DOI 10.31891/2307-5732-2020-291-6-131-140
УДК 681.5

О.Я. ВОЛОШАНЮК, О.В.НЕЧИПОРЕНКО
Черкаський державний технологічний університет

СИНТЕЗ ПОДОБИ ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКОДІЮЧОЮ РЕДУКЦІЙНО-ОХОЛОДЖУВАЛЬНОЮ УСТАНОВКОЮ

Анотація. У статті розглянуто проблему швидкості реакції системи керування швидкодіючої редукційно-охолоджувальної установки пари у енергогенеруючій галузі і хімічній промисловості. Запропоновано стратегію керування процесом за випереджуючим 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 редукційно-охолоджувальна установка, енергогенеруюча галузь, керування процесом за випереджуючим прогнозом, передвідмовний стан, алгоритм системи керування.

O. VOLOSHANIUK, O. NECHYPORENKO
Cherkasy State Technological University

THE SYNTHESIS OF THE QUICK-RESPONSE REDUCTION-COOLING DEVICE'S CONTROLSYSTEM

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, редукційно-охолоджувальні установки (РОУ) та швидкодіючі редукційно-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 повітронагнітачів, 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 редукція 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 аварій 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 редукційно-охолоджувальних установок, ряд публікацій, окрім низької швидкодії взагалі, нарікають іще 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 кільця 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 к 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, в залежності 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 енергії 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, як:

$$\sigma_{ВЫХ}^{(p=const)} = \sigma_{ВЫХ}^{(p=\text{var})} + K_{РЕГ}^{(ВЫХ)}(s)\Delta X_{РЕГ}^{p=const)}, \quad (1)$$

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

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

$K_{РЕГ}^{(ВЫХ)}$ – передаточна функція вихідного параметра відносно регулювального діяння;

$X_{РЕГ}^{p=const)}$ – зміна параметра при даному регулювальному діянні системи регулювання тиску перед споживачем. Для оцінки якості регулювання у [3] пропонується інтегральний критерій:

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

де σ – регульований параметр.

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

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

Для ПІД-регуляторів $T_{сопт} \approx \tau$, з допуском $T_{сопт} \approx (0{,}75...2)\tau$

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

$$y = \frac{Ke^{-\tau_0 S}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_i s + 1)} \quad (3)$$

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

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

де $K_1,\ K_2 > 0$, якщо $T_2 > T_1$

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

$$G_0 = \frac{N_e}{\sum \alpha_j H_i \eta_T \eta_Г} \tag{5}$$

де N_e - задана електрична потужність турбогенератора;

$\eta_T, \eta_Г$ – механічний ККД турбіни і генератора;

$\alpha_j,\ H_i$ – внутрішня робота на 1 кг свіжої пари

На виході з котла:

$$G_{ПП} = \alpha_K G_0 \tag{6}$$

де $\alpha_K \approx 1 + \alpha_y (\alpha_y \approx 0{,}02)$

Рівняння теплового навантаження котла:

$$Q_K = G_{ПП}(h_0 - h_{ПВ}) + G_{ВП}(h^T - h^0_{ВП}) \tag{7}$$

Рівняння витрати тепла на турбоустановку:

$$Q_T = G_T(h_0 - h_{ПВ}) + G_{ВП}(h^T - h^0_{ВП}) \tag{8}$$

де $h^T - h^0_{ВП}$ – різниця ентальпій до і після вторинного перегріву

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

$$W_P(p) = \frac{k_p(T_i p + 1)(T_Д p + 1)}{T_i p} \tag{9}$$

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

$$W_Д(p) = \frac{k^*_Д T^*_д p}{(T^*_д p + 1)(T_1 p + 1)} \tag{10}$$

де $k^*_Д = 1/k_p;\ T^*_д = T^*_i;\ T_1 = T_Д$;

$k^*_Д$ - коефіцієнт передачі; $T^*_д$ - 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 ШРОУ. В той же час жодне рішення практично не здатне якісно поліпшити швидкодію ШРОУ у аварійній ситуації. І, нарешті, зовсім не враховується та обставина, що стрибкоподібний приріст енергії, яка видається ШРОУ при байпасуванні потоку пари може мати руйнівне діяння на споживачів ШРОУ. Цілком очевидним є той факт, що, по-перше, споживачі потоку пари, що обробляється у ШРОУ, **потребують певного проміжку часу** для підготовку 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 ШРОУ, алгоритмів роботи і складу системи ШРОУ, які б дозволили скоротити, або навіть звести до нуля запізнення в часі (щодо настання надзвичайної події) процесу підготовки споживачів потоку пари, продукованого ШРОУ, 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 ШРОУ ми розглядатимемо, як систему аварійного скидання надлишку енергії. Подібні системи характеризуються сімома режимами роботи :

