

СИНТЕЗ ПОДОБИ ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКОДІЮЧОЮ РЕДУКЦІЙНО-ОХОЛОДЖУВАЛЬНОЮ УСТАНОВКОЮ

У статті розглянуто проблему швидкості реакції системи керування швидкодіючої редуційно-охолоджувальною установкою пари у енергогенеруючій галузі і хімічній промисловості. Запропоновано стратегію керування процесом за випереджувачим прогнозом. В якості критерію запропоновано момент настання передвідмовного стану, який обчислюється порівнянням обчисленого за показаннями датчиків поточного значення повної енергії пари з його гранично припустимим значенням. Запропоновано варіант алгоритму системи керування.

Ключові слова: швидкодіюча редуційно-охолоджувальна установка, енергогенеруюча галузь, керування процесом за випереджувачим прогнозом, передвідмовний стан, алгоритм системи керування.

O. VOLOSHANIUK, O. NECHYPORENKO

Cherkasy State Technological University

THE SYNTHESIS OF THE QUICK-RESPONSE REDUCTION-COOLING DEVICE'S CONTROL SYSTEM

The problem of quick-response steam flow reduction-cooling device control system used in energy branch and chemical industry is considered in the paper. The experience of last disasters with nuclear power plants and in chemical industry shows that the safety problem is still acute there and that the comparative rareness of such matters is balanced by severity of damages and number of casualties. The key factor which strongly limits any effort to upgrade safety is mechanical inertia of executive devices. The control system's response time is the sole criteria, determining either disaster's elimination or its increase. But just the system's respond time remains in right dependence of executive devices' masses as well total amounts of energy-carrying media, their temperature, pressure, flow rates, etc. As about quick-response reduction cooling devices (QRCD) the problem is multiplied by such a fact that consumers of steam prefabricated by the QRCD also need a lot of time for preparing in order to avoid their damage. It seems this problem has no resolving via traditional methods. Because all known algorithms embodied in practice act in post-factum mode. I.e. control system's command signals are generated upon receiving alarm. So the principally novel approach is proposed in this paper both for QRCD control systems and other ones of similar purpose. Namely it is proposed to change reactive control system acting post-factum by active one based on advanced forecast. It includes involving of the term of prior-to-fail system's state. The prior-to-fail time is proposed as criteria to realize control together with the term of full energy reserve. This algorithm envisages the foregoing definition of maximal allowed overheated steam flow parameters and full energy (per second) value calculated on a basis of them. While operating current parameters values are measured via sensors and current full energy figure is calculated together with its first and second derivatives. Time between current and maximal full energy (rate) values is calculated. While this figures approaches to the system's response time such state is considered as the prior-to-fail state, and preparation-to-bypassing routine starts at this moment. The version of control system algorithm is proposed.

Keywords: high-speed reduction and cooling unit, energy generating industry, process control according to the advanced forecast, pre-failure state, control system algorithm.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Як відомо, редуційно-охолоджувальні установки (РОУ) та швидкодіючі редуційно-охолоджувальні установки (ШРОУ) застосовуються у енергетиці (у схемах енергоблоків) та у хімічній промисловості (наприклад, у виробництві поліетилену) для редукування тиску та зниження температури пари до заданих параметрів. ШРОУ призначені для відведення пари, яка продукується котлом чи парогенератором, але не споживається турбіною, а потрапляє у пароприймальні пристрої конденсатора чи до колектора власних потреб блока для резервування живлення привідних турбін, живильних насосів і повітрянагнітачів, а також для подавання пари на прогрівання трубопроводів проміжного перегріву. Відмінність РОУ і ШРОУ в тому, що РОУ призначені для постійної роботи на споживача. А ШРОУ, в певному сенсі, грають роль запобіжного клапана системи – забезпечуючи поглинання чи скидання того надлишку енергії, який з тієї чи іншої причини, система не може спожити. Але, на відміну від класичного запобіжного клапана, який просто розсіює енергію пари у зовнішньому середовищі, ШРОУ дозволяє, певною мірою, утилізувати таку енергію, тим самим підвищуючи ККД усієї системи.

Відповідно до назви, РОУ і ШРОУ мають двохступінчасту схеми роботи (відмінність ШРОУ тут лише у швидкодії, періодичності дії та у переліку споживачів пари). На першому ступені в усіх випадках здійснюється редуція тиску гострої (перегрітої) пари – класичним засобом газодинаміки, дроселюванням. Природно, що енергетичний баланс тут практично не змінюється.

Спадання потенційної енергії температури і тиску пари конвертується у зріст кінетичної енергії швидкості потоку. Стосовно ж другого етапу, охолодження пари з перегрітої до насиченої, зараз відомі три різних способи. Перший (відома, повсюдно застосована технологія) – це впорскування води у потік пари за допомогою інжекторів. З-за порівняно великої теплоємності процесів нагрівання крапель води та пароутворення на них витрачається надлишок енергії пари. Який, в даному випадку конвертується у збільшення загальної маси пари (з-за рахунок доданої маси води), проте з нижчими енергетичними параметрами (насичена пара замість перегрітої).

Особливістю таких галузей, як енергетика та хімічна промисловість є те, що порівняно низька частота надзвичайних подій у них поєднана з тяжкими наслідками кожної аварії чи катастрофи. Причина криється у тому, що обидві ці галузі оперують з речовинами з великим рівнем енергії, неконтрольоване вивільнення якої може спричинити людські жертви, пошкодження майна та шкоду навколишньому середовищу. При настанні таких подій критичним є чинник часу. Чим точніше і раніше система керування енергетичним чи хімічним об'єктом може відстежити і відреагувати на настання надзвичайної події, тим меншою є імовірність шкоди. Але швидкодія системи керування завжди має фізичні обмеження, спричинені як інерційністю виконання обчислень та формування командних сигналів, так і інерційністю виконавчих механізмів: клапанів, дроселів тощо – особливо великогабаритних та таких, що оперують із великим тиском, температурою та іншими параметрами енергоносіїв.

