

4. Howykowycz M. *Application of invariant approximations technique to electrical field analysis // Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering.* – 2006. – P. 864–867. 5. Howykowycz M., Filc R. *On difference approximation of biharmonic operator on a regular triangular grid // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science.* – 2008. – P. 63–66. 6. Говикович М., Фільц Р. *Теоретичні засади варіаційної задачі аналізу електромагнетного поля. Ч. 1 // Теоретична електротехніка.* – 2008. – Вип. 59. – С. 87–96.

УДК 621.316.11:621.67

П.Ф. Гоголюк, Т.М. Гречин, В.Г. Лисяк
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕПМС

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ ВУЗЛА НАВАНТАЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАЛЬНОЇ СИСТЕМИ З БЛОЧНИМ ПОМПОВИМ АГРЕГАТОМ

© Гоголюк П.Ф., Гречин Т.М., Лисяк В.Г., 2009

Створено математичну модель для аналізу усталених режимів вузла навантаження електропостачальної системи з блочним відцентровим помповим агрегатом із асинхронним електродвигуном. Отримано залежності напруги та частоти напруги живлення електродвигуна від продуктивності помпи з метою формування функцій частотного керування електродвигуном автоматичної системи керування агрегату.

Mathematical model intended for analysis of steady-state processes in element of load in electric power distribution system with block centrifugal pump apparatus with electric asynchronous motor is created. Dependencies of electric motor voltage and frequency on pump productivity in order to form frequency control function of electric motor automatic control system were obtained.

Постановка проблеми. Неперервне зростання вартості енергоресурсів спонукає інтенсивно розробляти й впроваджувати всі можливі засоби їхнього ощадливого використання. Зокрема, це істотно стосується потужних помпових станцій, де автоматичні системи керування продуктивністю відцентрових pomp лише впроваджуються. На сучасному етапі розвитку математичного моделювання відсутні ефективні моделі низки 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, оскільки ускладнює розроблення прикладного математичного та програмного забезпечення автоматизованих систем проектування електропостачальних систем (ЕПС). Зокрема, відсутня ефективна математична модель вузла навантаження з блочним відцентровим помповим агрегатом із асинхронним електродвигуном, яка дозволяла б безпосередньо враховувати взаємний вплив не лише енергетичних, а й гідравлічних і електромагнітних параметрів.

Аналіз результатів останніх досліджень та публікацій. За останні роки було створено математичні моделі самих відцентрових pomp (ВП) на підставі принципу електрогідравлічної аналогії, а також, на їх підставі – математичні моделі агрегатів асинхронний двигун (АД) – відцентрова помпа [1,2]. Крім того, фірмою DHI WATER ENVIRONMENT розроблено програмний комплекс MIKE NET, призначений для моделювання режимів і процесів у системах питного

водопостачання. Він, а також більшість інших наявних розробок, не дозволяють ефективно відслідковувати взаємний вплив елементів агрегатів, що складаються з об'єктів різної фізичної природи на підставі їхніх заступних схем із безпосереднім використанням їхніх координат режиму та параметрів, зокрема – втрат енергії в окремих елементах pomp (дифузори, спіральному відводі, ущільненнях тощо), електричних двигунів і їхній взаємний вплив (наприклад, насичення магнітопроводу, несинусоїдності струмів) тощо. Зокрема, відсутня математична модель для аналізу

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

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

усталених режимів вузла навантаження ЕПС із блочним асинхронним відцентровим помповим агрегатом і статичним навантаженням, яка б дозволяла враховувати взаємний вплив останніх.

Задача досліджень. Метою роботи є створення математичної моделі усталених режимів вузла навантаження, до складу якого входять статичне навантаження, а також блочний відцентровий помповий агрегат із асинхронним електродвигуном з урахуванням взаємного впливу режимів гідравлічної мережі та електропостачальної системи, а також взаємного впливу гідравлічних і електромагнітних параметрів для формування функцій частотного керування електродвигуном автоматичної системи керування агрегату.

Виклад основного матеріалу. Математичну модель усталених режимів блочного агрегату АД–ВП створено із використанням запису рівнянь стану в окремих для АД і ВП жорстко зв'язаних, відповідно, з обертовим магнітним полем статора АД d_s, q_s [3, 5, 6] та робочим колесом ВП d, q [1, 2] ортогональних координатах у відносних базових одиницях.

