1 & \bullet & -1 & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & -1 & \bullet & -1 & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & 1 & \bullet & -1 & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & 1 & \bullet & -1 \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & 1 & \bullet \\ k_v r_{M_i} & -\omega_{r^* \delta_i} x_{M_i} & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \omega_{r^* \delta_i} x_{M_i} & k_v r_{M_i} & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \omega_{r^* \delta_i} (x_{t_i} + x_{\mu H_i}) & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \omega_{r^* \delta_i} (x_{t_i} + x_{\mu H_i}) & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \end{array} \right)$$

$$W_{i,iQ2} =$$

1	•	•	•	•	•	•	•
•	1	•	•	•	•	•	•
•	•	-1	•	•	•	•	•
•	•	•	-1	•	•	•	•
•	•	•	•	-1	•	-1	•
•	•	•	•	•	-1	•	-1
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	$\omega_{r^* \delta_i} X_{\mu Q_i}$	•	•	•	•
•	•	$\omega_{r^* \delta_i} X_{\mu Q_i}$	•	•	•	•	•
•	•	•	$\omega_{r^* \delta_i} X_{\mu Q_i}$	$k_v \Gamma_{\Delta Q_i}$	$-\omega_{r^* \delta_i} X_{\Delta Q_i}$	•	•
•	•	$-\omega_{r^* \delta_i} X_{\mu Q_i}$	•	$\omega_{r^* \delta_i} X_{\Delta Q_i}$	$k_v \Gamma_{\Delta Q_i}$	•	•
•	•	•	•	$k_v \Gamma_{\Delta Q_i}$	$-\omega_{r^* \delta_i} X_{\Delta Q_i}$	$-k_v \Gamma_{\Delta H_i}$	$\omega_{r^* \delta_i} X_{\Delta H_i}$
•	•	•	•	•	$k_v \Gamma_{\Delta Q_i}$	$-\omega_{r^* \delta_i} X_{\Delta H_i}$	$-k_v \Gamma_{\Delta H_i}$
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
$\frac{H_{0d_i} S_{\text{впн}_i}}{S_{\text{адн}_i}}$	$\frac{H_{0q_i} S_{\text{впн}_i}}{S_{\text{адн}_i}}$	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	$\frac{-1}{Q_{\Delta q_i} \left(1 + \left(\frac{Q_{\Delta d_i}}{Q_{\Delta q_i}} \right)^2 \right)}$	$\frac{Q_{\Delta d_i}}{Q_{\Delta q_i}^2 \left(1 + \left(\frac{Q_{\Delta d_i}}{Q_{\Delta q_i}} \right)^2 \right)}$
•	•	•	•	•	•	$\frac{Q_{\text{впн}_i} Q_{\Delta d_i}}{Q_{\delta} \sqrt{Q_{\Delta d_i}^2 + Q_{\Delta q_i}^2}}$	$\frac{Q_{\text{впн}_i} Q_{\Delta q_i}}{Q_{\delta} \sqrt{Q_{\Delta d_i}^2 + Q_{\Delta q_i}^2}}$