Аналіз останніх досліджень

Щодо конкретно швидкодіючих редуційно-охолоджувальних установок, ряд публікацій, окрім низької швидкодії взагалі, нарікають ще й на специфічні недоліки, притаманні саме даній схемі. Останні пов'язані з великою швидкістю потоку і, відповідно, з нестачею часу на нагрів крапель води і перетворення їх на пару. Тому краплі води виносяться з охолоджувача у вихідний трубопровід, осідають на його стінках, викликаючи локальний термічний шок, концентрацію термічних напружень і подальше розтріскування стінок труб. Для вирішення вищенаведених проблем у літературі, вивченій за даною тематикою, пропонуються альтернативні варіанти виконання охолоджувальної частини контуру ШРОУ. Перший [1] передбачає пропускання пари (дотично, або під гострим кутом) крізь кільце води, яке обертається. Для утримання води або пароводяної суміші від винесення з-за придання їм кінетичної енергії пари процес здійснюють у полі відцентрових сил у спеціально спрофільованій камері змішування, де і створюють обертальний кільцевий шар води, проходячи крізь який від периферії до центра пар знижує свої параметри. Завдяки відцентровим силам тиск на зовнішньому кільці більше тиску на його внутрішньому боці, і ця різниця залежить від швидкості обертання кільця, його товщини, діаметра и густини. Проходячи крізь це обертальне кільце від периферії до центру, пара переміщується з області з більш високим тиском до області з нижчим тиском, і таким чином, знижує свій тиск. При цьому пара проходить набагато більший шлях, аніж у звичайному охолоджувачі. Окрім того, водяне кільце, саме по собі діє як сепаратор крапель: відцентрова сила набагато сильніше діє на концентровані маси крапель, аніж на молекули пари, і притискає перші до стінок кільця. Частина первинної пари конденсується у воді кільця, а вторинна пара (з нижчими параметрами) виділяється при об'ємному кипінні поблизу внутрішнього боку кільця. Вихідна пара залежно від потреби, може бути перегрітою, сухою чи вологою, насиченою.

Нарешті, третім варіантом виконання охолоджувальної частини контуру ШРОУ є встановлення додаткової паротурбінної установки [2]. В даному випадку кінетична енергія потоку пари напряму трансформується у електричну енергію, отже, утилізація надлишкової енергії здійснюється найбільш ефективно.

Що ж до наукового апарату відображення перехідних процесів у системі, та згідно з [3] параметри потоку пари визначаються так:

$$\sigma_{\text{вих}}^{(p=\text{const})} = \sigma_{\text{вих}}^{(p=\text{var})} + K_{\text{рег}}^{(\text{вих})}(s) \Delta X_{\text{рег}}^{p=\text{const}} \sigma_{\text{BBLX}}^{(p=\text{const})} = \sigma_{\text{BBLX}}^{(p=\text{var})} + K_{\text{PEГ}}^{(\text{BBLX})}(s) \Delta X_{\text{PEГ}}^{p=\text{const}}, \quad (1)$$

де $\sigma_{\text{вих}}^{(p=\text{const})}$ – зміна вихідного параметра $\sigma_{\text{вих}}$ при заданому збуренні при $p=\text{const}$;

$\sigma_{\text{вих}}^{(p=\text{var})}$ – зміна параметра $\sigma_{\text{вих}}$ при заданому збуренні в умовах $p=\text{var}$;

$K_{\text{рег}}^{(\text{вих})}$ – передаточна функція вихідного параметра відносно регульовального діяння;

$\Delta X_{\text{рег}}^{p=\text{const}}$ – зміна параметра при даному регульовальному діянні системи регулювання тиску перед споживачем. Для оцінки якості регулювання у [3] пропонується інтегральний критерій:

$$I = \int_0^{\infty} \sigma^2 dt, \quad (2)$$

де σ – регульований параметр.

Для часу сервомотора (виконавчого механізму) наводяться такі оптимальні значення T_{comm} :

- Для П та ПІ-регуляторів $T_{\text{comm}} \approx 2\tau$, з допуском $T_{\text{comm}} \approx (1...4)\tau$;

- Для ПД-регуляторів $T_{\text{comm}} \approx \tau$, з допуском $T_{\text{comm}} \approx (0,75...2)\tau$;

У [4] розглядається питання ідентифікації динамічних характеристик об'єктів керування теплотехнічного обладнання. Для випадку стрибкоподібного вхідного сигналу передаточна функція моделі вищого порядку із запізненням відображається, як:

$$y = \frac{K e^{-t_0 s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1) \dots (T_n s + 1)} \quad (3)$$

За методом Андерсона крива розгону об'єкта регулювання записується у вигляді:

$$\sigma(t) = AK + K_1 e^{-\frac{t}{T_1}} - K_2 e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (4)$$

де $K_1, K_2 > 0$, якщо $T_2 > T_1$

У [5] наведені рівняння теплового балансу енергогенеруючої системи. На вході до турбіни генератора:

$$G_0 = \frac{N_e}{\sum \alpha_j H_i \eta_T \eta_G} \quad (5)$$

де N_e – задана електрична потужність турбогенератора;
 η_T, η_G – механічний ККД турбіни і генератора;
 α_j, H_i – внутрішня робота на 1 кг свіжої пари
 На виході з котла:

$$G_{\text{шт}} = \alpha_k G_0 \quad (6)$$

де $\alpha_k \approx 1 + \alpha_y$ ($\alpha_y \approx 0,02$)

Рівняння теплового навантаження котла:

$$Q_K = G_{\text{шт}}(h_0 - h_{\text{пв}}) + G_{\text{вп}}(h^T - h_{\text{вп}}^0) \quad (7)$$

Рівняння витрати тепла на турбоустановку:

$$Q_T = G_T(h_0 - h_{\text{пв}}) + G_{\text{вп}}(h^T - h_{\text{вп}}^0) \quad (8)$$

де $h^T - h_{\text{вп}}^0$ – різниця ентальпій до і після вторинного перегріву

У [6] для скорочення часу реакції системи автоматичного регулювання пропонується використання ПД-регулятора спільно з додатковим пристроєм компенсації внутрішнього збурення системи. Передаточна функція регулятора пропонується у вигляді:

$$W_p(p) = \frac{k_p(T_{ip}+1)(T_{dp}+1)}{T_{ip}} \quad (9)$$

де k_p, T_i, T_d відповідно, коефіцієнт передачі регулятора, час інтегрування, час диференціювання. А передаточна функція пристрою компенсації внутрішнього збурення представлена диференціальною ланкою другого порядку інерційності:

$$W_d(p) = \frac{k_d^* T_d^* p}{(T_{dp}+1)(T_{ip}+1)} \quad (10)$$

де $k_d^* = 1/k_p$; $T_d^* = T_i^*$; $T_1 = T_d$;

k_d^* – коефіцієнт передачі; T_d^* – час диференціювання; T_1 – менша постійна часу.