Для формування рівнянь математичної моделі відцентрової помпи у відносних базових одиницях використано таку систему основних номінальних величин: де $H_{ВПн}, Q_{ВПн}, S_{ВПн}, Z_{ВПн}$ – відповідно номінальні гідравлічний напір й об'ємна витрата рідини та номінальні потужність і гідроопір відцентрової помпи; ρ, g – відповідно густина рідини та пришвидження вільного падіння.

За базові беруться номінальні параметри помпи. Заступну схему відцентрової помпи наведено в [1]. Кількість рівнянь математичної моделі ВП зменшено порівняно з [1] до семи шляхом еквівалентного перетворення зазначеної схеми у Т-подібну. Математичну модель відцентрової помпи сформовано за методом контурних координат на підставі її електричної перетвореної заступної схеми, що наведена на рис. 1 у роботі [2]:

$$(R_{0e} + R_{1e})Q_{11d} - \omega_r (X_{0e} + X_{1e})Q_{11q} - R_{0e}Q_{11d} + \omega_r X_{0e}Q_{22q} - H_{0d} = 0; \quad (3)$$

$$\omega_r (X_{0e} + X_{1e})Q_{11d} + (R_{0e} + R_{1e})Q_{11q} - \omega_r X_{0e}Q_{22d} - R_{0e}Q_{22q} - H_{11q} = 0; \quad (4)$$

$$(R_{0e} + R_{2e})Q_{22d} - \omega_r (X_{0e} + X_{2e})Q_{22q} - R_{0e}Q_{11d} + \omega_r X_{0e}Q_{11q} + H_{\ddot{a}d} = 0; \quad (5)$$

$$\omega_r (X_{0e} + X_{2e})Q_{22d} + (R_{0e} + R_{2e})Q_{22q} - \omega_r X_{0e}Q_{11d} - R_{0e}Q_{11q} - H_{\ddot{a}q} = 0; \quad (6)$$

$$\sqrt{H_{0d}^2 + H_{0q}^2} - \omega_r^2 H_{0n} = 0; \quad (7)$$

$$Q_{22d} - \sqrt{Q_{22d}^2 + Q_{22q}^2} \cos(\Psi_{0Q_{22}}) = 0; \quad (8)$$

$$H_{dq}Q_{22d} - H_{dd}Q_{22q} = 0; \quad (9)$$

$$\sqrt{(H_{dd})^2 + (H_{dq})^2} = H_d(Q_d), \quad (10)$$

де Q_{22d}, Q_{22q} – дійсна розрахункова об'ємна витрата рідини відцентрової помпи; H_{dd}, H_{dq} – дійсний розрахунковий тиск відцентрової помпи; Ψ_{0Q} – початкова фаза зображального вектора дійсної витрати робочої рідини відцентрової помпи; Q_{11d}, Q_{11q} – розрахункові об'ємні витрати рідини

ідеалізованої відцентрової помпи; H_{0d} , H_{0q} – розрахунковий тиск ідеалізованої відцентрової помпи; H_{0H} – номінальний тиск неробочого режиму ідеалізованої відцентрової помпи; ω_r – відносна колова частота обертання спільного вала АД – ВП агрегату; $R_{1e}, X_{1e}, R_{2e}, X_{2e}, R_{0e}, X_{0e}$ – еквівалентні активні та реактивні гідроопори перетвореної заступної схеми відцентрової помпи (ці опори обчислюються через опори схеми [1] при еквівалентному перетворенні схеми [1] у схему на рис. 1 [2], і є функціями частоти обертання робочого колеса помпи); $H_d(Q_d)$ – статична напірна характеристика гідравлічної мережі.

Для формування рівнянь математичної моделі асинхронного двигуна у відносних базових одиницях використано таку систему основних номінальних величин:

$$S_{АДн} = 3U_{Фн}I_H = (3/2)U_{mФн}I_{mн}; \quad (11)$$

$$Z_{АДн} = U_{Фн}/I_H, \quad (12)$$

де $U_{Фн}$, I_H , $S_{АДн}$, $Z_{АДн}$ – відповідно номінальні дієві ($U_{mФн}$, $I_{mн}$ – амплітудні) значення фазної напруги, струму, потужності й опору асинхронного двигуна.

