

УДК 621.313.322-52

Канюк Геннадій Іванович, д-р техн. наук, проф., декан енергетичного факультету

Тел. +38-057-733-79-14, E-mail gennadiyy-kanjuk@rambler.ru (orcid.org/ORCID: 0000-0003-1399-9039)

Близначенко Олена Миколаївна, асистент, зав. лабораторією кафедри «Теплоенергетики та енергозбереження», Тел. (057) 733-78-39, (063) 214-79-77 E-mail: art-studio_diana_@ukr.net ORCID: (orcid.org/ORCID: 0000-0002-2774-5200)

Мезеря Андрій Юрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики

Тел.: (057)733-79-66 E-mail: mezzer@mail.ru ORCID: (orcid.org/ORCID: 0000-0003-2946-9593)

Мельников В'ячеслав Євгенович, аспірант кафедри «Теплоенергетики та енергозбереження»

Тел. (057) 733-78-03, (050) 403-93-67 E-mail: bologo@list.ru ORCID: (orcid.org/ORCID: 0000-0001-6427-6805)

Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків, Україна. Вул. Університетська 16, м. Харків, Україна, 61003

Бабенко Ігор Анатолійович, директор Зміївської теплової електричної станції Публічного акціонерного товариства «Центрэнерго», Харківська обл., Зміївський р-н, смт. Комсомольське, Балаклійське шосе, 2. Україна, 63460, Тел. 0504021367, E-mail: director@zmtes.kh.energy.gov.ua ORCID: (<http://orcid.org/0000-0001-6640-070X>)

ПРЕЦИЗИЙНІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВОК

Статтю присвячено дослідженню та розробці науково-технічних і нормативних методів і засобів поліпшення показників якості електроенергії, що виробляється турбогенераторними установками електростанцій і доведення їх до рівня діючих міжнародних стандартів. В роботі розглянуті питання розробки і впровадження нових ефективних технічних рішень, що суттєво зменшують всі види статичних і динамічних похибок і, тим самим, підвищують точність регулювання і якість виробляємої електроенергії. До таких методів і рішень відносяться, зокрема, методи структурно-параметричного синтезу регуляторів частоти та потужності турбогенераторних установок на основі зворотних задач динаміки.

Ключові слова: турбогенераторні установки, парові і гідравлічні турбіни, показники якості електроенергії, точність регулювання, синтез прецизійних регуляторів, наукова і нормативна база.

Канюк Геннадий Иванович, д-р техн. наук, проф., декан энергетического факультета

Тел. + 38-057-733-79-14, E-mail gennadiyy-kanjuk@rambler.ru (orcid.org/ORCID: 0000-0003-1399-9039)

Близначенко Елена Николаевна, ассистент, зав. лабораторией кафедры «Теплоэнергетики и энергосбережения», Тел. (057) 733-78-39, (063) 214-79-77 E-mail: art-studio_diana_@ukr.net ORCID (orcid.org/ORCID: 0000-0002-2774-5200)

Мезеря Андрей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики

Тел. : (057) 733-79-66 E-mail: mezzer@mail.ru ORCID (orcid.org/ORCID: 0000-0003-2946-9593)

Мельников Вячеслав Евгеньевич, аспирант кафедры «Теплоэнергетики и энергосбережения»

Тел. (057) 733-78-03, (050) 403-93-67 E-mail: bologo@list.ru ORCID (orcid.org/ORCID: 0000-0001-6427-6805)

Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков, Украина. Ул. Университетская 16, г. Харьков, Украина, 61003

Бабенко Игорь Анатольевич, директор Змиевской тепловой электрической станции публичного акционерного общества «Центрэнерго», Харьковская обл., Змиевской р-н, пгт. Комсомольское, Балаклеинское шоссе, 2 Украина, 63460, Тел. 0504021367 E-mail: director@zmtes.kh.energy.gov.ua ORCID (<http://orcid.org/0000-0001-6640-070X>)

ПРЕЦИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК

Статья посвящена исследованию и разработке научно-технических и нормативных методов и средств улучшения показателей качества вырабатываемой турбогенераторными установками электростанций и доведение их до уровня действующих международных стандартов. В работе рассмотрены вопросы разработки и внедрения новых эффективных технических решений, существенно уменьшают все виды статических и динамических погрешностей и, тем самым, повышают точность регулирования и качество производимой электроэнергии. К таким методам и решениям относятся, в частности, методы структурно-параметрического синтеза регуляторов частоты и мощности турбогенераторных установок на основе обратных задач динамики.

Ключевые слова: турбогенераторные установки, паровые и гидравлические турбины, показатели качества электроэнергии, точность регулирования, синтез прецизионных регуляторов, научная и нормативная база.

Gennady Kaniuk, Ph. D., Professor, Dean of the Faculty of Energy

Tel.: (057) 733-79-14, E-mail gennadiyy-kanjuk@rambler.ru (orcid.org/ORCID: 0000-0003-1399-9039)

Elena Blyznychenko, Assistant Head. Laboratory of the department "Power engineering and energy saving"
Tel. (057) 733-78-39 (063) 214-79-77 E-mail: art-studio_diana@ukr.net ORCID (orcid.org/ORCID: 0000-0002-2774-5200)

Andrey Mezerya, Ph.D., Associate Professor, Department of electricity
E-mail: mezzer@mail.ru ORCID (orcid.org/ORCID: 0000-0003-2946-9593)

Vyacheslav Melnikov, graduate student, Department of power engineering and energy saving. Contact tel.: +38(050) 403-93-67, E-mail: bologo@list.ru

Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, Str. University, 16, Kharkov, Ukraine, 61003

Igor Babenko, Director Zmiyiv thermal power stations of JSC "Centrenerg", Kharkov region, Zmiyivskiy district, town. Komsomolsk, Balakliysky highway, 2, Ukraine, 63460, Contact tel.: 0504021367 E-mail: director@zmtes.kh.energy.gov.ua ORCID: (<http://orcid.org/0000-0001-6640-070X>)

PRECISION AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS TURBOGENERATORS

The article is devoted research and working out of scientific and technical and standard methods and means of improvement of indicators of quality developed turbogenerators by installations of power stations and their finishing to level of operating international standards. In work questions of working out and introduction of new effective technical decisions are considered, essentially reduce all kinds of static and dynamic errors and, thereby, raise accuracy of regulation and quality of the made electric power. Methods of structurally-parametrical synthesis of regulators of frequency and capacity concern such methods and decisions turbogenerators installations on the basis of return problems of dynamics, in particular.

Keywords: *turbogenerators installations, steam and hydraulic turbines, indicators of quality of the electric power, accuracy of regulation, synthesis of precision regulators, scientific and standard base.*

Актуальність теми

Електрична енергія, що виробляється тепловими, атомними та гідравлічними електростанціями, характеризується рядом показників якості (ПЯЕ), які жорстко регламентуються вітчизняними та зарубіжними стандартами. Відхилення фактичних показників якості від регламентованих значень призводить до додаткових втрат електроенергії, зниження надійності і терміну служби електроустаткування, а також до зниження ефективності або навіть прямого порушення технологічних процесів споживачів.

Одним з найважливіших ПЯЕ є стабільність частоти електричного струму в електричній мережі. Цей показник забезпечується ефективністю роботи систем автоматичного регулювання частоти і потужності (САР Ч і П) турбогенераторних установок, а саме – показниками їх статичної та динамічної точності, які повинні забезпечувати мінімальне відхилення частоти обертання роторів турбогенераторів від заданих режимних значень. Вимоги вітчизняних державних стандартів дозволяють максимальні допустимі відхилення частоти для САР Ч і П, оснащених гідравлічними і електрогідравлічними регуляторами, відповідно 0,3 і 0,1 %, тоді як за вимогами зарубіжних стандартів, що визначають якість електроенергії та її конкурентоспроможність на зовнішніх (у т. ч. – європейських) ринках, цей показник повинен становити не більше 0,06 %. Останнім часом на ряді енергоблоків українських електростанцій використовуються електрогідравлічні САР Ч і П, розроблені АТ «Турбоатом» і АТ «Моноліт» (м. Харків). Такі системи мають значні резерви підвищення показників якості регулювання і дозволили наблизити деякі з них до рівня міжнародних стандартів. Разом з тим, в нинішній час ці резерви використовуються не повністю. Це пов'язано, з одного боку, з використанням недостатньо ефективних алгоритмів керування виконавчими механізмами САР Ч і П (використовуються, в основному, типові промислові ПІД – регулятори), з іншого боку – нераціональними схемними і конструктивними рішеннями самих виконавчих механізмів (загальна система живлення, низькі питомі енергетичні характеристики, значні габарити, велика кількість додаткових передавальних механізмів). Вирішення цієї проблеми ускладнюється відсутністю системної науково-технічної та нормативної бази для створення прецизійних САР Ч і П турбогенераторних установок. Відповідно, розробка і наукове обґрунтування цих питань становить важливу та актуальну науково-технічну задачу [1, 2, 3].