$$W_{n,nQ2} =$$

1	•	•	•	•	•	•	•
•	1	•	•	•	•	•	•
•	•	-1	•	•	•	•	•
•	•	•	-1	•	•	•	•
•	•	•	•	-1	•	-1	•
•	•	•	•	•	-1	•	-1
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	$\omega_{r^* \delta_n} X_{\mu Q_n}$	•	•	•	•
•	•	$\omega_{r^* \delta_n} X_{\mu Q_n}$	•	•	•	•	•
•	•	•	$\omega_{r^* \delta_n} X_{\mu Q_n}$	$k_v \Gamma_{\Delta Q_n}$	$-\omega_{r^* \delta_n} X_{\Delta Q_n}$	•	•
•	•	$-\omega_{r^* \delta_n} X_{\mu Q_n}$	•	$\omega_{r^* \delta_n} X_{\Delta Q_n}$	$k_v \Gamma_{\Delta Q_n}$	•	•
•	•	•	•	$k_v \Gamma_{\Delta Q_n}$	$-\omega_{r^* \delta_n} X_{\Delta Q}$	$-k_v \Gamma_{\Delta H_n}$	$\omega_{r^* \delta_n} X_{\Delta H_n}$
•	•	•	•	$\omega_{r^* \delta_n} X_{\Delta Q}$	$k_v \Gamma_{\Delta Q_n}$	$-\omega_{r^* \delta_n} X_{\Delta H_n}$	$-k_v \Gamma_{\Delta H_n}$
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	•	•
$\frac{H_{0d_n} S_{\text{впн}_n}}{S_{\text{адн}_n}}$	$\frac{H_{0q_n} S_{\text{впн}_n}}{S_{\text{адн}_n}}$	•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•	$\frac{-1}{Q_{\Delta q_n} \left(1 + \left(\frac{Q_{\Delta d_n}}{Q_{\Delta q_n}} \right)^2 \right)}$	$\frac{Q_{\Delta d_n}}{Q_{\Delta q_n}^2 \left(1 + \left(\frac{Q_{\Delta d_n}}{Q_{\Delta q_n}} \right)^2 \right)}$
•	•	•	•	•	•	$\frac{H_{\Gamma\text{MH}} d3}{H_{\delta}}$	$\frac{H_{\Gamma\text{MH}} d4}{H_{\delta}}$

де

$$d3 = \frac{\partial H_{д}(Q_{д})}{\partial Q_{дd_n}} = \frac{\partial H_{д}(Q_{д})}{\partial Q_{д}} \frac{\partial Q_{д}(Q_{дd_n})}{\partial Q_{дd_n}} = \frac{\partial H_{д}(Q_{д})}{\partial Q_{д}} \frac{Q_{дd_n}}{\sqrt{Q_{дd_n}^2 + Q_{дq_n}^2}};$$

$$d4 = \frac{\partial H_{д}(Q_{д})}{\partial Q_{дq_n}} = \frac{\partial H_{д}(Q_{д})}{\partial Q_{д}} \frac{\partial Q_{д}(Q_{дq_n})}{\partial Q_{дq_n}} = \frac{\partial H_{д}(Q_{д})}{\partial Q_{д}} \frac{Q_{дq_n}}{\sqrt{Q_{дd_n}^2 + Q_{дq_n}^2}};$$

$W_{i,iH} =$

•	•	•	•
•	•	•	•
•	•	•	•
•	•	•	•
•	•	•	•
•	•	•	•
•	•	•	•
-1	•	•	•
•	-1	•	•
1	•	•	•
•	-1	•	•
•	•	•	•
•	•	•	•
•	•	-1	•
•	•	•	-1
H_{0d_i}/H_{0i}	H_{0q_i}/H_{0i}	•	•
•	•	•	•
•	•	•	•
•	•	•	•
•	•	•	•
•	•	•	•
•	•	•	•
•	•	•	•
•	•	•	•
•	•	•	•
$-Q_{\Sigma d_i} S_{впн_i}/S_{адн_i}$	$Q_{\Sigma q_i} S_{впн_i}/S_{адн_i}$	•	•
•	•	$\bar{d}1_i$	$\bar{d}2_i$
•	•	•	•

$W_{i,i\Psi} =$

•	•
•	•
•	•
•	•
•	•
•	•
•	•
•	•
•	•
•	•
•	•
•	•
•	•
•	•
•	•
•	•
•	$-\omega_{s*\bar{\sigma}_i}$
$\omega_{s*\bar{\sigma}_i}$	•
•	$(\omega_{s*\bar{\sigma}_i} - \omega_{r*\bar{\sigma}_i})$
•	$\omega_{s*\bar{\sigma}_i}$
$(\omega_{s*\bar{\sigma}_i} - \omega_{r*\bar{\sigma}_i})$	•
$\omega_{s*\bar{\sigma}_i}$	•
•	$(\omega_{s*\bar{\sigma}_i} - \omega_{r*\bar{\sigma}_i})$
•	$\omega_{s*\bar{\sigma}_i}$
$(\omega_{s*\bar{\sigma}_i} - \omega_{r*\bar{\sigma}_i})$	•
$\omega_{s*\bar{\sigma}_i}$	•
$\bar{d}5_i$	$\bar{d}6_i$
$\bar{d}8_i$	$\bar{d}7_i$
I_{sq_i}	$-I_{sd_i}$
•	•
•	•