В якості критики існуючих літературних джерел слід зазначити, що всі запропоновані нові рішення здатні, певною мірою, підвищити економічність ШПРОУ. В той же час жодне рішення практично не здатне якісно поліпшити швидкодію ШПРОУ у аварійній ситуації. І, нарешті, зовсім не враховується та обставина, що стрибкоподібний приріст енергії, яка видається ШПРОУ при байпасуванні потоку пари може мати руйнівне діяння на споживачів ШПРОУ. Цілком очевидним є той факт, що, по-перше, споживачі потоку пари, що обробляється у ШПРОУ, **потребують певного проміжку часу** для підготовки прийому пари. І, по-друге, форма графіку потоку пари від часу має бути **якомога пологою**, без різких перепадів. Отже, має місце певне протиріччя між вимогами практики предметної області та поточним станом науки, яка іще не запропонувала стратегії керування процесами та алгоритми, які б задовольнили вимоги практики.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Дана стаття має на меті розробку такої стратегії керування ШПРОУ, алгоритмів роботи і складу системи ШПРОУ, які б дозволили скоротити, або навіть звести до нуля запізнення в часі (щодо настання надзвичайної події) процесу підготовки споживачів потоку пари, продукovanого ШПРОУ, та мінімізувати швидкість зростання енергетичних параметрів пари, що надходить до споживачів.

Виклад основного матеріалу

При моделюванні будь-якої технічної системи з керованими/регульованими параметрами роботи обов'язково треба враховувати і систему керування/регулювання. Бо характеристики останньої: алгоритми програмного забезпечення, продуктивність обчислювача, похибка обчислень, порогові значення чутливості і робочі діапазони датчиків, інерційність та параметри роботи виконавчих механізмів (приводів клапанів, тощо) найсуттєвішим чином впливають на параметри усієї системи в реальній експлуатації. Природно, що склад і алгоритми роботи системи керування визначатимуться її призначенням та умовами роботи [7]:

Систему ШПРОУ ми розглядатимемо, як систему аварійного скидання надлишку енергії. Подібні системи характеризуються сімома режимами роботи:

1) Запуск: вмикання ШПРОУ, самоконтроль обчислювального блоку (блоків), контроль роботи датчиків та виконавчих механізмів (приводів клапанів, тощо), виведення виконавчих механізмів на режим холостого ходу (якщо їх конструкція передбачає перебування на холостому ході при штатному режимі роботи основної системи).

2) Пасивний режим (режим стеження, відповідає нормальному режимові роботи основної системи): датчики та обчислювальний блок (блоки) працюють у штатному режимі, здійснюється приймання та обробка сигналів. Але команди не генеруються, виконавчі механізми залишаються вимкненими, або на холостому ході, в залежності від конструкції.

3) Вмикання активного режиму ШПРОУ (Відповідає початку нештатної роботи основної системи. Тут можливі два варіанти: або вихід параметрів пари за припустимі межі, умовно «вище» за потоком, аніж ШПРОУ – або ж несправність чи інші проблеми споживачів пари умовно «нижче» ШПРОУ за потоком. Наприклад, несправність турбогенератора). Система ШПРОУ повинна обчислити параметри і сформувати командні сигнали, виконати необхідні підготовчі дії та надіслати командні сигнали виконавчим механізмам.

4) Активний режим ШПРОУ: відбувається редукування тиску та зниження температури пари у контурі ШПРОУ, датчики відстежують параметри в контурі ШПРОУ, а також в основній системі, як вище, так і нижче за потоком від ШПРОУ, обчислювальний блок керує роботою контуру ШПРОУ і утримує параметри у заданих межах, генеруючи та надсилаючи коригувальні командні сигнали, в разі потреби.

5) Завершення активного режиму ШПРОУ (Відповідає поверненню основної системи у штатний режим). Генеруються і надсилаються відповідні командні сигнали, виконавчі механізми ШПРОУ вимикаються, або переводяться на холостий хід.

6) Нештатний (аварійний) режим роботи самого ШПРОУ: вимкнення живлення ШПРОУ, несправність обчислювального блоку, відмова датчиків, несправність виконавчих механізмів у контурі ШПРОУ, тощо. В залежності від характеру несправності, виконуватиметься відповідний аварійний алгоритм.

7) Штатне вимкнення системи: виконуються штатні дії по вимкненню робочих механізмів ШПРОУ, запис статистики роботи у пам'ять обчислювального блоку ШПРОУ, заключна самоперевірка системи ШПРОУ, вимкнення живлення.

Вище система ШПРОУ порівнювалася із запобіжним клапаном. Але слід зазначити їх принципову відмінність між собою. У клапані швидкість зміни потужності в часі не має суттєвого значення. Виконавчий механізм, тобто сам клапан, має спрацювати якнайшвидше. Надлишкова кількість пари має бути викинута у навколишнє середовище за найкоротший час. Клапан має автоматично, або за командою зачинитися, коли надзвичайна ситуація мине — от і усі вимоги щодо динаміки. Але і в практиці предметної області, і у відповідній їй галузі прикладної науки є суттєва прогалина, що стосується динаміки перетворення енергії у ШПРОУ. Власне, постановка даного питання і його рішення складає наукову новизну даної статті. Бо у ШПРОУ відбувається не розсіювання (тобто втрата) надлишкової енергії, а її утилізація, з перетворенням на інший вид енергії. Але з точки зору запобігання аварійних ситуацій, градієнт збільшення/зменшення енергії має бути як найменшими при будь-якому способі утилізації енергії. Бажано, щоб сумарна потужність, генерована системою взагалі залишалася постійною. З іншого боку, реагування системи ШПРОУ на аварійну ситуацію має бути якнайшвидшим. Але швидкодія обчислювального блоку має вкрай незначний вплив на загальний час реакції системи. Обчислювальна компонента нині є вкрай дешевою (порівняно з механічною складовою системи). І немає перешкоди в тому, щоб застосувати більш продуктивний процесор і тим зменшити час реакції. Але механічна складова має значно більшу інертність. Час відкриття клапанів вимірюється десятими долями секунди. Якщо ж перетворення енергії для її подальшої утилізації здійснюється за допомогою якихось механічних пристроїв: впорскування води, пропускання струменя пари через вихрове водяне кільце, чи крізь парову турбіну — час реакції стає іще більшим. Ситуація іще погіршується тим, що будь-який пристрій утилізації енергії має технічні обмеження щодо швидкості зміни потужності в часі. Причому, як енергії, що входить у нього, так і вхідної, ним перетвореної енергії. Тобто енергію на утилізаційний пристрій слід подавати дозовано, поступово нарощуючи її величину так, щоб не перевищити технічні можливості останнього. Наприклад, турбіна, яка працює на номінальному режимі, може витримати раптове підвищення енергії вхідного потоку на 10%. Але якщо така сама, за абсолютною величиною, енергія потоку буде прикладена до турбіни на малих обертах, та може не витримати механічного навантаження і вийде з ладу. Треба підготувати систему впорскування води, або розкрутити кільце з водою, або ж виконати стартове розкручування турбіни. Отже, від моменту отримання аварійного сигналу і до виходу контуру ШПРОУ на максимальний режим потрібен час від кількох секунд до десятків секунд залежно від технічного виконання і параметрів системи. Можна стверджувати, що мінімально можливий час спрацювання механічних компонентів системи ШПРОУ є на один, або кілька порядків вище, аніж максимально припустимий час реакції, який від неї вимагається за умовами експлуатації. Особливо критичною ситуація виглядає у атомній енергетиці, де процеси розвиваються за час у соті і навіть тисячні частки секунди. Причому проблема зберігається для несправностей та позаштатних режимів і «вище», і «нижче» ШПРОУ за потоком.