Мета і завдання досліджень

Мета роботи – підвищення якості (у т. ч. – стабільності частоти) електроенергії, шляхом удосконалення наукових і нормативних методів і засобів, що забезпечують високі

показники статичної та динамічної точності систем автоматичного регулювання турбогенераторних установок.

Повна уточнена математична модель САР Ч і П

Для вирішення завдань підвищення точності регулювання частоти та потужності турбогенераторних установок шляхом синтезу прецизійних регуляторів розроблено уточнені, порівняно з існуючими, математичні моделі електрогідравлічних виконавчих механізмів САР Ч і П, робота яких суттєво впливає на якість регулювання [4–5].

Принципову схему електрогідравлічного виконавчого механізму з мікропроцесорною системою керування, що забезпечує необхідне (відповідно з завданням регулювання) переміщення стопорно-регулюючих клапанів парової турбіни, наведено на рис. 1.

При відхиленні параметрів регулювання (частоти або потужності) від заданих значень мікропроцесорний регулятор (МР) формує керуючий сигнал, який подається на вхід електрогідравлічного перетворювача (ЕГП). Зміщення заслонки ЕГП викликає відповідне зміщення плунжера відсічного золотника (ВЗ) і поршня гідравлічного сервомотора (СМ), який передає керуюче зусилля через кулачковий передавальний механізм (ПМ) на стопорно-регулюючі клапани (СРК) парової турбіни (ПТ), забезпечуючи потрібну зміну частоти обертання електрогенератора (ЕГ).

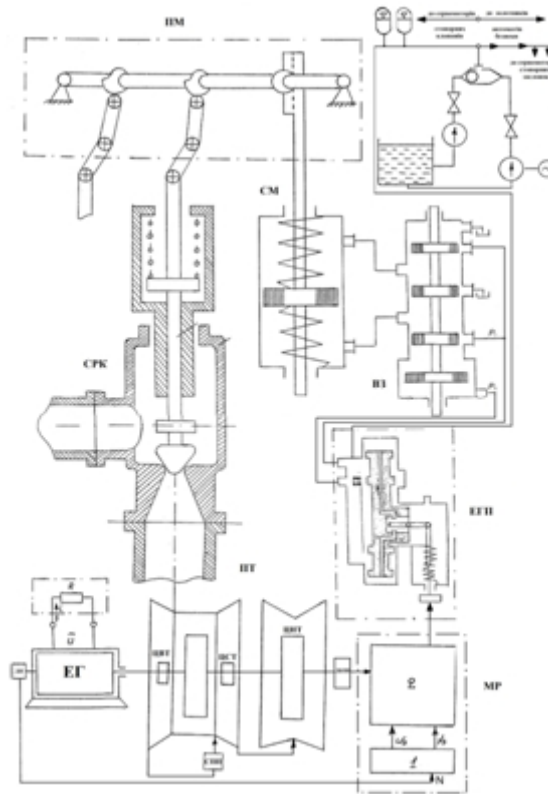


Рис. 1. Загальна принципова схема

Повна уточнена математична модель САР Ч і П представлена наступними рівняннями:
– диференційні рівняння обертового руху роторів електрогенератора і парової турбіни

$$J_z^{np} \dot{\omega}_z + M_{cm}^z \text{sign} \{ \omega_z \} + k_{жст}^z \omega_z = C_{св} (\varphi_z - \varphi_T), \tag{1}$$

$$J_T^{np} \dot{\omega}_T + M_{cm}^T \text{sign} \{ \omega_T \} + k_{жст}^T \omega_T + C_{св} (\varphi_z - \varphi_T) = K_p^\varphi P_n + K_G^\varphi G_n^2; \tag{2}$$

– диференційне рівняння руху електромеханічних елементів ЕГП

$$T_{эгп}^2 \ddot{X}_3 + 2\xi_{эгп} T_{эгп} \dot{X}_3 + X_3 = K_i^x i_y; \tag{3}$$

– диференційне рівняння витрат робочої рідини у гідравлічних каналах ЕГП

$$\frac{V_{\text{ээн}}^{np}}{\chi} \dot{P}_y + S_{o3} \dot{X}_{o3} = \mu_3 S_3 (X_3) \sqrt{\frac{2(P_o - P_y)}{\rho}} - \mu_{cl} S_{cl} \sqrt{\frac{2(P_y - P_{cl})}{\rho}}; \quad (4)$$

– диференційне рівняння руху відсічного золотника

$$m_{o3}^{np} \ddot{X}_{o3} + K_{жст}^{o3} \dot{X}_{o3} + F_{cm}^{o3} \text{sign} \{ \dot{X}_{o3} \} = P_{\bar{o}} (S_y - S_{\bar{o}}) + P_{\bar{o}} S_{\bar{o}} - P_y S_y - F_{cm}^{o3}; \quad (5)$$

– диференційні рівняння витрат робочої рідини у гідравлічних каналах відсічного золотника

$$\frac{V_{\bar{o}}}{\chi} \dot{P}_{\bar{o}} \text{sign} \{ \dot{X}_{o3} \} = \mu_{o3} S_{o3} (X_{o3}) \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_{\bar{o}} \text{sign} \{ X_{o3} \})} - Q_{\text{зц}}^n; \quad (6)$$

$$\frac{V_{\bar{z}}}{\chi} \dot{P}_{\bar{z}} \text{sign} \{ X_{o3} \} = Q_{\text{зц}}^{um} - \mu_{o3} S_{o3} (X_{o3}) \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_2 \text{sign} \{ X_{o3} \} - P_{\bar{z}})}; \quad (7)$$

$$\frac{V_{\bar{o}}}{\chi} \dot{P}_{\bar{o}} = Q_{\bar{o}} - \mu_{o3} S_{o3}^{\max} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_o - P_{cl})}; \quad (8)$$

$$\frac{V_{\bar{o}}}{\chi} \dot{P}_{\bar{o}} = \begin{cases} 0 & \text{при } X_{o3} > 0 \\ \mu_{o3} S_{o3} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_o - P_{\bar{o}})} & \text{при } X_{o3} < 0 \end{cases}; \quad P_1 = \begin{cases} P_n & \text{при } X_{o3} > 0 \\ -P_{cl} & \text{при } X_{o3} < 0 \end{cases}; \quad (9)$$

$$Q_{\bar{o}} = \begin{cases} \mu_{o3} S_{o3} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_o - P_{\bar{o}})} & \text{при } X_{o3} > 0 \\ 0 & \text{при } X_{o3} < 0 \end{cases}; \quad P_1 = \begin{cases} P_{cl} & \text{при } X_{o3} > 0 \\ -P_n & \text{при } X_{o3} < 0 \end{cases}; \quad (10)$$

– диференційні рівняння витрат робочої рідини у робочих порожнинах гідравлічного сервомотору

$$\dot{V}_n + \frac{V_n}{\chi} \dot{P}_{\text{зц}}^n + k_{ym}^n (P_{\text{зц}}^n - P_{cl}) + k_{nep} (P_{\text{зц}}^n - P_{\text{зц}}^{um}) = Q_{\text{зц}}^n; \quad (11)$$

$$\dot{V}_{um} + \frac{V_{um}}{\chi} \dot{P}_{\text{зц}}^{um} - k_{ym}^{um} (P_{\text{зц}}^{um} - P_{cl}) + k_{nep} (P_{\text{зц}}^n - P_{\text{зц}}^{um}) = Q_{\text{зц}}^{um}; \quad (12)$$

$$\dot{V}_n = S_{\text{зц}}^n (\dot{X}_{\text{зц}} + \dot{X}_\kappa); \quad \dot{V}_{um} = S_{\text{зц}}^{um} (\dot{X}_{\text{зц}} + \dot{X}_\kappa); \quad X_\kappa = \frac{S_{\text{зц}}^n}{C_{on}^n} P_{\text{зц}}^n - \frac{S_{\text{зц}}^{um}}{C_{on}^{um}} P_{\text{зц}}^{um}; \quad (13)$$

– диференційні рівняння руху робочої рідини у каналах підводу до сервомотору

$$\rho \frac{l_{kn}}{S_{kn}} \dot{Q}_{\text{зц}}^n + \rho \left(\lambda_{kn} \frac{l_{kn}}{d_{kn}} + \xi_{kn} \right) = P_{\bar{o}} - P_{\text{зц}}^n; \quad (14)$$

$$\rho \frac{l_{ku}}{S_{ku}} \dot{Q}_{\text{зц}}^{um} + \rho \left(\lambda_{ku} \frac{l_{ku}}{d_{ku}} + \xi_{ku} \right) = P_{\text{зц}}^{um} - P_{\bar{z}}; \quad (15)$$