26-рядків

$$W_{n,iH} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \cdot & \cdot & \frac{H_{впн_i} H_{дд_i}}{H_6 \sqrt{H_{дд_i}^2 + H_{дқ_i}^2}} & \frac{H_{впн_i} H_{дқ_i}}{H_6 \sqrt{H_{дд_i}^2 + H_{дқ_i}^2}} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}$$

$$W_{n,nH} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & -1 & \cdot & \cdot \\ 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & -1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & -1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & -1 \\ H_{0д_n} / \sqrt{H_{0д_n}^2 + H_{0қ_n}^2} & H_{0д_n} / \sqrt{H_{0д_n}^2 + H_{0қ_n}^2} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -Q_{\Sigma d_n} S_{впн_n} / S_{впн_n} & Q_{\Sigma q_n} S_{впн_n} / S_{адн_n} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \frac{d1_n}{H_{впн_n} H_{дд_n}} & \frac{d2_n}{H_{впн_n} H_{дқ_n}} \\ \cdot & \cdot & \frac{H_{впн_n} H_{дд_n}}{H_6 \sqrt{H_{дд_n}^2 + H_{дқ_n}^2}} & \frac{H_{впн_n} H_{дқ_n}}{H_6 \sqrt{H_{дд_n}^2 + H_{дқ_n}^2}} \end{pmatrix};$$

де $i = \overline{1, n}$;

$$d1_i = -H_{впн_i} \sum_{k=1}^n (H_{дқ_k} H_{впн_k}) / \left(H_6 \sum_{k=1}^n (H_{дд_k} H_{впн_k}) \right) / \left(1 + \left(\sum_{k=1}^n (H_{дқ_k} H_{впн_k}) / \sum_{k=1}^n (H_{дд_k} H_{впн_k}) \right)^2 \right);$$

$$d2_i = H_{\text{BPH}_i} / \left(H_{\delta} \left(1 + \left(\sum_{k=1}^n H_{\text{dq}_k} / \sum_{k=1}^n H_{\text{dk}} \right)^2 \right) \sum_{k=1}^n \left(H_{\text{dk}} H_{\text{BPH}_k} / H_{\delta} \right) \right);$$

$$d5_i = - \left(\frac{\partial R_{\text{mH}_i}(\Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i})}{\partial \Psi_{\delta d_i}} \Psi_{\delta d_i} + R_{\text{mH}_i}(\Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i}) \right); \quad d6_i = - \left(\frac{\partial R_{\text{mH}_i}(\Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i})}{\partial \Psi_{\delta q_i}} \Psi_{\delta d_i} \right);$$

$$d7_i = - \left(\frac{\partial R_{\text{mH}_i}(\Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i})}{\partial \Psi_{\delta d_i}} \Psi_{\delta q_i} \right); \quad d8_i = - \left(\frac{\partial R_{\text{mH}_i}(\Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i})}{\partial \Psi_{\delta q_i}} \Psi_{\delta q_i} \right) + R_{\text{mH}_i}(\Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i});$$

$W_{i,i1} =$

•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
r_{s_i}	$-\omega_{s*\delta_i} x_{s_i}$	•	•	•	•
$-\omega_{s*\delta_i} x_{s_i}$	r_{s_i}	•	•	•	•
•	•	r_{1r_i}	$-\frac{(\omega_{s*\delta_i} - \omega_{r*\delta_i})x_{1r_i}}{\omega_{s*\delta_i}}$	•	•
•	•	$\frac{(\omega_{s*\delta_i} - \omega_{r*\delta_i})x_{1r_i}}{\omega_{s*\delta_i}}$	r_{1r_i}	•	•
•	•	•	•	r_{2r_i}	$-\frac{(\omega_{s*\delta_i} - \omega_{r*\delta_i})x_{2r_i}}{\omega_{s*\delta_i}}$
•	•	•	•	$\frac{(\omega_{s*\delta_i} - \omega_{r*\delta_i})x_{2r_i}}{\omega_{s*\delta_i}}$	r_{2r_i}
1	•	1	•	1	•
•	1	•	1	1	1
$-\Psi_{\delta d_i}$	$\Psi_{\delta d_i}$	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•