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

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

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

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

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

Вище система ШРОУ 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 ас. 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 ШРОУ. Власне, постановка даного питання і його рішення складає наукову новизну даної статті. Бо у ШРОУ 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 ШРОУ 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 оди, або розкрутити кільце з водою, або ж виконати стартове розкручування турбіни. Отже, від моменту отримання аварійного сигналу і до виходу контуру ШРОУ на максимальний режим потрібен час від кількох секунд до десятків секунд — в залежності від технічного виконання і параметрів системи. Можна стверджувати, що мінімально можливий час спрацювання механічних компонентів системи ШРОУ 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" ШРОУ за потоком.

Очевидно, що класичними методами дана проблема не вирішується, отже потрібен якийсь новий підхід. Проаналізувавши загальну схему керування ШРОУ, ми бачимо що вона має яскраво виражений **реактивний** характер. Тобто, спочатку відбувається якась надзвичайна ситуація, і тільки після цього обчислювальний блок ШРОУ розпізнає цю ситуацію і її характер, генерує відповідні командні сигнали і надсилає їх на виконавчі механізми, які спрацьовують 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 розпочаті **до моменту настання аварійної ситуації**. За аналог цього узято 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 ШРОУ, 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 потокові 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 ШРОУ 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 ШРОУ.

Проте, при втіленні цього принципу в авіації, на відміну від системи ШРОУ, 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 ШРОУ, 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 ШРОУ. Подія без передвідмовного стану вимагає застосування аварійного алгоритму роботи ШРОУ. Згідно з яким, перш за все виконуються дії по запобіганню аварії/катастрофи: відкриття аварійних клапанів, тощо — змирившись із тим, що частина енергії при цьому буде втрачена незворотньо. 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 ШРОУ, розпочинається утилізація енергії.

У свою чергу, передвідмовні стани поділяються на такі, що можуть бути викриті власними інструментальними засобами системи ШРОУ, і такі, що можуть бути викриті зовнішніми засобами — з передачею отриманих параметрів до ШРОУ. Це викликано тим, що за своєю суттю ШРОУ 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 ШРОУ може не існувати, як окрема підсистема, а бути однією з функцій загальної

системи керування. Проте різниця в даному випадку не є принциповою. Припустимо, що ШРОУ являє собою автономну підсистему. В такому випадку ШРОУ складатиметься з таких компонентів: обчислювальний блок, комплект датчиків, приводи виконавчих механізмів, канали інформаційного обміну з центральною системою керування та іншими підсистемами. Принципова схема ШРОУ показана на рис. 1.

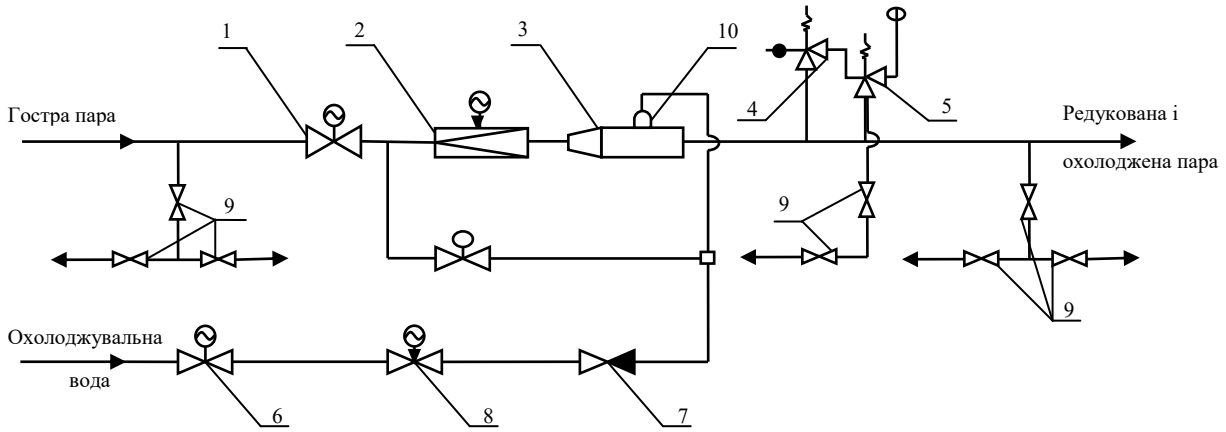

Рис. 1. Схема ШРОУ класичного типу:
1 - заслінка; 2 - клапан дросельний, 3 – охолоджувач пари; 4 - клапан імпульсний; 5 - ГПК, 6, 9 – клапани запирання 7 - клапан зворотній; 8 - клапан регулювальний. 10 - форсунка механічного розпилювання води [9]