– диференційні рівняння руху поршня сервомотору

$$m_{np}^n \ddot{X}_{\text{зц}} + k_{жст}^{\text{зц}} \dot{X}_{\text{зц}} + F_{cm}^{\text{зц}} \text{sign} \{ \dot{X}_{\text{зц}} \} + C_n^{np} X_{\text{зц}} + F_{on} = P_{\text{зц}}^n S_{\text{зц}}^n - P_{\text{зц}}^{um} S_{\text{зц}}^{um}; \quad (16)$$

– рівняння формування керуючого сигналу у регуляторі

$$i_y = K_1 (i_{\text{зц}}^3 - i_{\text{зц}}) - K_2 i_{o3}; \quad i_{\text{зц}}^3 = K_{xi} X_{\text{зц}}^3; \quad i_{\text{зц}} = K_{xi} X_{\text{зц}}; \quad i_{o3} = K_{xi}^{o3} X_{o3}; \quad (17)$$

У рівняннях (1) – (17), що складають у сукупності повну математичну модель САР Ч і П парової турбіни, використано наступні позначення: $J_z, J_T, m_{oz}^{np}, m_n^{np}$ – приведені до відповідних органів моменти енергії і маси рухомих частин електрогенератора, турбіни, відсічного золотника і поршня сервомотору, $кг \cdot м^2, кг$; $\varphi_z, \varphi_T, \omega_z, \omega_T$ – кути повороту і кутові швидкості роторів генератора і турбіни, $рад, рад / с$; $M_{cm}^z, M_{cm}^T, F_{cm}^{oz}, F_{cm}^{zq}$ – моменти і сили сухого тертя у опорах генератора, турбіни, відсічного золотника і сервомотору; P_n, G_n – тиск і витрата пари на вході в турбіну, $Па, кг / с$; $C_{св}, C_n^{np}, C_{он}^n, C_{он}^{um}$ – значення крутильної та лінійних пружних податливостей зв'язку роторів генератора і турбіни, поршня сервомотору і його опор з боків поршневої і штокової порожнин, $Нм / рад, Н / м$; $K_{жст}^z, K_{жст}^T, K_{жст}^{oz}, K_{жст}^{zq}$ – коефіцієнти рідинного тертя у опорах генератора, турбіни, відсічного золотника і сервомотору, $Нм \cdot с / рад, Н \cdot с / м$; $T_{зеп}, c, \xi_{зеп}$ – постійна часу і коефіцієнт відносного демпфіювання електрогідравлічного перетворювача; $i_y, i_{zq}^3, i_{zq}, i_{oz}$ – значення струмів електричних керуючих сигналів, відповідно, на вході в ЕГП, задавач регулятора частоти, давачів положення сервомотору і відсічного золотника, $А$; $A, X_z, X_{oz}, X_{zq}, X_k$ – зміщення золотника ЕГП, відсічного золотника, поршня і корпуса сервомотора, $м$; $P_y, P_0, P_{сл}, P_1, P_2, P_\delta, P_\epsilon, P_z, P_\delta, P_{zq}^n, P_{zq}^{um}$ – значення тисків робочої рідини, відповідно, на виході і вході ЕГП, у зливній порожнині, у відповідних порожнинах відсічного золотника і сервомотора, $Па$; $V_{зеп}, V_n, V_{um}$ – об'єми порожнин ЕГП, поршневої і штокової порожнин сервомотору, $м^3$; $S_z, S_{oz}, S_{сл}, S_\delta, S_\delta, S_{zq}^n, S_{zq}^{um}$ – ефективні робочі площини золотника ЕГП, і відсічного золотника, зливної порожнини, поршневої і штокової порожнини сервомотору, $м^2$; ρ, χ – густина і модуль об'ємної пружності робочої рідини, $кг \cdot м^3, Па$; $F_{z\delta}^{oz}, F_{он}$ – гідродинамічна сила, що діє на плунжер відсічного золотника і постійна складова сил, що діють на поршень сервомотора, $Н$; Q_{zq}^n, Q_{zq}^{um} – витрати робочої рідини через поршневу і штокову порожнини сервомотора і відповідні порожнини відсічного золотника, $м^3 / с$; $l_{кп}, d_{кп}, S_{кп}, l_{кш}, d_{кш}, S_{кш}$ – довжини, діаметри і площини перерізу каналів підводу робочої рідини до порожнин сервомотора, $М, М^2$; $\lambda_{кп}, \lambda_{кш}, \xi_{кп}, \xi_{кш}$ – коефіцієнти гідравлічного тертя і місцевого опору відповідних каналів; інші позначення є постійними коефіцієнтами, що визначаються конструктивними особливостями елементів.

З метою перевірки достовірності та ідентифікації параметрів розробленої математичної моделі виконано ряд натурних експериментальних досліджень характеристик турбогенераторних установок на діючих електростанціях України. Деякі результати досліджень наведено на рис. 2–4.

В результаті досліджень встановлено, що розроблена модель САР Ч і П є достовірною, враховує всі основні фактори, що впливають на точність регулювання частоти та потужності, і може бути ефективно використана для аналізу всіх видів статичних і динамічних похибок регулювання, виявлення їх причин і розробки наукових і нормативних методів компенсації і зменшення цих похибок з метою підвищення показників якості електроенергії. На основі розробленої математичної моделі виконано аналіз видів і причин основних похибок регулювання частоти та потужності турбогенераторних установок і сформульовано перелік науково-технічних рішень, спрямованих на підвищення точності регулювання до рівня діючих міжнародних стандартів. Означений аналіз виконано на основі спрощених лінеаризованих моделей САР Ч і П, побудованих на основі циклу обчислювальних експериментів, які проводились з метою уточнення окремих параметрів моделей і забезпечення їх відповідності реальним характеристикам системи, визначеними за даними

натурних випробувань.[6-7]

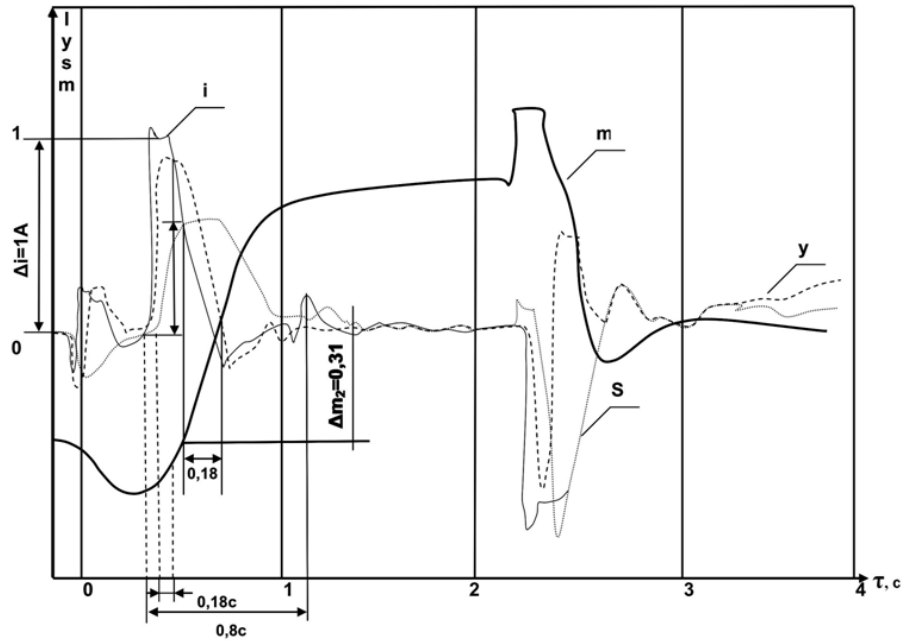


Рис. 2. Перехідні процеси в ЕГСР

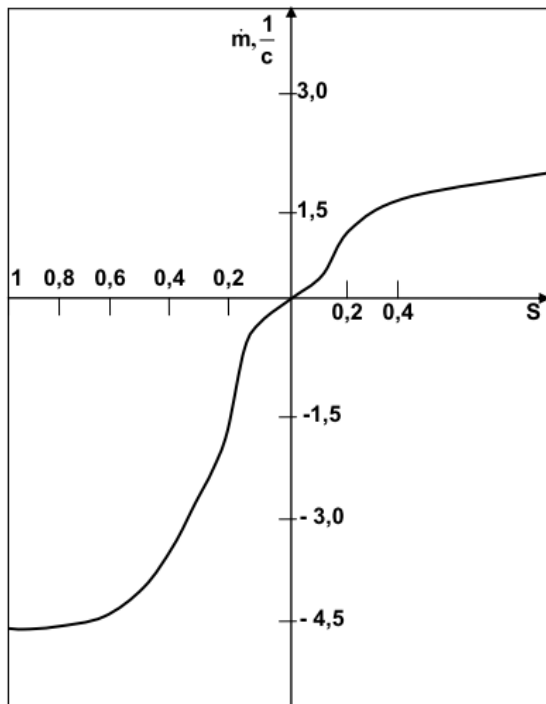
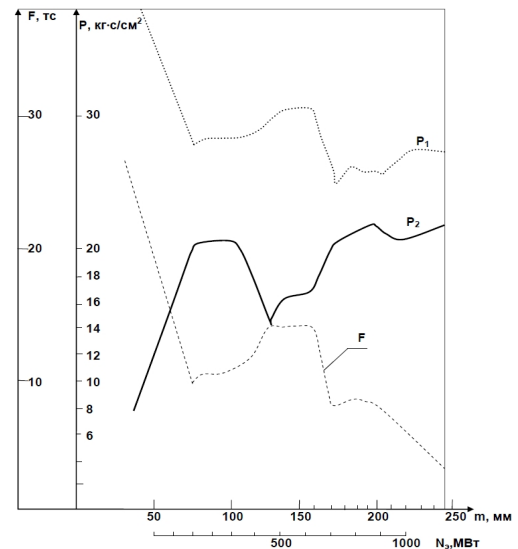