Очевидно, що класичними методами дана проблема не вирішується, отже потрібен якийсь новий підхід. Проаналізувавши загальну схему керування ШПРОУ, ми бачимо що вона має яскраво виражений **реактивний** характер. Тобто, спочатку відбувається якась надзвичайна ситуація, і тільки після цього обчислювальний блок ШПРОУ розпізнає цю ситуацію і її характер, генерує відповідні командні сигнали і надсилає їх на виконавчі механізми, які спрацювають іще пізніше. Запізнення реакції системи тягне за собою негативні, а часом і катастрофічні наслідки. Єдиним рішенням тут може бути перехід від **реактивного** до **активного** керування системою. Тобто від керування **за наслідками** до керування **за прогнозом**. Фізично це може бути втілено в тому разі, коли найбільш тривалі підготовчі операції будуть

розпочати до моменту настання аварійної ситуації. За аналог цього взято відомий з іншої галузі спосіб [8]. Підґрунтям його є факт високих посадочних швидкостей сучасних літаків — приблизно 100 м/с. В момент торкання поверхні землі нерухоме, перед тим, колесо шасі отримує таку ж саму окружну швидкість. Це відбувається практично моментально, із вкрай малим запізненням, породженим тертям у підшипниках та механічною пружністю системи. З точки зору міцності це є рівнозначним до миттєвого прикладення до конструкції крутного моменту значної величини. (І є дуже близьким механічним аналогом до системи ШПРОУ, яка є предметом даної статті). Щоб запобігти руйнуванню конструкції шасі, автори [8] та інших патентів на зазначену тему пропонують попереднє розкручування коліс. Тобто попереднього надання механічному пристроєві кінетичної енергії, співрозмірної за величиною тому потоковій енергії, що буде подано на пристрій в момент настання надзвичайної ситуації (торкання земної поверхні у випадку з літаком). Дане технічне рішення можна вважати успішним, оскільки воно виключає поздовжню швидкість літака з чинників механічного впливу на конструкцію, залишаючи тільки вертикальну швидкість зниження, яка є на порядок меншою. Тому, у вигляді прямого механічного аналогу (якщо у системі ШПРОУ застосовуватиметься турбіна, чи інший накопичувач/перетворювач енергії), або непрямого аналогу (виконання інших дій по підготовці споживача до приймання надлишкової кількості енергії) принцип **випереджуючого виконання підготовчих дій** може бути рекомендований для системи ШПРОУ.

Проте, під час втілення цього принципу в авіації, на відміну від системи ШПРОУ, заздалегідь є відомим найсуттєвіший параметр: **момент часу** подання надлишкового потоку енергії. Який, у випадку з літаком, визначається польотним завданням та рішеннями командира повітряного судна про посадку. Тоді, як ШПРОУ, за своїм призначенням, є системою для дії у надзвичайній (аварійній) ситуації. А подібні ситуації заздалегідь не програмуються і відбуваються у довільний момент часу. Проте, як відомо, аварійні ситуації поділяються на дві категорії: ті, що мають так званий **передвідмовний стан**, і такі, що його не мають. Під передвідмовним станом ми розуміємо такий стан системи, **який може бути виявлений існуючими датчиками та алгоритмами**, і при якому параметри робочого процесу і стан самої системи іще перебувають в припустимих межах, але динаміка зміни цих параметрів із достатнім ступенем імовірності вказує на можливість настання надзвичайної події (пошкодження/відмови/виходу параметрів за припустимі межі) у найближчому майбутньому. Ситуації без передвідмовного стану трапляються миттєво або ж їх передвідмовний стан є прихованим, з-за тієї чи іншої причини, і не може бути виявленим інструментально. Власне, різниця між цими видами подій є кількісною і визначається величиною проміжку часу до їх настання. Але вона тягне за собою якісну відмінність у алгоритмі роботи ШПРОУ. Подія без передвідмовного стану вимагає застосування аварійного алгоритму роботи ШПРОУ. Згідно з яким, перш за все, виконуються дії з запобігання аварії/катастрофи: відкриття аварійних клапанів тощо, змирившись із тим, що частина енергії при цьому буде втрачена незворотно. Водночас розпочинається виконання підготовчих дій (але вже без випередження у часі, *postfactum*) та продовжується вимірювання енергетичних параметрів процесу. Коли останні знизяться до величини, припустимої для штатної роботи системи ШПРОУ, розпочинається утилізація енергії.

У свою чергу, передвідмовні стани поділяються на такі, що можуть бути викриті власними інструментальними засобами системи ШПРОУ, і такі, що можуть бути викриті зовнішніми засобами — з передачею отриманих параметрів до ШПРОУ. Це викликано тим, що за своєю суттю ШПРОУ є допоміжною системою. І навряд чи на неї буде покладено контроль основної системи (енергогенеруючої, хімічного виробництва, тощо). В даній статті припускається, що основна система оснащена власною системою самоконтролю та діагностики, здатною розпізнати передвідмовний стан конструкції і передати його параметри іншим споживачам. І природно, структура цілої системи може бути іншою. Наприклад, інформаційний контур ШПРОУ може не існувати, як окрема підсистема, а бути однією з функцій загальної системи керування. Проте різниця в даному випадку не є принциповою. Припустимо, що ШПРОУ являє собою автономну підсистему. В такому випадку ШПРОУ складатиметься з таких компонентів: обчислювальний блок, комплект датчиків, приводи виконавчих механізмів, канали інформаційного обміну з центральною системою керування та іншими підсистемами. Принципова схема ШПРОУ показана на рис. 1.