$$\mathbf{W}_{i,iU} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ -1 & \cdot \\ \cdot & -1 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{W}_{i,i\omega} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ -x_{M_i} Q_{Mq_i} & \cdot \\ x_{M_i} Q_{Md_i} & \cdot \\ (x_{t_i} + x_{\mu H_i}) Q_{\infty q_i} + x_{\mu Q_i} Q_{\mu q_i} & \cdot \\ (x_{t_i} + x_{\mu H_i}) Q_{\infty d_i} + x_{\mu Q_i} Q_{\mu d_i} & \cdot \\ x_{\mu Q_i} Q_{\mu q_i} - x_{\Delta Q_i} Q_{\Delta q_i} & \cdot \\ -x_{\mu Q_i} Q_{\mu d_i} + x_{\Delta Q_i} Q_{\Delta d_i} & \cdot \\ x_{\Delta H_i} Q_{\Delta q_i} - x_{\Delta Q_i} Q_{\Delta q_i} & \cdot \\ -x_{\Delta H_i} Q_{\Delta d_i} + x_{\Delta Q_i} Q_{\Delta d_i} & \cdot \\ -2\omega_{r^* \delta_i} H_{0HOM_i} & \cdot \\ \cdot & -(x_{s_i} I_{sq_i} + \Psi_{\delta q_i}) \\ \cdot & (x_{s_i} I_{sd_i} + \Psi_{\delta d_i}) \\ (x_{1r_i} I_{1rq_i} + \Psi_{\delta q_i}) / \omega_{s^* \delta_i} & -\omega_{r^* \delta_i} (x_{1r_i} I_{1rq_i} + \Psi_{\delta q_i}) / \omega_{s^* \delta_i}^2 \\ -(x_{1r_i} I_{1rd_i} + \Psi_{\delta d_i}) / \omega_{s^* \delta_i} & \omega_{r^* \delta_i} (x_{1r_i} I_{1rd_i} + \Psi_{\delta d_i}) / \omega_{s^* \delta_i}^2 \\ (x_{2r_i} I_{2rq_i} + \Psi_{\delta q_i}) / \omega_{s^* \delta_i} & -\omega_{r^* \delta_i} (x_{2r_i} I_{2rq_i} + \Psi_{\delta q_i}) / \omega_{s^* \delta_i}^2 \\ -(x_{2r_i} I_{2rd_i} + \Psi_{\delta d_i}) / \omega_{s^* \delta_i} & \omega_{r^* \delta_i} (x_{2r_i} I_{2rd_i} + \Psi_{\delta d_i}) / \omega_{s^* \delta_i}^2 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \frac{\partial \Delta M_i(\omega_{r^* \delta_i})}{\partial \omega_{r^* \delta_i}} & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \end{pmatrix};$$

Для однозначності розв'язку системи рівнянь (33) необхідно задати додаткові умови

$$U_{sq_i} = 0; \quad U_{sm_i} = \sqrt{U_{sd_i}^2 + U_{sq_i}^2} = U_{sd_i}; \quad \omega_{s^* \delta_i} = \text{const}; \tag{36}$$

$$H_{0q_i} = 0; \quad H_{0_i} = \sqrt{H_{0d_i}^2 + H_{0q_i}^2} = H_{0d_i}.$$

Для ефективного розв'язання нелінійної системи (33) необхідно мати відповідні початкові наближення шуканих невідомих. З цією метою спочатку необхідно задати початковими номінальні значення (37). Потім необхідно розв'язати систему рівнянь (6)–(19), (21)–(28), підставивши у них (37).

Розрахунок множини усталених режимів здійснювався зміною єдиної для всіх агрегатів лінійної напруги живлення АД U_s у межах від $0,7U_{SH}$ до $1,1U_{SH}$ за умови, що $\omega_{s_i} = \omega_{SH_i} = \text{const}$. Як показали дослідження, доцільно лише один раз знайти відповідні початкові наближення координат усталеного режиму агрегату для першої точки. За

початкові наближення для розрахунку усталеного режиму для наступної точки слід брати результати розрахунку режиму для попередньої точки.