Рис. 3. Швидкісна характеристика сервомотору



P_1 і P_2 – значення тисків у порожнинах сервомотору; F - навантаження на поршні сервомотору

Рис. 4. Приблизний характер загрузок на поршні сервомотора

Розроблену класифікацію основних видів статичних і динамічних похибок в системі регулювання частоти та потужності турбогенераторних установок наведено на рис. 5.

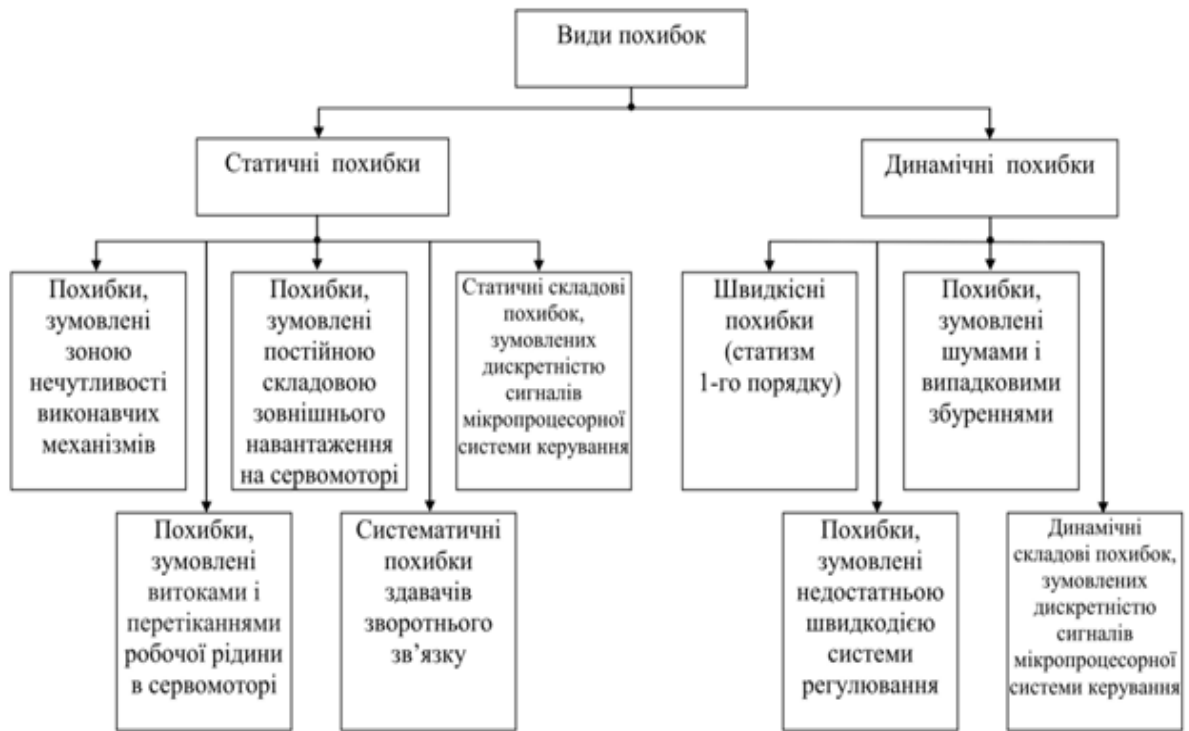


Рис. 5. Класифікація похибок САР Ч і П турбогенераторних установок

Аналіз результатів оціночних розрахунків показав, що постійна часу ЕГП ($T_{\text{эмп}}$) і механічна постійна часу сервомотору ($T_{\text{зцп}}^{\Sigma}$ і $T_{\text{зцп}}^{\text{ум}\Sigma}$) значно менші, ніж постійна часу відсічного золотника ($T_{\text{оз}}$) і гідравлічна постійна часу сервомотора ($T_{\text{зц}}$). З урахуванням цих факторів, лінеаризована математична модель другого рівня може бути представлена у вигляді

$$\begin{cases} T_3^2 \ddot{X}_{\text{оз}} + 2\xi_3 T_3 \dot{X}_{\text{оз}} + X_{\text{оз}} = K_{\text{хоз}}^i i \\ T_{\text{зц}}^x \dot{X}_{\text{зц}} + X_{\text{зц}} = K_x X_{\text{оз}} - F_{\text{зц}}^o / k_F^x \end{cases} \quad (18)$$

У якості базового об'єкту для досліджень прийнято САР Ч і П парової турбіни К-1000-60/1500-2, що експлуатується на Запорізькій та Південно-Українській АЕС України. При цьому чисельні значення параметрів САР Ч і П (19) для такої системи складають

$$T_3 = T_{\text{эмп}} = 4,8 \cdot 10^{-2} \text{ с}; K_{\text{хоз}}^i = 1,05 \cdot 10^{-3} \text{ м / А}; K_x = 4572,5;$$

$$\xi_3 = \xi_{\text{эмп}} = 1; T_{\text{гц}}^x = 103,25 \text{ с}; F_{\text{гц}}^o / k_F^x = 0.25; K_i^{\text{max}} = 6,58 \cdot 10^4.$$

Результати ідентифікації параметрів моделі (18), що виконувалась шляхом порівняння результатів обчислювальних експериментів з натурними, наведено на рис.6.

Структурні схеми електрогідравлічного контуру керування положенням регулюючого клапану турбіни, що відповідають математичній моделі (18), наведено на рис.7.

Передавальні функції цього контуру (головна і по збурюючій дії) визначаються за формулами:

$$W_p(S) = \frac{b_0}{a_3 S^3 + a_2 S^2 + a_1 S + a_0}, \quad (19)$$

$$W(S) = \frac{X_{zu}(S)}{X_{zu}^3(S)} = \frac{b_0}{a_3 S^3 + a_2 S^2 + a_1 S + (a_0 + b_0)}, \quad (20)$$