Для насиченого АД використано удосконалену математичну модель із урахуванням явища витіснення струму в роторі на підставі його двоконтурної заступної схеми [3, 5, 6]:

$$R_s i_{sd_s} - \omega_s (L_{os} i_{sd_s} + \Psi_{\delta q_s}) - u_{sd_s} = 0; \quad (13)$$

$$R_s i_{sq_s} + \omega_s (L_s i_{sd_s} + \Psi_{\delta d_s}) - u_{sq_s} = 0; \quad (14)$$

$$R_{1r} i_{1rd_s} - (\omega_s - \omega_r) (L_{1r} i_{1rq_s} + \Psi_{\delta q_s}) / \omega_s = 0; \quad (15)$$

$$R_{1r} i_{1rq_s} + (\omega_s - \omega_r) (L_{1r} i_{1rd_s} + \Psi_{\delta d_s}) / \omega_s = 0; \quad (16)$$

$$R_{2r} i_{2rd_s} - (\omega_s - \omega_r) (L_{2r} i_{2rq_s} + \Psi_{\delta q_s}) / \omega_s = 0; \quad (17)$$

$$R_{2r} i_{2rq_s} + (\omega_s - \omega_r) (L_{2r} i_{2rd_s} + \Psi_{\delta d_s}) / \omega_s = 0; \quad (18)$$

$$i_{sd_s} + (i_{1rd_s} + i_{2rd_s}) - R_m(\Psi_{\delta d_s}, \Psi_{\delta q_s}) \Psi_{\delta d_s} = 0; \quad (19)$$

$$i_{sq_s} + (i_{1rq_s} + i_{2rq_s}) - R_m(\Psi_{\delta d_s}, \Psi_{\delta q_s}) \Psi_{\delta q_s} = 0; \quad (20)$$

$$u_{sd_s} - \sqrt{u_{sd_s}^2 + u_{sq_s}^2} \cdot \cos(\Psi_{ou_s}) = 0, \quad (21)$$

де i_{sd_s} , i_{sq_s} , i_{1rd_s} , i_{1rq_s} , i_{2rd_s} , i_{2rq_s} – відповідно струми статора та зведені до нього струми двох контурів ротора заступної схеми АД; $\Psi_{\delta d_s}$, $\Psi_{\delta q_s}$ – зведені до первинної обвитки статора потокозчеплення від

магнітного потоку повітряного проміжку АД; $u_s = \sqrt{u_{sd_s}^2 + u_{sq_s}^2}$ – амплітудне значення фазної

напруги статора АД; Ψ_{ou_s} – початкова фаза зображального вектора фазної напруги статора АД; R_s , L_s – резистивний опір та індуктивність розсіяння обвитки статора Т-подібної заступної схеми асинхронного двигуна; R_{1r} , R_{2r} , L_{1r} , L_{2r} – зведені до статора резистивні опори та індуктивності розсіяння обвитки ротора двоконтурної Т-подібної заступної схеми асинхронного двигуна; ω_s – відносна колова частота напруги живлення статора АД; $R_m(\Psi_{\delta d}, \Psi_{\delta q})$ – нелінійний статичний магнітний опір головного магнітного кола АД.

На підставі балансу електромагнітного моменту АД та механічного моменту ВП за умови однакової частоти обертання спільного вала встановлено рівняння зв'язку між АД та ВП агрегату:

$$\omega_r \left((\Psi_{\delta d_s} i_{sq_s} - \Psi_{\delta q_s} i_{sd_s}) - \Delta M(\omega_r) \right) - \Delta P_r(i_r) - (H_{0d} Q_{\Sigma d} + H_{0q} Q_{\Sigma q}) S_{ВПн} / S_{АДн} = 0, \quad (22)$$

де $\Delta M(\omega_r)$ – момент, який враховує механічні втрати під час обертання ротора АД;

$\Delta P_r(i_r) = R_{1r} (i_{1rd_s}^2 + i_{1rq_s}^2) + R_{2r} (i_{2rd_s}^2 + i_{2rq_s}^2)$ – втрати активної потужності в роторі АД.