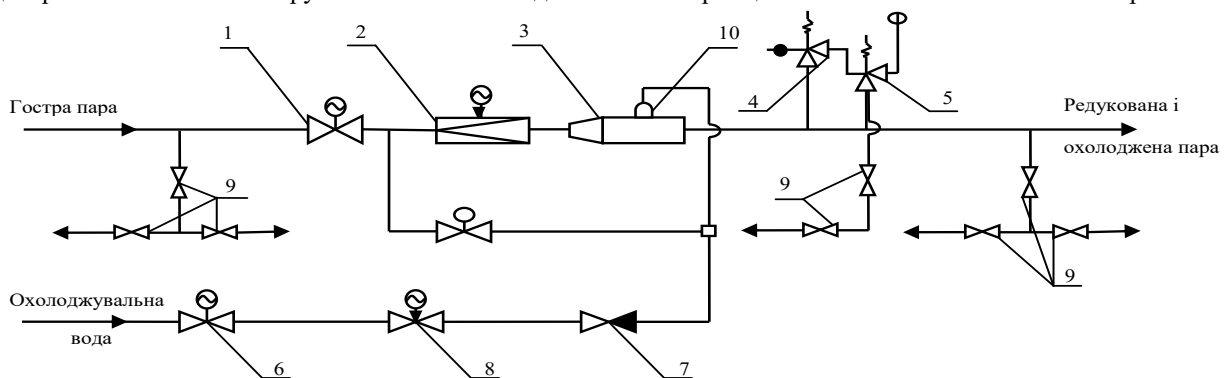


Рис. 1. Схема ШПРОУ класичного типу:

1 – заслінка; 2 – клапан дросельний, 3 – охолоджувач пари; 4 – клапан імпульсний; 5 – ГПК, 6, 9 – клапани запирання 7 – клапан зворотній; 8 – клапан регулювальний. 10 – форсунка механічного розпилювання води [9]

Ключовим моментом у запропонованому рішенні є вибір раціонального алгоритму викриття передвідмовного стану. Нині великої популярності набули різноманітні варіанти нейронних мереж. Але, при усіх їх перевагах, слід зазначити, що вони потребують значного часу на обчислення. Тоді, як в предметній області процеси є швидкоплинними, і затримка з реакцією на виникнення надзвичайної події може потягнути за собою катастрофічні наслідки. Отже, за умовами практики предметної області, можуть застосовуватися виключно найпростіші алгоритми, що вимагають мінімуму часу на їх обчислення. Тут може бути втілений раціональний прийом, який широко застосовується у промисловій електроніці: складні функціональні залежності замінюються на найпростіші, лінійні. Складні й громіздкі в обчисленнях функції замінюються на відрізки прямих, які визначаються коефіцієнтом (тобто тангенсом кута нахилу) і зміщенням. Найголовнішим питанням, відповідь на яке складає наукову новизну даної статті, є математичне вираження моменту настання передвідмовного стану.

Розглянемо передвідмовний стан системи. Його особливістю є те, що він являє собою перехідний процес із чітко вираженим закінченням: настання аварії/відмови/катастрофи — або зовнішнє втручання у процес, з усуненням причини, що викликала передвідмовний стан та з поверненням до штатного режиму роботи системи. Натомість, початок передвідмовного процесу є “розмитим” у часі. А причина, що його викликала, або взагалі не відображається у зміні поведінки та параметрів системи, або ці зміни важко відрізнити від їх флуктуацій у нормальному режимі роботи. Оскільки надзвичайні події і передвідмовні стани можуть мати різноманітну природу, для побудови алгоритму роботи ШПРОУ необхідно звести їх до єдиного критерію. В якості такого пропонується **очікуваний час настання надзвичайної події**. Вище згадувалося, що передвідмовний технічний стан основної системи має визначатися її власними засобами самодіагностики — і передаватися до обчислювального блоку ШПРОУ каналами інформаційного обміну. Це стосується як стану системи умовно “вище” ШПРОУ, тобто енергогенеруючої складової (котла, реактора, тощо), так і споживачів енергії пари умовно “нижче” ШПРОУ (паротурбінних агрегатів, тощо). Предметом даної статті є параметри робочого процесу, які вимірюються власними датчиками ШПРОУ, тобто параметри потоку пари. Оскільки потенційна і кінетична енергія пари легко трансформуються одна в іншу і навпаки, визначальною є повна енергія, що є сумою потенційної і кінетичної енергій. Для її визначення достатньо вимірювати три параметри: температуру, парціальний тиск пари і швидкість потоку. Оскільки йдеться мова про динамічний процес, фізичною величиною має бути не енергія, як така, а секундний потік енергії через заданий переріз паропровода. Подією “відмова” тоді вважатиметься таке значення повної енергії E_{np} , яке дорівнює гранично припустимому значенню $E_{np} = E(V, T, P)$, що є верхньою межею нормального експлуатаційного діапазону, де V швидкість, T – температура, а $P_{пар}$ — парціальний тиск потоку газів. На кожному кроці часу мають обчислюватися такі параметри: різниця ΔE між гранично припустимим E_{np} і поточним $E_{np}(t_i)$ значеннями повної енергії потоку пари:

$$\Delta E = E_{np} - E_{np}(t_i), \quad (11)$$

Похідна функції повної енергії за часом, тобто швидкість зміни повної енергії обчислюється так:

$$E_{np}' = \frac{dE_{np}}{dt} \approx \frac{\Delta E_{np} = E_{np}(t_i) - E_{np}(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} \quad (12)$$

Друга похідна функції повної енергії за часом:

$$E_{np}'' = \frac{dE_{np}'}{dt} \approx \frac{\Delta E_{np}'}{\Delta t} = \frac{E_{np}'(t_i) - E_{np}'(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} \quad (13)$$

Енергетичний баланс обчислюється згідно з [10].

Для потоку насиченої пари повна енергія являє собою суму кінетичної енергії E_k , що визначається швидкістю та секундною витратою маси пари, потенційної енергії механічного тиску пари E_p та тепловою енергією E_r , наданою парі в процесі її перегрівання.