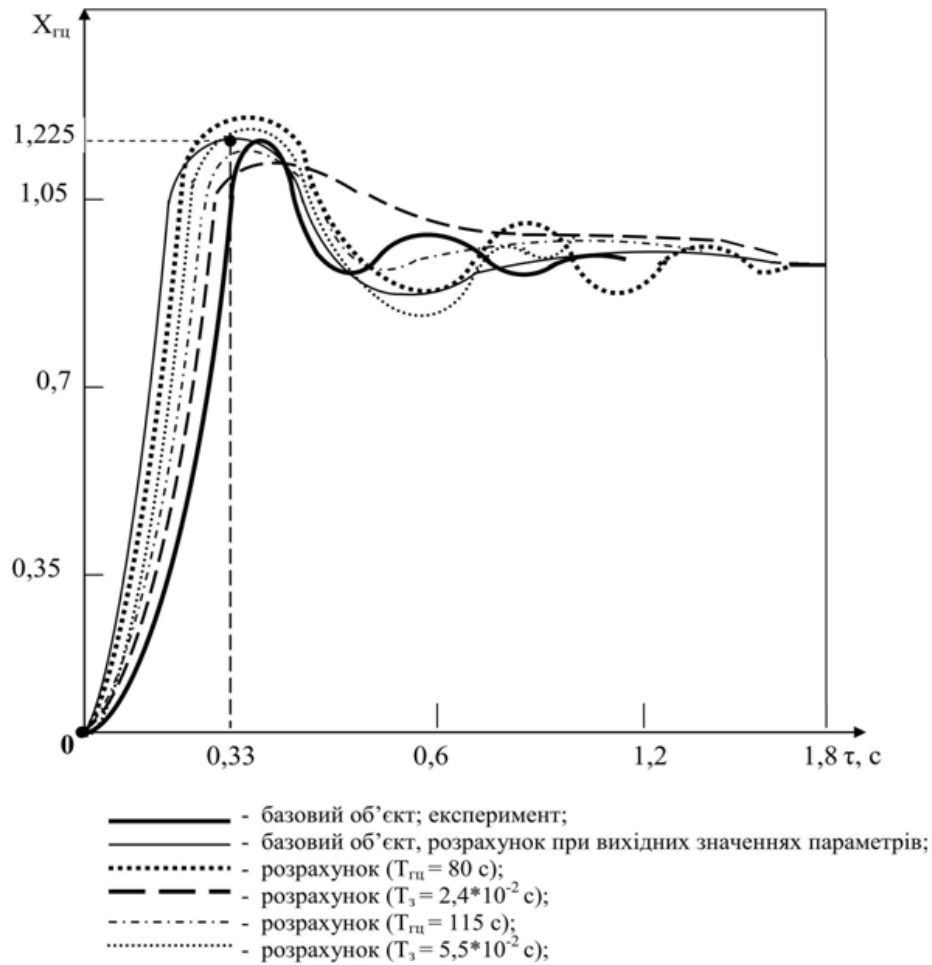


Рис. 6. Результати ідентифікації математичної моделі САР Ч і П

$$b_0 = K_{xi} K_1 K_2 K_{xoz}^i,$$

$$a_0 = 1 + K_{xi}^{oz} K_2 K_{xoz}^i,$$

$$a_1 = (1 + K_{xi}^{oz} K_2 K_{xoz}^i) T_{zu}^x + 2\xi_3 T_3,$$

$$a_2 = 2\xi_3 T_3 T_{zu}^x + T_3^2,$$

$$a_3 = T_3^2 T_{zu}^x,$$

Умова стійкості замкнутої системи (19) має вигляд:

$$a_2 a_1 > a_3 (a_0 + b_0).$$

Максимальне значення коефіцієнта підсилення головного зворотного зв'язку, що відповідає умовам стійкості (29)

$$K_1^{таx} = \frac{(2\xi_3 T_3 T_{гц}^x + T_3^2)(T_{гц}^x + T_{гц}^x K_{xi}^{oz} K_2 K_{xoz}^i + 2\xi_3 T_3) - T_3^2 T_{гц}^x (1 + K_{xi}^{oz} K_2 K_{xoz}^i)}{K_{xi} K_2 K_{xoz}^i}. \quad (21)$$

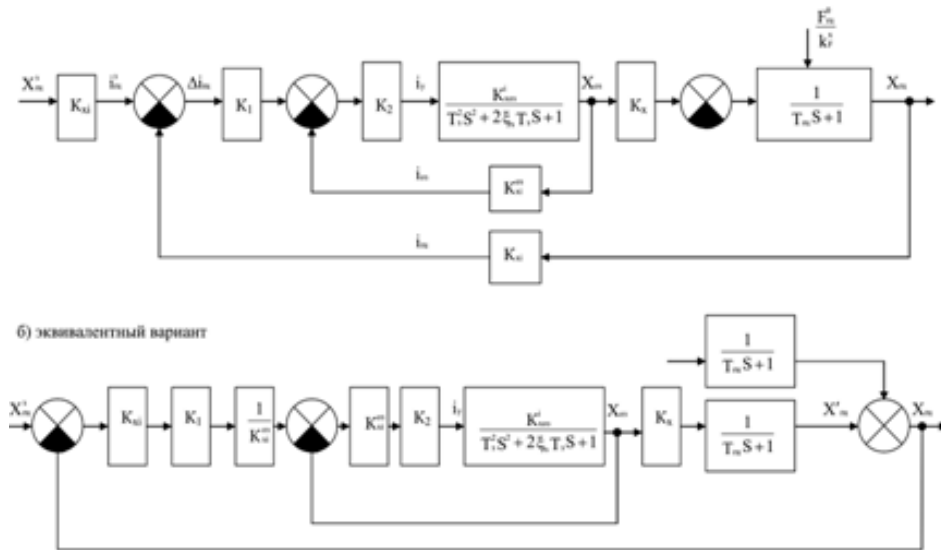


Рис. 7. Структурна схема симетричного виконавчого механізму САР Ч і П з урахуванням перетоків в сервомоторі

Вирази (20) і (21) дозволяють оцінити максимальні похибки регулювання, обумовлені статизмом гідравлічного контуру (перетікання робочої рідини в сервомоторі) і збурюючою дією (постійною складовою навантаження на сервомоторі).

За відсутності збурюючої дії ($F_{гц}^0 = 0$) відносна статична похибка замкнутої системи, що обумовлена перетіканнями у сервомоторі (при об'ємному ККД сервомотора 99 %)

$$\sigma_{ст}^{пер} = [1 - (\frac{x_{мц}}{x_{зц}})ст] = [1 - W(o)] = 1 - \frac{b_o}{a_o + b_o} = 9.8 \times 10^{-4} \text{ (0,098 \%)}$$

Абсолютна похибка, що обумовлена перетіканнями:

$$\Delta x_{зц} = \sigma_{ст}^{пер} x_{зц}^{max} = 1,96 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Абсолютна похибка, що обумовлена збурюючою дією (постійної складової навантаження) при $x_{гц}^3 = 0$ і $F_{гц}^0 / k_F^x = 0,25$:

$$\Delta X_{зц} = Wf(o) \times \frac{F_{зц}^0}{k_F^x} = \frac{b_0}{a_0 + b_0} \times \frac{F_{зц}^0}{k_F^x} = 2,5 \times 10^{-4} \text{ м.}$$

Відносна (віднесена до максимального робочого ходу сервомотора $X_{зц}^{max} = 0,2 \text{ м}$) похибка, що обумовлена впливом постійної складової навантаження,

$$\sigma_{ст}^F = \frac{\Delta X_{зц}}{X_{зц}^{max}} = 0,00125 \text{ (0,125 \%)}.$$

Таким чином, перетікання в сервомоторі і постійна складова навантаження можуть надавати помітний вплив на точність позиціонування регулюючого клапана (при регламентованих значеннях нечутливості гідравлічної і електрогідравлічної систем відповідно 0,3 і 0,06 % допустимі похибки позиціонування сервомотора при прийнятому значенні максимального робочого ходу $X_{зц}^{max} = 0,2 \text{ м}$ складають $6 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ і $1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$).

З метою виключення негативного впливу дискретизації керуючих сигналів у мікропроцесорних регуляторах на точність регулювання, виконано детальний якісний і кількісний аналіз цього впливу, і на основі цього аналізу отримано універсальне співвідношення для визначення максимально допустимих періодів квантування $[\Delta \tau]$ (з

урахуванням квантування сигналів як за часом, так і за рівнем) [8–9].

$$[\Delta\tau] = \min\{[\Delta\tau]_{ст}; [\Delta\tau]_{дин}\} = \min\left\{\frac{1}{\omega} \arcsin \frac{[\delta]}{A}, \frac{0,3}{\omega N}\right\}, \quad (22)$$

де A – амплітуда характерного еквівалентного гармонійного керуючого сигналу;

ω – частота характерного еквівалентного гармонійного керуючого сигналу;

N – динамічний порядок математичної моделі відносної об'єкта керування;

$[\delta]$ – допустиме значення відносної похибки відтворення заданого сигналу.

Науково-технічні рішення, спрямовані для підвищення точності регулювання частоти та потужності і забезпечення на цій основі відповідних показників якості електроенергії, що відповідають сучасним діючим міжнародним стандартам

1. З метою зменшення статичних похибок, зумовлених витоками і перетоками робочої рідини в сервомоторі і постійною складовою зовнішнього навантаження на сервомотор, а також динамічних похибок, зумовлених статизмом і недостатньою швидкодією системи регулювання, запропоновано запатентовану структуру астатичного швидкодіючого регулятора, побудованого на принципах зворотніх задач динаміки об'єкта керування. Такий регулятор здатен повністю компенсувати означені вище статичні похибки, а динамічні похибки зменшити у 2–3 рази.

2. З метою зменшення статичних похибок, зумовлених зоною нечутливості виконавчих механізмів, запропоновано запатентовану структуру регулятора, яка забезпечує змінне значення сумарного коефіцієнту підсилення основного контуру регулювання. При цьому в діапазоні малих значень керуючого сигналу забезпечується максимальний коефіцієнт підсилення, що забезпечує вихід із зони нечутливості, потім, з метою збереження необхідних запасів стійкості системи, витримується визначений часовий діапазон нульового значення коефіцієнта підсилення, і далі забезпечується перехід до номінальних значень параметрів. Запропонований засіб зменшує статичні похибки, зумовлені нечутливістю механічних елементів, мінімум у три рази.