Крім того, для встановлення однозначного зв'язку між напругою та частотою напруги живлення статора агрегату блока необхідно використати функцію керування для асинхронного двигуна. У цьому випадку керування здійснюється за модифікованим законом М. Костенко [4, 7] у такому вигляді:

$$\sqrt{u_{sd_s}^2 + u_{sq_s}^2} = \omega_s \sqrt{\Psi_{\delta d_s} i_{sq_s} - \Psi_{\delta q_s} i_{sd_s}}, \quad (23)$$

Рівняння математичних моделей усіх інших об'єктів сформовані у відносних базових одиницях із використанням такої системи основних номінальних величин:

$$U_b = \sqrt{2/3} U_{\hat{A} i_{tr}}; \quad (24)$$

$$I_b = \sqrt{2/3} (S_{i_{tr}} / U_{\hat{A} i_{tr}}); \quad (25)$$

$$S_b = S_{i_{tr}}; \quad (26)$$

$$Z_b = U_b / I_b, \quad (27)$$

де S_{Htr} , U_{BHtr} – номінальна повна потужність і номінальне дієве значення лінійної напруги обвитки вищої напруги трансформатора. Усі величини та параметри зводяться до обвиток вищої напруги.

Регулювання частоти й напруги статора асинхронного двигуна здійснюється за допомогою ПЧН-перетворювача частоти й напруги [9]. Узагальнене рівняння моделі перетворювача частоти записано на підставі балансу його активної та реактивної потужностей:

$$(u_{sd_s} i_{Csds} + u_{sq_s} i_{Csqs}) S_{ADH} / S_b - (u_{agrds} i_{agrds} + u_{agrqs} i_{agrqs}) = 0; \quad (28)$$

$$(u_{sq_s} i_{Csds} - u_{sd_s} i_{Csqs}) S_{ADH} / S_b - (u_{agrqs} i_{agrds} - u_{agd_s} i_{agrqs}) = 0, \quad (29)$$

де u_{sd_s} , u_{sq_s} , i_{Csds} , i_{Csqs} – відповідно напруги статора АД та його струми з урахуванням струму поперечного компенсувального пристрою реактивної потужності, увімкненого до затискачів статора; u_{agrds} , u_{agrqs} , i_{Cagrds} , i_{Cagrqs} – відповідно напруги та струми на вході ПЧН з урахуванням струму поперечного компенсувального пристрою реактивної потужності, увімкненого до затискачів входу ПЧН агрегату АД–ВП.

Для зменшення втрат, спричинених споживанням АД агрегату реактивної потужності, застосовано поперечний компенсувальний пристрій (ПКП). Залежно від конкретних умов може бути доцільним застосування комбінації різних варіантів увімкнення ПКП. З метою досягнення універсальності математичної моделі, в ній передбачено всі можливі варіанти. У даному випадку застосовано статичні конденсатори. У зв'язку з незначними втратами активної потужності у конденсаторах, вони представлені лише у вигляді ємностей, які входять до складу рівнянь, записаних за першим законом Кірхгофа в ортогональних координатах:

$$i_{1d_s} + \omega_s C u_{q_s} - i_{2d_s} = 0; \quad (30)$$

$$i_{1q_s} - \omega_s C u_{d_s} - i_{2q_s} = 0, \quad (31)$$

де u_{d_s} , u_{q_s} – напруги на затискачах ПКП агрегату АД–ВП; i_{1d_s} , i_{1q_s} , i_{2d_s} , i_{2q_s} – відповідно струми на вході та на виході ПКП агрегату АД–ВП; ω_s – відносна колова частота напруги на затискачах ПКП агрегату АД–ВП; C – відносне значення ємності конденсатора ПКП агрегату АД–ВП.

У загальному випадку трансформатори розміщені згідно з рис. 1 та представлені Т-подібними заступними схемами, стан яких описується в ортогональних координатах такими рівняннями [5]:

$$k_T u_{hd_s} + R_{HH} i_{hd_s} / k_T - (\omega_s L_{HH} i_{hq_s} / k_T + \omega_s \Psi_{1Tq_s}) = 0; \quad (32)$$

$$k_T u_{hq_s} + R_{HH} i_{hq_s} / k_T + (\omega_s L_{HH} i_{hd_s} / k_T - \omega_s \Psi_{1Td_s}) = 0; \quad (33)$$

$$u_{bd_s} - R_{BH} i_{bd_s} + (\omega_s L_{BH} i_{bq_s} - \omega_s \Psi_{Tq_s}) = 0; \quad (34)$$

$$U_{bq_s} - r_{BH} I_{bq_s} - (\omega_s L_{BH} I_{bd_s} + \omega_s \Psi_{Td_s}) = 0; \quad (35)$$