За допомогою створеної математичної моделі проведені тестові розрахунки координат усталених режимів і статичних характеристик навантаження агрегату АД–ВП, який складається з основної та підпірної pomp. Гідротракти цих pomp сполучні послідовно та працюють на спільну гідромережу з нелінійною статичною напірною характеристикою. Кожну з pomp приводять в рух окремим асинхронним двигуном, що живиться від шин підстанції потужної електропостачальної системи.

1. Підпірна помпа **8МБ-9*2** приводиться в рух двигуном **А3-1252-4**.

Кількісні значення номінальних параметрів помпи **8МБ-9*2**:

$x_m=21,416$; $r_m=0,269$; $x_t=0,243$; $x_{\mu H}=0,011$; $x_{\mu q}=0,754$; $x_{\Delta q}=6,56$; $r_{\Delta q}=30,18$; $x_{\Delta H}=0,489$;
 $r_{\Delta H}=0,00307$; $H_{OH}=1,627$; $H_{дн}=300$ м; $Q_{дн}=0,11$ м³/с; $P_H=448$ кВт; $n_H=3000$ об/хв.

Кількісні значення номінальних параметрів двигуна **А3-1252-4**:

$r_s=0,0103$; $x_s=0,0865$; $r_{r1}=0,0109$; $x_{r1}=0,168$; $r_{r2}=0,115$; $x_{r2}=0,177$; $x_a=2,22$;
 $P_H=630$ кВт; $U_H=6$ кВ; $k_{max}=2,1$; $\cos\phi_H=0,9$; $n_H=2975$ об/хв; $\Delta M_i(\omega_{r*}\sigma_i)=0,04$.

2. Основна помпа **10Н-8*4** приводиться в рух двигуном **ДАЗО-1910-12**.

Кількісні значення номінальних параметрів помпи **10Н-8*4**:

$x_m=19,288$; $r_m=0,163$; $x_t=0,158$; $x_{\mu H}=0,014$; $x_{\mu q}=0,549$; $x_{\Delta q}=7,36$; $r_{\Delta q}=29,19$; $x_{\Delta H}=0,482$;
 $r_{\Delta H}=0,00204$; $H_{OH}=1,544$; $H_{дн}=740$ м; $Q_{дн}=0,14$ м³/с; $P_H=1381$ кВт; $n_H=3000$ об/хв.

Кількісні значення номінальних параметрів двигуна **ДАЗО-1910-12**:

$r_s=0,00458$; $x_s=0,122$; $r_{r1}=0,0033$; $x_{r1}=0,1937$; $r_{r2}=0,0033$; $x_{r2}=0,1937$; $x_a=2,24$;
 $P_H=1700$ кВт; $U_H=6$ кВ; $k_{max}=2,1$; $\cos\phi_H=0,9$; $n_H=2975$ об/хв; $\Delta M_i(\omega_{r*}\sigma_i)=0,04$.

Нелінійний статичний магнітний опір головного магнітного кола асинхронного двигуна апроксимований поліномом вигляду

$$R_{mn_i}(\Psi_{\delta d_i}, \Psi_{\delta q_i}) = I_{mn_i} \left(a_0 + a_1 \cdot (\Psi_{\delta d_i}^2 + \Psi_{\delta q_i}^2) + a_2 \cdot (\Psi_{\delta d_i}^2 + \Psi_{\delta q_i}^2)^4 \right), \quad (37)$$

де $a_0=0,82$; $a_1=0,148$; $a_2=0,044$; $I_{mn_i} = 1/(x_{s_i} + x_{a_i})$.

Статична напірна характеристика гідромережі також апроксимована поліномом

$$H_{ГМ*Н}(Q_{ГМ*Н}) = H_{0*Н} + (1 - H_{0*Н}) Q_{ГМ*Н}^2, \quad (38)$$

де $H_{0*Н} = 0,2$; $H_{ГМН} = 1050$ м; $H_0 = 1050$ м; $Q_{ГМН} = 0,14$ м³/с; $Q_0 = 0,14$ м³/с.