3. З метою зменшення систематичних похибок давачів зворотнього зв'язку запропоновано виключити з контуру регулювання давач положення відсічного золотника (при цьому необхідна якість регулювання забезпечується відповідними додатковими контурами у структурі основного регулятора, побудованого на принципах зворотніх задач динаміки), і додатково ввести у контур регулювання запатентований блок корекції систематичних похибок давача головного зворотнього зв'язку (положення сервомотора). Зменшення інструментальної похибки давача забезпечується шляхом порівняння в електронному мікропроцесорному пристрої фактичних показань давача зі значеннями його високоточної градуовальної характеристики. Таке рішення забезпечує зменшення систематичних похибок давача на 1–1,5 %.

4. З метою зменшення статичних і динамічних похибок, зумовлених дискретизацією сигналів у мікропроцесорній системі керування, запропоновано нову науково обґрунтовану методику визначення максимально допустимих значень квантування керуючих сигналів за часом і за рівнем. Запропонована методика дозволяє практично ліквідувати негативний вплив дискретизації керуючих сигналів на точність регулювання частоти та потужності.

Функціональну схему прецизійного регулятора САР Ч і М, побудованого на означених вище принципах, наведено на рис. 8. За експертними оцінками, такий регулятор забезпечує підвищення точності регулювання частоти та потужності турбогенераторних установок з 0,3 до 0,05 % і, таким чином, забезпечити показники якості виробляємої електроенергії на рівні діючих міжнародних стандартів [10].

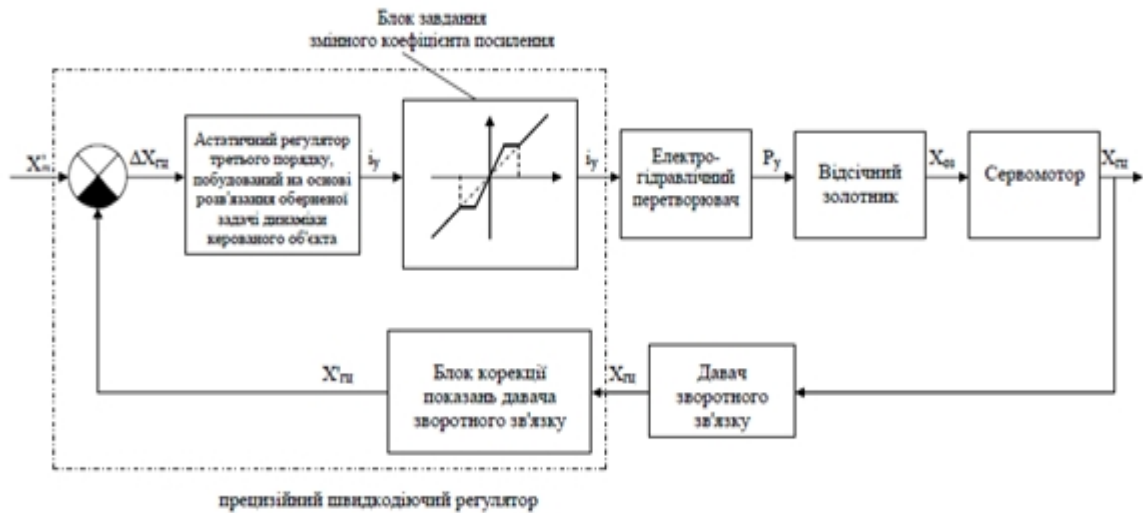


Рис. 8. Функціональна схема прецизійного швидкодіючого регулятора електронно-гидравлічного контуру САР Ч і М

Структурно-параметричний синтез уніфікованого прецизійного регулятора частоти та потужності турбогенераторних установок

Структурно-параметричний синтез уніфікованого прецизійного регулятора частоти та потужності парових турбін, є завершальним етапом створення системної науково-технічної і нормативної бази, спрямованої на підвищення показників якості електроенергії.[11]

Для структурно-параметричного синтезу прецизійного регулятора вихідну лінеаризовану систему рівнянь динаміки гідравлічного виконавчого механізму САР Ч і М представимо у вигляді:

$$\begin{cases} \dot{X}_3 = V_3, \\ T_3^2 \dot{V}_3 + 2\xi_3 T_3 V_3 + X_3 = K_{xi} K_{xoz}^i i; \\ T_{2y}^x \dot{X}_{2y} + X_{2y} = K_x K_{oz} X_3 \end{cases} \quad (23)$$

або у векторно-матричній формі:

$$\dot{\vec{X}} = A\vec{X} + b\vec{U}, \text{ де } \vec{X} = [X_{2y}; X_3; V_3]^T \quad (24)$$

\vec{X} – вектор параметрів стану об'єкта;

X_{2y} – переміщення штока гідроциліндра (сервомотора);

X_3 і V_3 – переміщення і швидкість відсичного золотника.

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad (25)$$

– матриця об'єкта керування з елементами

$$A_{11} = -\frac{1}{T_{2y}^x}; A_{12} = \frac{K_x}{T_{2y}^x}; A_{23} = 1; A_{32} = -\frac{1}{T_3^2}; A_{33} = -\frac{2\xi_3}{T_3};$$

$$A_{13} = A_{21} = A_{22} = A_{31} = 0; \vec{U} = i;$$

– вектор керуючих дій;

$$b = [0; 0; b_i]^T, \quad (26)$$

$b_i = K_{xi}K_{xoz}^i / T_3^2$ – матриця (вектор) керування.

Рішення зворотної задачі динаміки для еквівалентного об'єкта керування дає наступний вираз для закону керування:

$$W_p(S) = \frac{i_y(S)}{\varepsilon(S)} = \frac{r_0 + r_1 S + r_2 S^2 + r_3 S^3}{S(C_0 + C_1 S + C_2 S^2 + C_3 S^3 + S^4)}; \quad (27)$$

Структурну схему регулятора, відповідного закону керування (27), наведено на рис. 9.

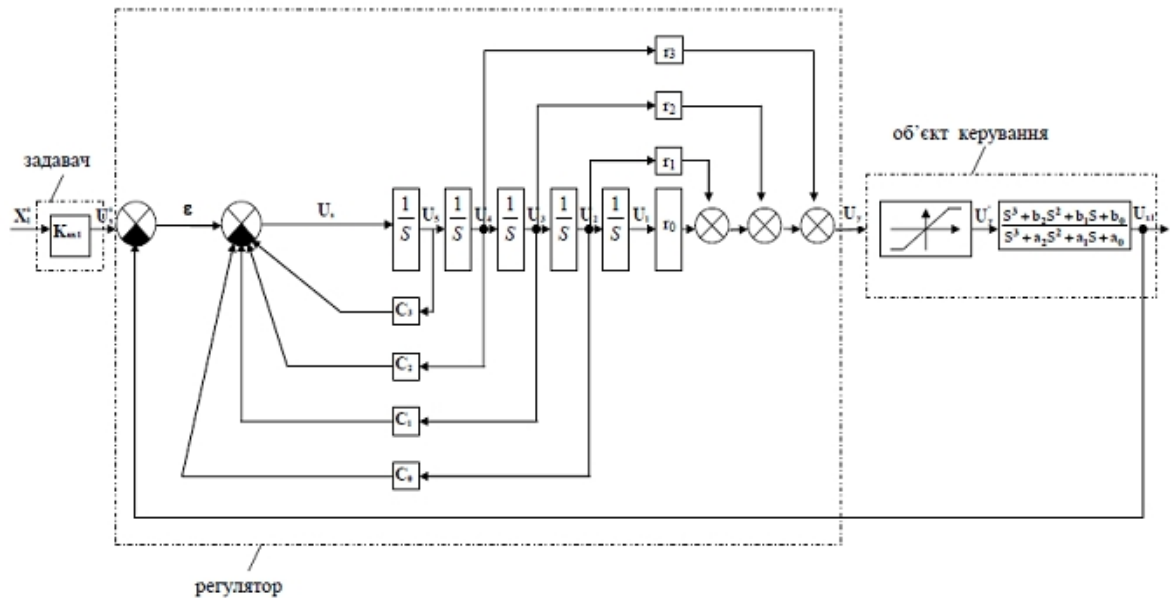


Рис. 9. Структурна схема астатичного регулятора, побудованого на основі розв'язання зворотної задачі динаміки

В статичному режимі ($S = 0$) передавальна функція замкнутої системи

$$W_3(S) = \frac{X_{zy}(S)}{X_{zy}^3(S)} = \frac{b_0}{a_{z0}} = \frac{b_0}{a_{p0} + b_0} = \frac{b_0}{b_0} = 1$$

Це означає, що статична похибка системи з синтезованим регулятором дорівнює нулю, незважаючи на наявність перетікань робочої рідини в сервомоторі. Наявність 1% внутрішніх перетікань обумовлює статичну похибку регулювання положення сервомотора до 0,1%. Таким чином, запропонований регулятор робить систему астатичною і дозволяє підвищити її точність на 0,1%.