$$i_{bd_s} - R_{MT} (\Psi_{1Td_s}, \Psi_{1Tq_s}) \Psi_{1Td_s} - \omega \Psi_{1Tq} / R_{CT} (\Psi_{1Td_s}, \Psi_{1Tq_s}) - i_{hd_s} / k_T = 0; \quad (36)$$

$$i_{Bq_s} - R_{mT}(\psi_{Td_s}, \psi_{Tq_s})\psi_{Tq_s} + \omega\psi_{Td_s}/R_{CT}(\psi_{Td_s}, \psi_{Tq_s}) - i_{Hq_s}/k_T = 0, \quad (37)$$

де для трансформатора агрегату АД–ВП: $u_{Bd_s}, u_{Bq_s}, u_{Hd_s}, u_{Hq_s}$ – напруги, відповідно, обвиток вищої та нижчої напруг; $i_{Bd_s}, i_{Bq_s}, i_{Hd_s}, i_{Hq_s}$ – струми, відповідно, обвиток вищої та нижчої напруг; ψ_{Td_s}, ψ_{Tq_s} – зведене до первинної обвитки робоче потокозчеплення; $R_{mT}(\psi_{Td_s}, \psi_{Tq_s})$ – нелінійний статичний магнітний опір фази магнітопроводу; $R_{BH}, L_{BH}, R_{HH}, L_{HH}$ – резистанси та індуктивності розсіяння відповідно обвиток вищої та нижчої напруг; $R_{CT}(\psi_{Td_s}, \psi_{Tq_s})$ – опір, у якому враховані втрати активної потужності в сталі магнітопроводу; ω – частота напруги первинної обвитки; k_T – фазний коефіцієнт трансформації.

Електроенергетична система (ЕЕС) описується рівняннями

$$U_{sys_m} = \sqrt{u_{sysd_s}^2 + u_{sysq_s}^2}; \quad (38)$$

$$u_{sysd_s} = U_{sys_m} \cos(\psi_{0_{U_{sys}}}), \quad (39)$$

де U_{sys_m} – амплітудне значення напруги ЕЕС; $\psi_{0_{U_{sys}}}$ – початкова фаза зображального вектора напруги ЕЕС.

Рівняння зв'язку між ЕЕС та трансформаторною підстанцією мають такий вигляд:

$$u_{sysd_s} + L_{sys}i_{sysq_s} - u_{subd_s} = 0; \quad (40)$$

$$u_{sysq_s} - L_{sys}i_{sysd_s} - u_{subq_s} = 0, \quad (41)$$

де u_{subd_s}, u_{subq_s} – значення напруги на шинах підстанції у d_s, q_s координатах; L_{sys} – еквівалентна індуктивність ЕЕС.

Нелінійний статичний магнітний опір головного магнітного кола асинхронного двигуна апроксимовано поліномом на підставі даних [6]:

$$R_{mi}(\psi_{\delta d_s}, \psi_{\delta q_s}) = I_{mi} \left(a_0 + a_2(\psi_{\delta d_s}^2 + \psi_{\delta q_s}^2) + a_4(\psi_{\delta d_s}^2 + \psi_{\delta q_s}^2)^2 \right), \quad (42)$$

де $a_0=0,82$; $a_2=0,148$; $a_4=0,044$; $I_{mi} = 1/(x_{\sigma s} + x_{ad})$.

Нелінійний статичний магнітний опір намагнічення трансформаторів апроксимовано поліномом, коефіцієнти якого визначені для еквівалентних синусоїд струму та потокозчеплення на підставі характеристики неробочого режиму, наведеної в [8] для миттєвих значень:

$$R_{m0}(\psi_{l0d}, \psi_{l0q}) = I_{m0} \left(b_0 + b_6(\psi_{l0d}^2 + \psi_{l0q}^2)^3 + b_{10}(\psi_{l0d}^2 + \psi_{l0q}^2)^5 \right), \quad (43)$$

де $b_0 = 0,527176$; $b_6 = 0,231535$; $b_{10} = 0,241290$; $I_{mT} = I_{HP\%}/100$.