Потік кінетичної енергії визначається загальновідомою формулою

$$E_k' = \frac{v_p v^2}{2s} E_k' = \frac{V \rho V^2}{2S} \quad (14)$$

де V – швидкість потоку, ρ — густина пари, S – площа перетину каналу.

Потік потенційної енергії обчислюється, як

$$E_p' = V \times p, \quad (15)$$

де p – парціальний тиск пари.

Теплота перегрівання пари q_{np} , тобто теплота, необхідна для переведення одиниці маси сухої насиченої пари у перегріту пару з температурою t при її ізобарному нагріванні обчислюється за формулою:

$$q_{np} = \int_{t_{н}}^t c_p dt = h - h' = u - \ddot{u} + P(v - \ddot{v}) \quad (16)$$

де c_p – масова ізобарна теплоємність перегрітої пари (змінна величина, що залежить від тиску і температури, визначається експериментально).

Далі перевіряємо знак другої похідної E''_n величини повної енергії. Якщо $E''_n > 0$, вважаємо, що надалі швидкість зміни повної енергії $E'_n(t_i) = E''_n(t_i) \times \Delta t$. Якщо ж $E''_n < 0$, вважаємо, що швидкість зміни повної енергії надалі залишається, як обчислено у [2].

І відповідно, критичний час $t_{кр}$ до моменту настання надзвичайної події обчислюється за формулою:

$$t_{кр} = \frac{\Delta E(t_i)}{E'_n(t_i)} \quad (17)$$

Обчислене значення $t_{кр}$ порівнюється з мінімальним часом виконання підготовчих дій $t_{впд}$ що є технічною характеристикою ШПРОУ. У випадку, якщо в момент часу t_n обчислене значення $t_{кр} = t_{впд} + t_3$, де t_3 – обраний час запасу (заздалегідь визначений резерв часу на затримку з прийняттям рішення, тощо), цей момент часу вважатиметься моментом початку підготовчих дій. В момент t_n система керування ШПРОУ генерує командний сигнал виконавчим механізмам на запуск підготовчих дій (розкручування турбіни, підготовку до пуску води у потік пари, тощо). В залежності від обраного алгоритму. Одночасно сигнал про початок підготовчих дій надсилається по каналах інформаційного обміну до системи (систем) керування споживачами ШПРОУ — в разі, якщо вони теж потребують виконання послідовності підготовчих дій перед прийняттям пари по каналу ШПРОУ. Для запобігання ударних навантажень та стрибків потоку енергії вже в момент часу t_n або ж у довільний момент часу $t = t_n + \tau$, де $\tau \leq t_{впд}$, **тобто ще до настання надзвичайної події**, і відповідно до обраного алгоритму, може розпочатися байпасування пари через ШПРОУ, з поступовим збільшенням потоку від нульового до максимального значення. Цим досягається те, що графік зміни енергії пари, яку отримує споживач ШПРОУ, буде максимально пологим, і не призведе до аварійної ситуації у споживача. Водночас система керування ШПРОУ продовжує відстежувати сигнали з основної системи та вимірювати параметри потоку [11]. У випадку, якщо з системи керування основною системою буде отримано сигнал про усунення причини, що викликала надзвичайну подію, система керування ШПРОУ згенерує командні сигнали на виконання завершальних дій: плавне зменшення потоку пари через ШПРОУ та вимкнення виконавчих механізмів ШПРОУ (перекриття системи впорскування води, закриття клапанів тощо). Якщо система керування ШПРОУ отримуватиме від датчиків вимірювання параметрів сигнали про стабілізацію таких параметрів у прийнятних межах протягом заздалегідь визначеного проміжку часу, система керування ШПРОУ також згенерує командні сигнали на виконання вищезазначених завершальних дій. Гіпотетична функціональна схема ШПРОУ зображена на рис. 2.

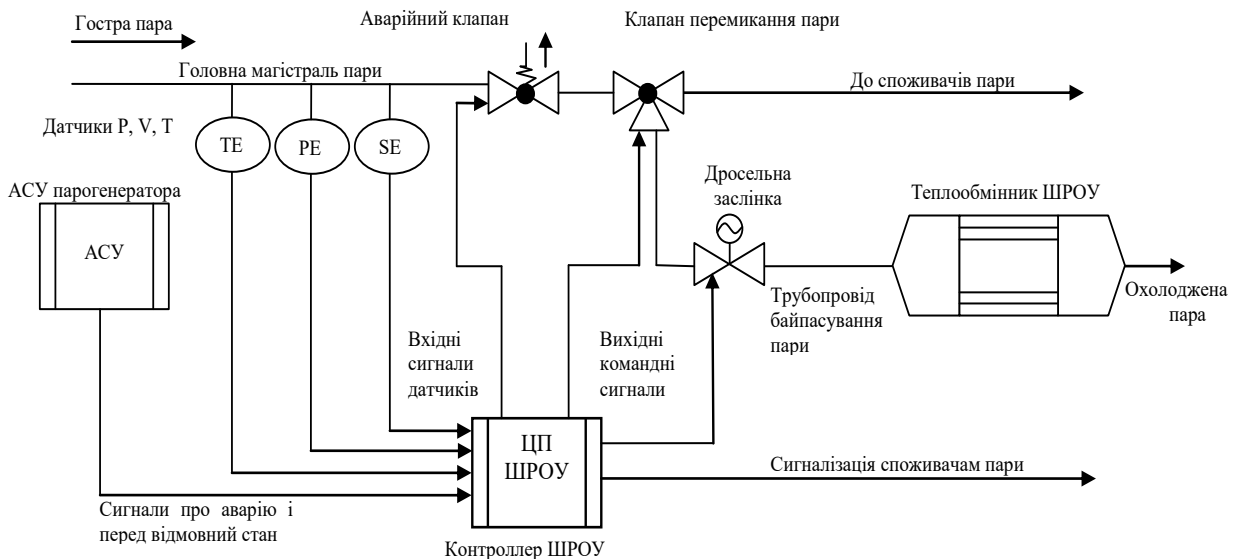


Рис. 2. Функціональна схема ШПРОУ (варіант)

На схемі наведено головні компоненти ШПРОУ та показано основні зв'язки між ними. АСУ парогенератора подає сигнали про аварію і передвідмовний стан на контролер, тим часом датчики з головної магістралі надсилають сигнали щодо температурної складової та тиску пари. У разі виникнення аварій ЦП ШПРОУ надсилає сигнал на аварійний клапан про перекриття магістралі та на клапан перемикавання пари для спрямування потоку пари на іншу лінію. Відкриття дросельної заслінки сприяє переходу пари по трубопроводу байпасування пари на теплообмінник ШПРОУ звідки виходить охолоджена вода.