На рис. 2, 3, 4 і 5 показано результати розрахунків у вигляді графічних залежностей координат режиму агрегату АД – ВП від лінійної напруги $U_{сл}$ живлення статорів асинхронних двигунів за умови підтримання сталої частоти цієї напруги.

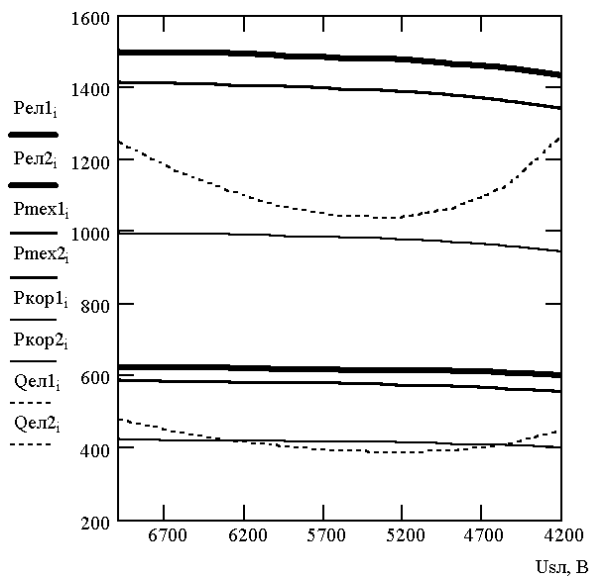


Рис. 2. Залежності частоти обертання роторів пр АД–ВП від напруги живлення АД

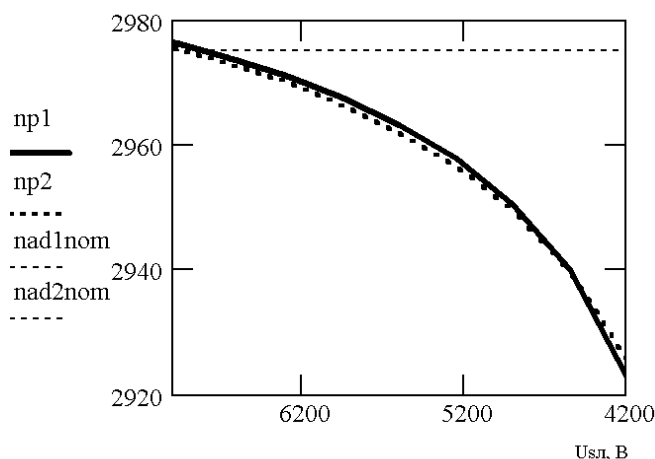


Рис. 3. Залежність потужностей агрегатів від напруги живлення АД

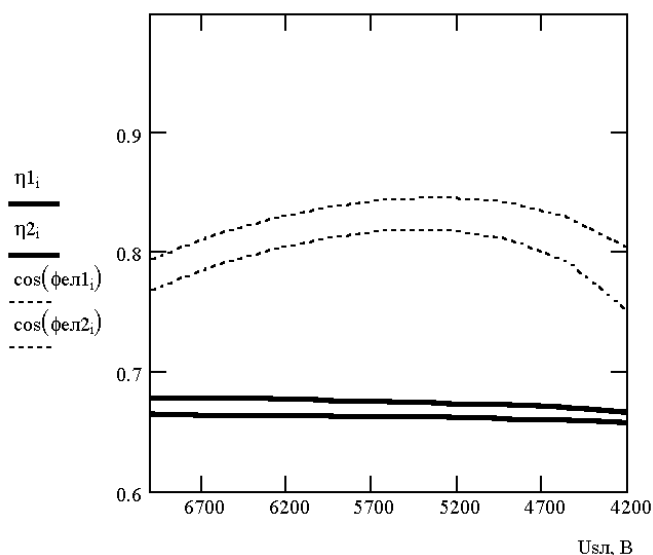


Рис. 4. Залежність ККД і $\cos(\varphi)$ АД від напруги живлення

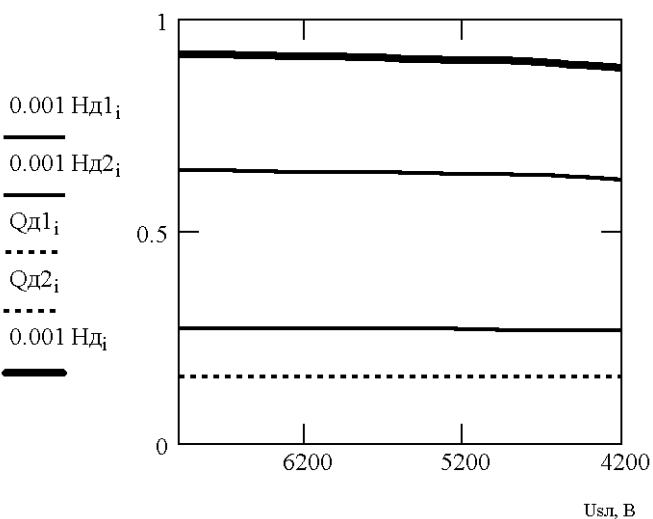


Рис. 5. Залежність напорів і об'ємних витрат рідини ВП від напруги живлення

Висновки. На підставі електрогідравлічної аналогії вперше створено адекватну математичну модель аналізу усталених режимів групи агрегатів із насиченими асинхронними двигунами та відцентровими помпами з послідовно сполученими гідротрактами. Запропоновано ефективний метод аналізу усталених режимів зазначених електроприймачів як елементів вузла навантаження електропостачальної системи з урахуванням статичної напірної характеристики гідравлічної мережі, що забезпечить можливість розрахунку достовірних статичних характеристик навантаження електричних підстанцій електропостачальних систем водогінних мереж і помпових станцій нафтогонів.

1. Костишин В.С. Моделирование режимів роботи відцентрових насосів на основі електрогідравлічної аналогії. – Івано-Франківськ, 2000. – 163 с. 2. Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах / Под ред. Н.И. Соколова. – М., 1970. – 400 с. 3. Сипайлов Г.А., Лоос А.В. Математическое моделирование электрических машин. – М., 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 электро-механических преобразователей. – К., 197, – 208 с. 6. Перхач В.С. Математичні задачі електроенергетики. – Львів, 1989. – 464 с.

УДК 621.3.011.72

В.І. Горячко, Т.І. Рижий, М.В. Коцюба
Національний університет “Львівська політехніка”