На рис. 10 наведені перехідні характеристики базового об'єкта і об'єкта із запропонованим регулятором, параметри якого оптимізовані за критерієм мінімуму інтеграла від добутку абсолютного значення похибки на час. Система із запропонованим регулятором має час першого узгодження 0,12 с. і час регулювання 0,7 с, а базовий об'єкт, відповідно, 0,3 с і 1,5 с. Таким чином, запропонований регулятор забезпечує більш ніж дворазове підвищення швидкодії в порівнянні з базовим варіантом.

Отримані співвідношення дозволяють забезпечити оптимальні значення параметрів прецизійних регуляторів САР Ч і П парових турбін, їх практичне налагодження у процесі експлуатації і, відповідно, доведення показників якості електроенергії, вироблюваної тепловими і атомними електростанціями, до рівня міжнародних стандартів.

При цьому підвищення точності регулювання потужності турбогенераторних установок еквівалентно підвищенню ККД енергоблоку за рахунок забезпечення відповідності між вироблюваною і споживаною потужністю (при цьому має місце відповідна економія палива на одиницю вироблюваної електроенергії).

Річний економічний ефект від підвищення ККД енергоблоку може бути оцінений наступним чином:

$$\mathcal{E}_z = N_n \cdot T_y \cdot U_\varepsilon \cdot \frac{\Delta \eta}{\eta} - \left(\frac{C_p + C_m}{T_\varepsilon} + C_{ам} \right), \text{ грн / рік } ,$$

де N_n – номінальна потужність енергоблоку, кВт;

T_y – кількість годин використання встановленої потужності, год/рік;

C_ε – вартість виробленої електроенергії, грн/кВт·год;

η – базове (номінальне значення) ККД енергоблоку;

$\Delta \eta$ – збільшення ККД за рахунок підвищення точності регулювання (підвищення ступеня відповідності виробленої і споживаної потужності).

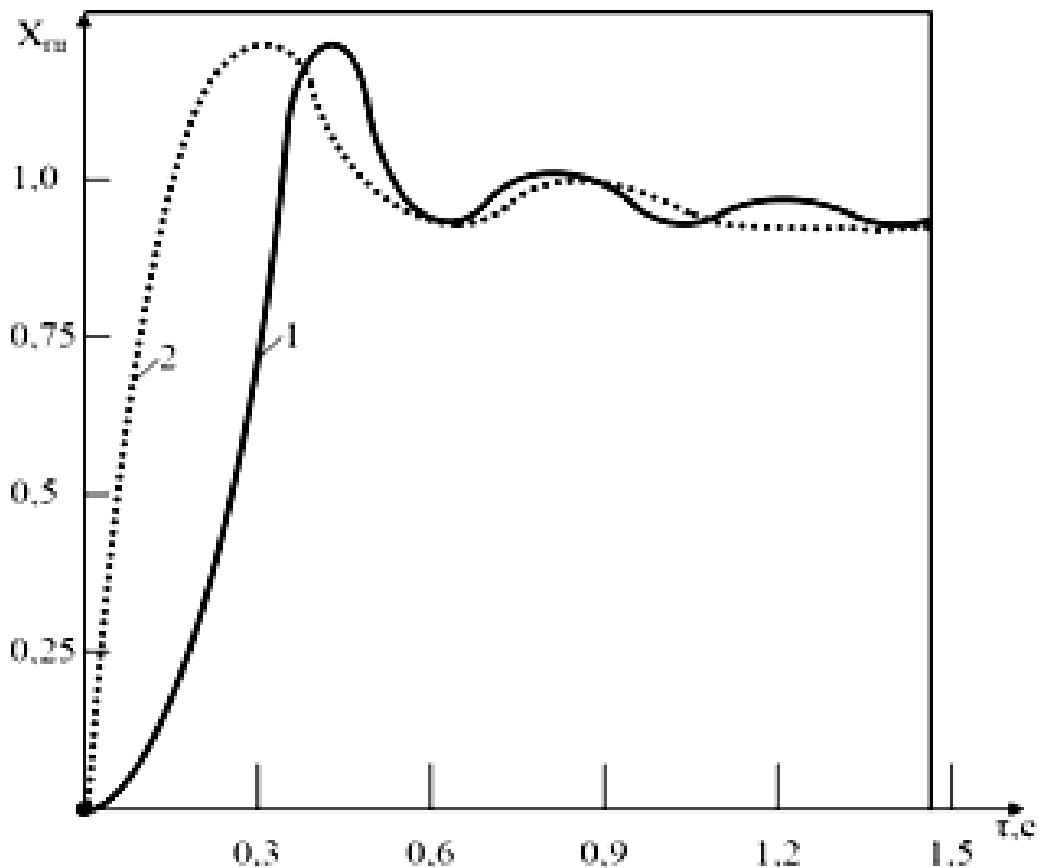


Рис. 10. Порівняння перехідних характеристик базового об'єкта і системи з прецизійним статичним регулятором на основі зворотних задач динаміки:

1 – базовий об'єкт; 2 – об'єкт з запропонованим регулятором

Для енергоблоку потужністю $= 1000$ МВт з базовим значенням ККД $\eta = 0,33$, при $T_y = 7000$ год / рік і вартості електроенергії 12 центів за кВт·год річний економічний ефект від підвищення точності регулювання з 0,3 % (рівень, що забезпечувався б гідравлічними системами регулювання) до 0,06 % (рівень, що забезпечуватиметься електрогідравлічними системами регулювання з використанням розроблених рішень), з еквівалентним підвищенням ККД на $\Delta \eta = 0,24$ %, становить порядку 20 млн грн.

Одночасно підвищується якість (стабільність частоти) виробленої електроенергії і, відповідно, її конкурентоспроможність і прибуток від реалізації на зовнішніх ринках, а також

утворюється значний економічний ефект у споживачів електроенергії за рахунок підвищення надійності, терміну служби та якості функціонування електричних приладів [9].

Висновки

1. Використано аналіз існуючої науково-технічної та нормативної бази щодо показників якості електроенергії і систем автоматичного регулювання частоти та потужності турбогенераторних установок. Показано, що до теперішнього часу відсутні системні науково-технічні і нормативні методи і засоби, що забезпечували б можливість доведення цих показників до рівня міжнародних стандартів.

2. З метою виконання аналізу причин і факторів, що впливають на показники якості регулювання частоти та потужності турбогенераторних установок (і, відповідно, виробляємої енергії), розроблено уточнені математичні моделі електрогідравлічних виконавчих механізмів з урахуванням всіх основних процесів і елементів, що мають суттєвий вплив на точність регулювання. Достовірність розроблених математичних моделей підтверджено циклом натурних експериментальних досліджень, що виконувались на діючих турбогенераторних установках АЕС України.

3. На основі розроблених математичних моделей виконано детальний аналіз показників статичної та динамічної точності регулювання частоти та потужності парових турбін, визначено резерви, технічні можливості та основні практичні напрямки їх підвищення до рівня діючих міжнародних стандартів.

4. Вперше розроблено детальну класифікацію усіх видів статичних і динамічних похибок регулювання частоти та потужності турбогенераторних установок, які суттєво впливають на якість виробляємої електроенергії. Запропоновано нову уніфіковану структуру прецизійного регулятора, який забезпечує компенсацію або суттєве зменшення всіх видів похибок і відповідне підвищення точності регулювання.

5. На основі математичних моделей, ідентифікованих за результатами експериментальних досліджень, виконано структурно-параметричний синтез прецизійного регулятора основного контуру САР Ч і П і оптимізацію його параметрів за критерієм мінімуму інтегралу від добутку абсолютного значення сумарної похибки на час. Такий регулятор дає можливість повністю компенсувати статичні похибки регулювання, зумовлені витоками і перетоками робочої рідини і статичними навантаженнями у елементах електрогідравлічного виконавчого механізму, а також у 2-3 рази зменшити динамічні похибки, зумовлені швидкісним статизмом, випадковими збуреннями і шумами у системі регулювання.

6. Розроблено ряд запатентованих практичних науково-технічних рішень, що забезпечують суттєве підвищення точності регулювання частоти та потужності парових турбін. Зокрема: засіб забезпечення змінного коефіцієнту підсилення основного контуру регулювання з метою зменшення статичних похибок, зумовлених зонами нечутливості елементів виконавчих механізмів; мікропроцесорний коригуючий пристрій, що забезпечують компенсацію систематичних інструментальних похибок давача зворотнього зв'язку.

7. Розроблено нову наукову методику вибору періодів дискретності мікропроцесорних систем керування, які забезпечують практичну компенсацію негативного впливу квантування керуючих сигналів на точність регулювання.

8. Розроблені науково-технічні рішення здатні забезпечити підвищення точності регулювання частоти та потужності турбогенераторних установок електростанцій (і, відповідно, стабільності частоти виробляємої електроенергії) у 5–6 разів (з 0,3 до 0,05–0,06 %); доведення цих показників до рівня міжнародних стандартів. При цьому очікуваний сумарний економічний ефект від підвищення якості електроенергії і ККД енергоблоків складає до 20 млн. грн. на рік.