Запропонований алгоритм роботи ШПРОУ відображений на рис. 3. На початку роботи ШПРОУ здійснюється перевірка каналів інформаційного обміну із зовнішніми системами СУ генератора і споживачів пари, якщо сигнал про аварію підтверджено система подає командний сигнал на відкриття

аварійних клапанів випуску пари. У разі негативної відповіді щодо аварії перевіряється система на передвідмовний стан, якщо є такий сигнал система подає інформаційний сигнал СУ споживачам пари про початок підготовчого циклу, у разі відсутності сигналу про передвідмовний стан здійснюється вимірювання Р,Т,У. потоку пари, обчислювання поточного значення $E_{\Pi}(t_i)$, $E'_{\Pi}(t_i)$, $E''_{\Pi}(t_i)$. На основі отриманих значень перевіряється умова $E''_{\Pi}(t_i) > 0$ у разі ствердження приймаємо, що $E'_{\Pi}(t_i) = E''_{\Pi}(t_i) \times \Delta t$, за умови спростування приймаємо, що $E'_{\Pi}(t_i) = E_{\Pi}(t_i)$. Таким чином отримуємо рівняння $t_{кр} = \Delta E(t_i) / E'_{\Pi}(t_i)$ на основі отриманих значень перевіряємо умову $t_{кр} > t_{ВПД} + t_3$?, якщо умову підтверджено здійснюється кінець циклу. У разі заперечення подається інформаційний сигнал СУ споживачам пари про початок підготовчого циклу, інформаційний сигнал СУ генератора пари про початок підготовчого циклу та здійснюється кінець циклу.

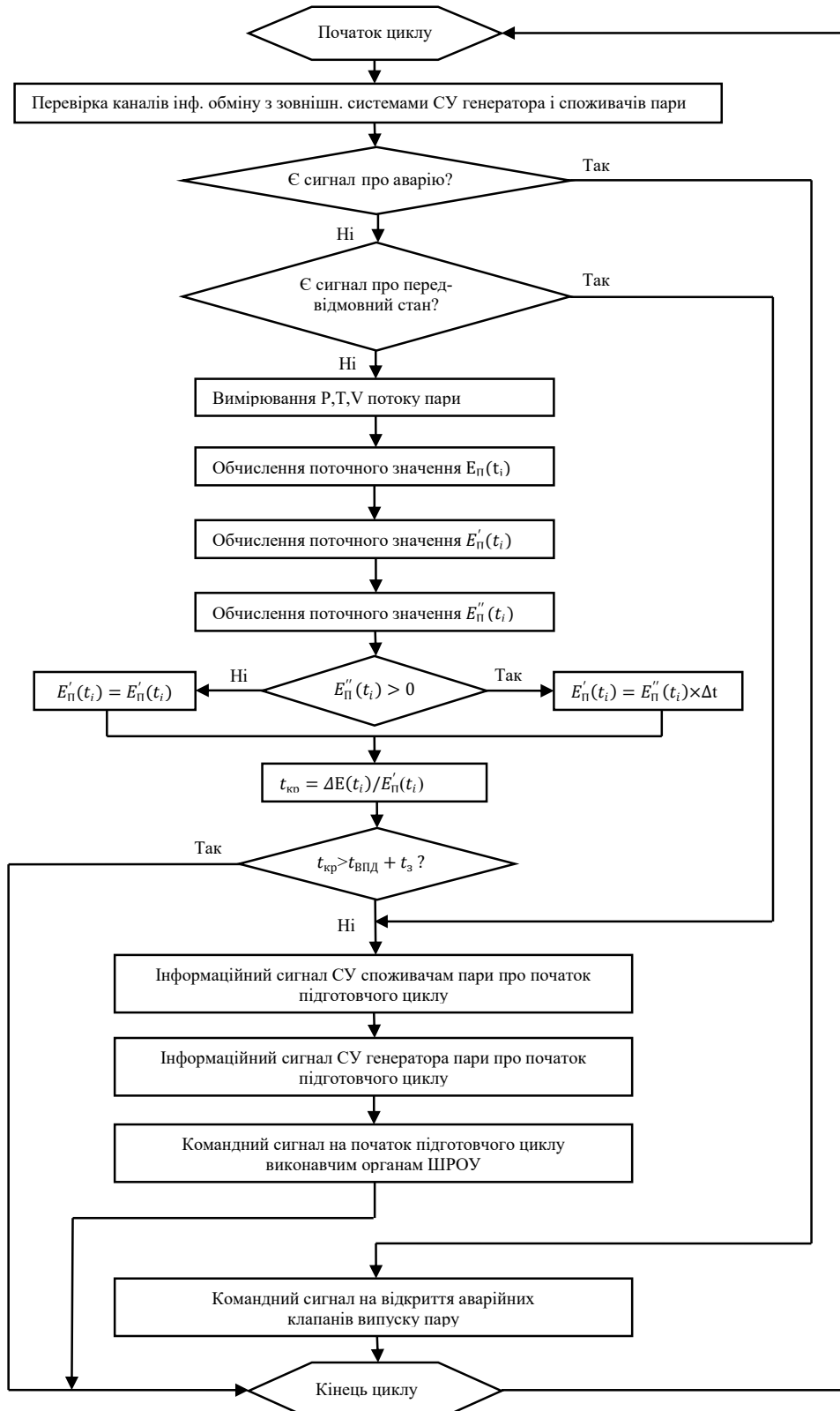


Рис. 3. Спрощений алгоритм роботи системи керування ШПРОУ з випереджаючим прогнозом

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку

У даній системі пропонується принципово нова стратегія керування системою швидкодіючою редукційно-охолоджувальною установкою, а також іншими технічними системами аналогічного призначення, від яких вимагається швидка реакція. А саме, пропонується замість **реактивного** керування, тобто керування *postfactum*, з генерацією командних сигналів **після** настання надзвичайної події, перейти до **активного** керування, тобто керування за **випереджуючим прогнозом**. Воно має ґрунтуватися на виявленні **передвідмовного стану** системи, який являє собою таку сукупність параметрів системи, що з певним ступенем імовірності свідчить про можливість настання надзвичайної події протягом заданого, кінцевого проміжку часу. В якості єдиного критерію визначення передвідмовного стану обрано повну енергію потоку пари, яка обчислюється за результатами вимірювань швидкості потоку, парціального тиску та температури перегрітої пари. В якості напрямків подальшого розвитку даної теми автор вбачає уточнення викладених алгоритмів та детальне дослідження взаємодії систем керування ШРОУ та основної (наприклад, енергогенеруючої) системи.