Еквівалентне навантаження вузла описано статичними характеристиками у вигляді

$$P_{CT} = f(U); \quad Q_{CT} = \varphi(U), \quad (44)$$

Запропонований принцип формування математичної моделі, тестування одного з варіантів якої було здійснено на прикладі схеми, що на рис. 1, може бути застосований для аналізу усталених режимів систем довільного вузла навантаження з блочним відцентровим помповим агрегатом із асинхронним двигуном. Трансформатори, пристрої компенсації реактивної потужності, перетворювачі частоти й напруги показано в усіх можливих місцях встановлення. Адаптація наведеної математичної моделі для кожного конкретного випадку здійснюється шляхом зміни, вилучення чи доповнення відповідних рівнянь згідно з реальними складом обладнання та схемою сполучень. В'язкість і густина робочої рідини враховуються під час обчислення параметрів заступної схеми помпи [1, 2].

Для тестового розрахунку обрано узагальнений приклад вузла навантаження з блочним відцентровим помповим агрегатом із асинхронним електродвигуном (рис. 1). Агрегат АД–ВП здійснює забір робочої рідини з водосховища під природним статичним напором H_c (під час

розрахунків у даному прикладі ним знехтувано). Тестовий розрахунок ustalених режимів вузла навантаження електропостачальної системи, що показаний на рис.1, здійснювався шляхом зміни витрати $Q_{дΣ}$ у межах від $0,15Q_{дном}$ до $1,25Q_{дном}$ за умови підтримання номінального тиску робочої рідини гідравлічної мережі.

Для тестових розрахунків використано електроенергетичну систему з $U_{sys}=110$ кВ, $S_{kzsys}=1600$ МВ·А з трансформатором ТДН-16000/110, відцентрову помпу НМ 3600–230(в), асинхронний двигун 2АЗМП-2500/6000У4, трансформатор блока ТМ-4000/10. Величини ємностей компенсуючого пристрою АД вибирались під час розрахунку і були прийняті такими, щоб уникнути перекомпенсації споживаної реактивної потужності АД в усьому діапазоні розрахунків.

Оскільки створена математична модель дозволяє аналізувати взаємний вплив параметрів і координат режиму ЕПС, далі наводиться лише деякі окремі отримані результати.

На рис. 2 наведено функцію керування напругою та частотою статора АД у вигляді графічної залежності від витрати робочої рідини $Q_{д}$ за умови підтримання номінального тиску гідравлічної мережі. Результати розрахунків наведено у відносних одиницях, за базове значення витрати береться $Q_{дном}$ [7].

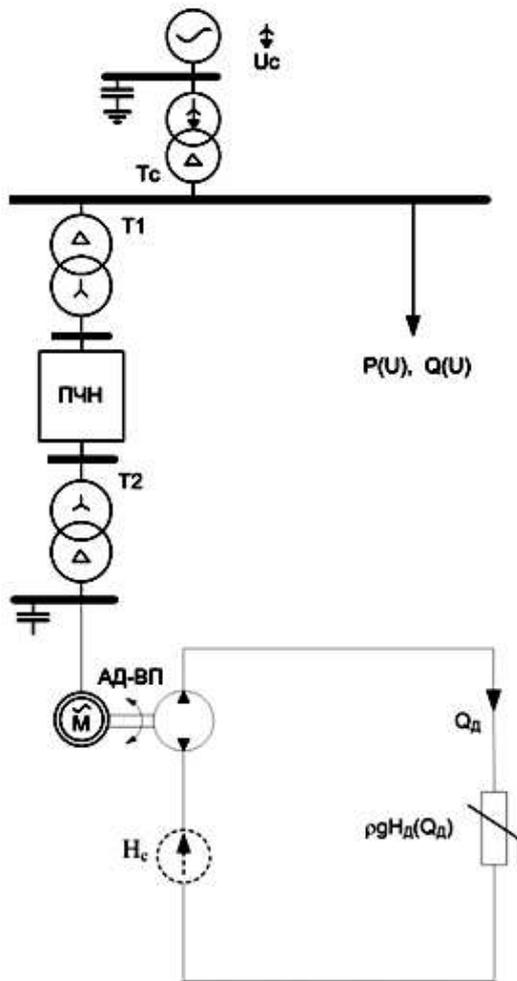


Рис. 1. Розрахункова схема електропостачальної системи помпової станції з блочним агрегатом