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНЕТНОГО МОМЕНТУ В МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЯХ НЕЯВНОПОЛЮСНИХ МАШИН З ЄДИНИМ МАГНЕТНИМ ПОТОКОМ

© Горячко В.І., Рижий Т.І., Коцюба М.В., 2003

Запропоновано методику визначення електромагнетного моменту на підставі геометричних параметрів, струмів віток і магнетних потоків у колових математичних моделях неявнополюсних машин з єдиним магнетним потоком.

A technique of electromagnetic moment determination in circuit mathematical models of non-salient pole machines with common magnetic flux on the basis of geometric parameters, currents of branches and magnetic fluxes is offered.

Постановка проблеми. Для дослідження електромагнетних перехідних процесів було розроблено високоточну математичну модель синхронного турбогенератора (СТГ) на підставі єдиного магнетного потоку (без розділення його на основний та потік розсіяння) [1]. Протягом таких короткотривалих процесів швидкість обертання ротора часто можна вважати незмінною. Для дослідження довготривалих електромеханічних процесів таке припущення є недопустимим і вимагає врахування у рівнянні руху машини зміни електромагнетного моменту. Тому нами було поставлено завдання визначення електромагнетного моменту неявнополюсної машини на підставі згаданих вище розроблених математичних моделей.

Аналіз останніх досліджень. У наявних колових математичних моделях електричних машин [2, 3] електромагнетний момент переважно визначається через потокозчеплення та струми. Тут з врахуванням припущення гармонійного розподілу намагнечувальних сил необхідно використовувати формули перетворення, що значно знижує економічність вказаних моделей. Складні високовимірні польові моделі машин [4] дозволяють визначити електромагнетний момент у режимі заданих струмів і фіксованих положень рухомих частин. Тому актуальною задачею залишається визначення електромагнетного моменту у високоефективних за точністю і економічністю колових моделях електричних машин.

Формулювання цілей статті. Метою статті є розширення застосування високоточних