Література

1. Левадный В.А. Устройство для понижения давления и температуры пара / В.А. Левадный, В.Н. Сорокин, В.П. Кашеев // Труды международного семинара по конверсионной технике, Минск, 17–22 мая 1999 г. : в 2 ч. – Минск, 1999. – Ч. 1. – С. 312–315.
2. Имамова Л.М. О целесообразности замены редукционно-охлаждающей установки турбиной с целью повышения эффективности использования пара / Л.М. Имамова, Р.М. Саитов // Символ науки : Международный научный журнал. – 2016. – № 11-3. – С. 68–72.
3. Новиков С.И. Оптимизация автоматических систем регулирования тепло-энергетического оборудования / С.И. Новиков. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2006. – 108 с.
4. Новиков С.И. Практическая идентификация динамических характеристик объектов управления теплоэнергетического оборудования / С.И. Новиков. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2004. – 64 с.
5. Плетнёв Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике / Г.П. Плетнёв. – 4-е изд., стереот. – М. : Издательский дом МЭИ, 2007. – 352 с., ил.
6. Кулаков Г.Т. Комплексная методика оптимизации параметров динамической настройки регуляторов впрысков / Г.Т. Кулаков, М.Л. Горельшева // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 2009. – № 3. – С. 59–66.
7. Нечипоренко О.В. Дослідження системи управління і захисту реактора атомних електростанцій / О.В. Нечипоренко, О.Я. Волошанюк / Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2019) : матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції (м. Дніпро, 6–8 листопада 2019 року) / Міністерство освіти і науки України, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет». – Дніпро : Баланс-клуб, 2019. – С. 216–217.
8. Пат. 0002581996 Российская Федерация. Способ раскрутки-торможения колёс шасси / Ф.Р.Исмагилов, В.Е. Вавилов, В.И. Бекузин и др. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Уфимский государственный авиационный технический университет". – № 216.015.342D ; опубл. 20.04.16.
9. Схема РОУ ЧЗЭМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://images.app.goo.gl/TCMwSvjR2o5DWCVC8>.
10. Буланін В.А. Алгоритм аналізу енергоефективності джерела теплоснабження / В.А. Буланін // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2019. – № 9. – С. 54–62.
11. Active Suppression of Low-frequency Interference Currents by Implementation of the High-performance Control System for the Grid-interfaced Converters. Nenad Težak, Ivan Bahun, Ivan Petrović. *Automatika – Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, 2012, vol. 53, no. 2, pp. 199–214.

References

1. Levadnyj V.A. Ustrojstvo dlya ponizheniya davleniya i temperatury para / V.A. Levadnyj, V.N. Sorokin, V.P. Kasheev // Trudy mezhdunarodnogo seminaru po konversionnoj tehnike, Minsk, 17–22 maya 1999 g. : v 2 ch. – Minsk, 1999. – Ch. 1. – S. 312–315.
2. Imamova L.M. O celesoobraznosti zameny redukcionno-ohladiatelnoj ustanovki turbinoj s celyu povysheniya effektivnosti ispolzovaniya para / L.M. Imamova, R.M. Saitov // Simvol nauki : Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal. – 2016. – № 11-3. – S. 68–72.
3. Novikov S.I. Optimizaciya avtomaticheskix sistem regulirovaniya teplo-energeticheskogo oborudovaniya / S.I. Novikov. – Novosibirsk : Izd-vo NGTU, 2006. – 108 s.
4. Novikov S.I. Prakticheskaya identifikaciya dinamičeskix harakteristik obektov upravleniya teploenergetičeskogo oborudovaniya / S.I. Novikov. – Novosibirsk : Izd-vo NGTU, 2004. – 64 s.
5. Pletnyov G.P. Avtomatizaciya tehnologičeskix processov i proizvodstv v teploenergetike / G.P. Pletnyov. – 4-e izd., stereot. – M. : Izdatelskij dom MEI, 2007. – 352 s., il.
6. Kulakov G.T. Kompleksnaya metodika optimizacii parametrov dinamicheskoj nastrojki reguljatorov vpryskov / G.T. Kulakov, M.L. Gorelysheva // Energetika... (Izv. vyssh. ucheb. zavedenij). – 2009. – № 3. – S. 59–66.
7. Nechiporenko O.V. Doslidzhennia systemy upravlinnia i zakhystu reaktora atomnykh elektrostantsii / O.V. Nechiporenko, O.Ia. Voloshaniuk / Kompiuterne modeliuvannia ta optymizatsiia skladnykh system (KMOSS-2019) : materialy V Mizhnarodnoi naukovotekhnichnoi konferentsii (m. Dnipro, 6–8 lystopada 2019 roku) / Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy, Derzhavnyi vyshchyi navchalnyi zaklad «Ukrainskyi derzhavnyi khimiko-tehnolohichniy universytet». – Dnipro : Balans-klub, 2019. – S. 216–217.

-
8. Pat. 0002581996 Rossijskaya Federaciya. Sposob raskrutki-tormozheniya kolyos shassi / F.R. Ismagilov, V.E. Vavilov, V.I. Bekuzin i dr. ; zayavitel i patentoobladatel Federalnoe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego professionalnogo obrazovaniya "Ufimskij gosudarstvennyj aviacionnyj tehničeskij universitet". – № 216.015.342D ; opubl. 20.04.16.
9. Shema ROU ChZEM [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa : <https://images.app.goo.gl/TCMwSvjR2o5DWCVC8>.
10. Bulanin V.A. Algoritm analiza energoeffektivnosti istochnika teplosnabzheniya / V.A. Bulanin // Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova. – 2019. – № 9. – S. 54–62.
11. Active Suppression of Low-frequency Interference Currents by Implementation of the High-performance Control System for the Grid-interfaced Converters. Nenad Tezak, Ivan Bahun, Ivan Petrovic. *Automatika – Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, 2012, vol. 53, no. 2, pp. 199–214.

Надійшла / Paper received : 07.11.2020 Надрукована/Printed :27.11.2020