Сукупність виконаних досліджень і розробок складає нову науково-технічну і нормативну базу для поліпшення якості електроенергії шляхом підвищення точності регулювання частоти та потужності парових турбін ТЕС і АЕС. На основі досліджень

розроблено проект нормативного документу (галузевого стандарту) з створення прецизійних САР Ч і П парових турбін.

Перелік літератури

1. Рекомендации по разработке систем автоматического регулирования тепловых электростанций (ВТИ, ПО «Союзтехэнерго», Атомтеплоэлектропроект)
2. Влияние качества системы автоматического регулирования частоты и мощности паровых турбин на эксплуатационную надежность и безопасность энергоблоков АЭС / Г. И. Каниук, С. Ф. Артюх: програма IV-ї міжнародної науково-технічної конференції «Керування режимами роботи об'єктів електричних систем – 2008» (KRES-2008) Інститут електродинаміки НАН України. Міністерство освіти і науки України. Донецький національний технічний університет, 9–11 жовтня 2008р.– Донецьк. – С. 3.
3. Каниук Г. И. Повышение качества технических характеристик системы автоматического регулирования частоты и мощности (САР Ч и М) паровых турбин / Г. И. Каниук // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования. Сборник научных трудов Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины. – Харьков, 2003. – Т.1. – С. 55–58.
4. Синтез прецизионного быстродействующего регулятора электронно-гидравлического контура управления положением регулирующих клапанов паровых турбин / Г. И. Каниук, Е. Н. Близниченко, А. В. Андреев, Л. И. Загребельная: збірник тез доповідей XXXVIII науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів та співробітників Української інженерно-педагогічної академії. – Харків, 2005. – С. 71.
5. Stengel R. F. Stochastic optimal control: theory and application / R. F. Stengel. – New York: Wiley, 1986. – 638 p.
6. Близниченко Е. Н. Повышение точности электрогидравлического следящего привода путем нелинейной коррекции статической характеристики гидрораспределителя / Г. И. Каниук, Е. Н. Близниченко// Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2005 – Вип.2/2(14). – С. 52–55.
7. Близниченко О. М. Оптимальное энергосберегающее автоматизированное управление турбокомпрессорными агрегатами / Монография/ Г. И. Каниук, С. Ф. Артюх, Е. Н. Близниченко, М. А. Попов – Харьков: ООО «Типография Мадрид». – 2014. – 144 с.
8. Влияние дискретности цифрового регулятора на качество регулирования турбин // Теплоэнергетика.– 1991. – N 9. – С. 24–28.
9. Каниук Г. И. Модели и методы структурного и параметрического синтеза прецизионных электрогидравлических следящих систем автоматизированных испытательных стендов / Рукопись/ Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления / Г. И. Каниук // Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». – Харьков, 2009.
10. Александров С. С. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами: Підручник у 3-х томах. Том 1. Теорія автоматичного керування / С. С. Александров, Е. П. Козлов, Б. І Кузнецов. / За заг. ред. Александрова С. С. – Харків: НТУ «ХПІ», 2002. – 490 с.
11. Fletcher R. Practical Methods of Optimization / R. Fletcher. - Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2006. – 436 p.

References

1. Recommendations for the development of automatic control systems of thermal power plants (VТИ, PA "Soyuztehenergo" Atomteploelectroproekt), [Rekomendatsii po razrabotke sistem avtomaticheskogo regulirovaniya teplovyh elektrostantsyy (VТИ, PA "Soyuztehenergo" Atomteploelectroproekt)].
2. Kaniuk, G., Artyukh S. (2008), Influence of the quality of the automatic frequency control and power steam turbines to operational reliability and safety of NPP. Program IV-th International scientific conference "Managing objects modes of electrical systems - 2008" (KRES 2008) Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. Ministry of Education and Science of Ukraine. Donetsk National Technical University [Vliyanie kachestv sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya chastoty i moshchnosti parovyh turbin na ekspluatatsionnyu nadezhnost' energoblokov AES. Programa 4-i mizhnarodnoi naukovu-tekhnichnoi konferentsii "Keruvannya rezhymamy roboty ob'yektiv energetychnykh system. Institut elektrodinamiki NAN Ukrayini. Ministerstvo osviti I nauki Ukrayini. Donetskii natsionalniy tehnicnyi universitet.]. , 9–11 October 2008 r. – Donetsk. – С.3.
3. Kanyuk, G. Improving the quality of the technical characteristics of the system of automatic control of frequency and power (ACS H and M) steam turbine. Improvement turbines methods of mathematical and physical modeling. Collection of scientific papers of the Institute of Mechanical Engineering Problems. AN Podgorny NAS Ukrainy [Povyishenie kachestva tehnicheskikh harakteristik sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya chastoty i moschnosti (SAR Ch i M) parovyih turbin. Sovershenstvovanie turboustanovok metodami matematicheskogo i fizicheskogo modelirovaniya. Sbornik nauchnyih trudov Instituta problem mashinostroeniya im. A.N. Podgornogo NAN Ukrainyi.] Kharkiv, 2003. – Т.1. – S. 55–58.
4. Kaniuk, G., Bliznichenko, E., Andreev, A., Zagrebelaya, L. Synthesis of high-speed precision control email-hydraulic position control loop control valves steam turbines: book of abstracts HHHVIII Scientific Conference Scientific and pedagogical staff, graduate students and employees of Ukrainian Engineering and Pedagogical

Academy. [Sintez pretsizionnogo bystrodeystvuyushchego regul'yatora elektronno-gidravlicheskogo kontura upravleniya polozheniem reguliruyuschih klapanov parovyih turbin. Zbirnik tez dopovidey HHHVIII naukovo-praktichnoyi konferentsiyi naukovo-pedagogichnih pratsivnikov, aspirantiv ta spivrobotnikov Ukrayinskoyi inzhenerno-pedagogichnoyi akademiyi.] Kharkov, 2005. – P.71.

5. Stengel R. F. Stochastic optimal control: theory and application / R. F. Stengel. – New York: Wiley, 1986. – 638 p.

6. Kaniuk, G., Bliznichenko E. Increasing the accuracy of the electro-hydraulic servo drive by nonlinear static characteristic correction control valve. Eastern European journal of advanced technologies. [Povyishenie tochnosti elektrogidravlicheskogo sledyaschego privoda putem nelineynoy korrektsii staticheskoy karakteristiki gidroraspredelitelya. Shidno-Evropeyskiy zhurnal peredovih tehnologiy] – Kharkov, 2005. – Vip.2 / 2 (14). – P. 52–55.

7. Kaniuk, G., Artyukh, S., Bliznichenko, E., Popov, M. Optimal energy-efficient automated management of turbo-compressor units. (Monograph). [Optimalnoe energosberegayushee avtomatizirovannoe upravlenie turbokompressornyimi agregatami. Monografiya. OOO «Tipografiya Madrid».] Kharkiv: LLC "Typography Madrid." – 2014. – 144 p.

8. Effect of discrete digital controller to control quality turbines. Teploenergetika. [Vliyanie diskretnosti tsifrovogo regul'yatora na kachestvo regulirovaniya turbin. Teploenergetika.]1991. – N 9. – P. 24–28.

9. Kanyuk G. I. Models and methods of structural and parametric synthesis of precision electro-hydraulic servo systems of automated test benches / manuscript / thesis for the degree of doctor of technical sciences, specialty 05.13.07 - automation of management processes. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". [Modeli i metodyi strukturnogo i parametricheskogo sinteza pretsizionnyih elektrogidravlicheskih sledyaschih sistem avtomatizirovannyih ispytatelnyih standov / Rukopis/ Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tehnikeskikh nauk po spetsialnosti 05.13.07 – avtomatizatsiya protsessov upravleniya. Natsionalnyiye tehnikeskiy universitet «Harkovskiy politehnicheskiiy institut»]. – Kharkov. – 2009.

10. Aleksandrov, S. S. Automaticity keruvannya Rukh ob'ektami i tehnologichnimi Process: Pidruchnik in 3 volumes. Volume 1. Teoriya automaticity keruvannya. For zag. Ed. Aleksandrov, S. S. – Kharkiv: NTU "KhPI", [Avtomatichne keruvannya ruhomimi ob'ektami i tehnologichnimi protsesami: Pidruchnik u 3-h tomah. Tom 1. Teoriya avtomatichnogo keruvannya. Za zag. red. Aleksandrova S.S. – Harkiv: NTU «HPI»,] 2002. – 490 p.

11. Fletcher R. Practical Methods of Optimization / R. Fletcher. - Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2006. – 436 p.

Поступила в редакцию 06.11 2014 г.