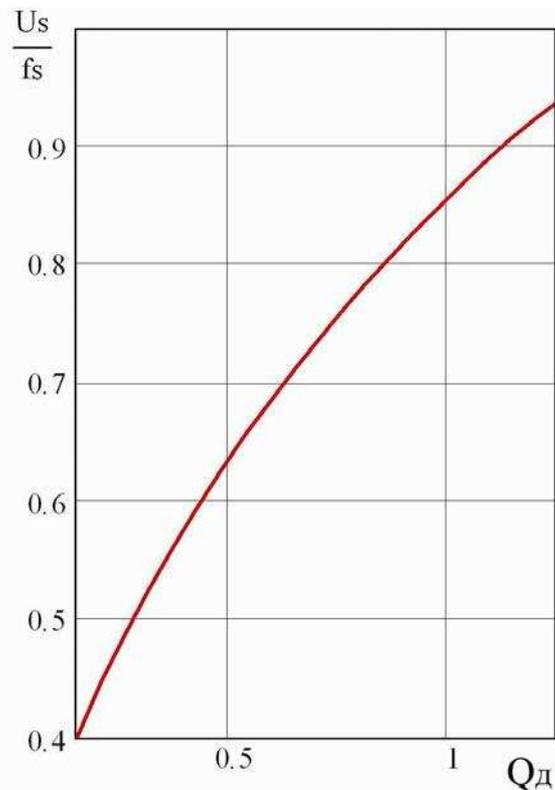


Рис. 2. Залежність U/f статора АД агрегату АД-ВП від витрати

Висновки. Створено математичну модель для аналізу ustalених режимів вузла навантаження ЕПС з блочним відцентровим помповим агрегатом із частотно керованим асинхронним двигуном і статичним навантаженням, яка дозволяє враховувати взаємний вплив останніх. Отримано

залежності напруги та частоти електродвигуна від продуктивності з метою формування функцій частотного керування автоматичної системи керування двигуном агрегату. Уперше запропоновано ефективний метод аналізу усталених режимів такого вузла навантаження ЕПС з урахуванням статичної напірної характеристики гідравлічної мережі та впливу статичного навантаження вузла, що дає можливість відстежувати взаємний вплив елементів агрегатів, що складаються з об'єктів різної природи (електромеханічної та гідравлічної) на підставі їхніх заступних схем і оперувати безпосередньо їхніми внутрішніми фізичними параметрами. Отримані результати, зокрема приклад наведеного тестового розрахунку, показали доцільність подальших досліджень із метою створення узагальненої математичної моделі аналізу перехідних процесів електропостачальних систем з урахуванням, зокрема, впливу статичної напірної характеристики гідравлічної мережі.

1. Костишин В.С. *Модельовання режимів роботи відцентрових насосів на основі електрогідравлічної аналогії*. – Івано–Франківськ: Факел, 2000. – 163 с. 2. Petro Gogolyuk, Vladyslav Lysiak, Volodymyr Kostyshyn. *Mathematical Modeling of Steady-State Modes of Induction Motor-Centrifugal Pump Combination with Pump Hydraulic Tracts Combined Connection / Proc. of the XIII International Symposium of Theoretical Electrical Engineering*. – Lviv, 2005. – P. 353–356. 3. Фильц Р.В. *Математические основы теории электромеханических преобразователей*. – К.: Наук. думка, 1979. – 208 с. 4. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. *Электрические машины*. Ч. 2. – Л.: Энергия, 1973. – 648 с. 5. *Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах / Под ред. Н.И. Соколова*. – М.: Энергия, 1970. – 400 с. 6. Сипайлов Г.А., Лоос А.В. *Математическое моделирование электрических машин*. – М.: Высш. шк., 1980, – 176 с. 7. Гоголюк П.Ф., Лисяк В.Г., Костишин В.С. *Метод розрахунку розподілу об'ємних витрат і напорів групи агрегатів – асинхронний двигун – відцентрова помпа // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 2006. – № 563: *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. – С. 27–34. 8. Шелепетень Т.М. *Обчислення інтегральних параметрів електромагнітних апаратів з допомогою цифрових моделей / Спец. вип. журн. “Технічна електродинаміка“ за мат. II Міжнар. наук.-техн. конф. “Математичне моделювання в електротехніці і електродинаміці”*. – К., 1998. – С. 169–172. 9. Плахтына Е.Г. *Математическое моделирование электромашиных вентильных систем*. – Львов: Вища шк., 1986. – 164 с.