Ключовим моментом у запропонованому рішенні є вибір раціонального алгоритму викриття передвімовного 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 потягти 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 ШРОУ 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 ШРОУ по каналах інформаційного обміну. Це стосується як стану системи умовно “вище” ШРОУ, тобто енергогенеруючої складової (котла, реактора, тощо), так і споживачів енергії пари умовно “нижче” ШРОУ (паротурбінних агрегатів, тощо). Предметом даної статті є параметри робочого процесу, які вимірюються власними датчиками ШРОУ, 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 $E_{П}$, яке дорівнює гранично припустимому значенню $E_{ПР} = (V, T, P)$, що є верхньою межею нормального експлуатаційного діапазону, де V швидкість, Т - температура, а $P_{ПАР}$ — парціальний тиск потоку газів. На кожному кроці часу мають обчислюватися такі параметри: різниця ΔE між гранично припустимим $E_{ПР}$ і поточним $E_{П}(t_i)$ значеннями повної енергії потоку пари:

$$\Delta E = E_{ПР} - E_n(t_i), \tag{11}$$

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

$$E^{'} = \frac{dE_{ПР}}{dt} \approx \frac{\Delta E_{П}}{\Delta t} = \frac{E_{П}(t_i) - E_{П}(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} \tag{12}$$

Друга похідна функції повної енергії за часом:

$$E^{''} = \frac{dE^{'}_{ПР}}{dt} \approx \frac{\Delta E^{'}_{П}}{\Delta t} = \frac{E^{'}_{П}(t_i) - E^{'}_{П}(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} \tag{13}$$

Енергетичний баланс обчислюється згідно [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_T, наданою парі в процесі її перегрівання.

Потік кінетичної енергії визначається загальновідомою формулою

$$E^{'}_{k} = \frac{V\rho V^2}{2S} \tag{14}$$

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

Потік потенційної енергії обчислюється, як

$$E^{'}_{p} = V \times p\,, \tag{15}$$

де p – парціальний тиск пари.

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

$$q_П = \int_{t_H}^{t} c_p dt = h - h^{'} = u - \ddot{u} + P(v - \ddot{v}) \tag{16}$$

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

Далі перевіряємо знак другої похідної $E^{''}_{П}$ величини повної енергії. Якщо $E^{''}_{П} > 0$, вважаємо, що надалі швидкість зміни повної енергії $E^{'}_{П}(t_i) = E^{''}_{П}(t_i) \times \Delta t$. Якщо ж $E^{''}_{П} < 0$, 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:

$$t_{КР} = \frac{\Delta E(t_i)}{E^{'}_{П}(t_i)} \tag{17}$$

Обчислене значення $t_{КР}$ порівнюється з мінімальним часом виконання підготовчих дій $t_{ВПД}$ що є технічною характеристикою ШРОУ. У випадку, якщо в момент часу $t_П$ обчислене значення $t_{КР} = t_{ВПД} + t_З$, де $t_З$ — обраний час запасу (заздалегідь визначений резерв часу на затримку з прийняттям рішення, тощо), цей момент часу вважатиметься моментом початку підготовчих дій. В момент $t_П$ система керування ШРОУ 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 ШРОУ — в разі, якщо вони теж потребують виконання послідовності підготовчих дій перед прийняттям пари по каналу ШРОУ. Для запобігання ударних навантажень та стрибків потоку енергії вже в момент часу $t_П$ або ж у довільний момент часу $t = t_П + \sigma$, де $\sigma \le t_{ВПД}$, **тобто іще до настання надзвичайної події,** і відповідно до обраного алгоритму, може

розпочатися байпасування пари через ШРОУ, з поступовим збільшенням потоку від нульового до максимального значення. Цим досягається те, що графік зміни енергії пари, яку отримує споживач ШРОУ, буде максимально пологим, і не призведе до аварійної ситуації у споживача. Водночас система керування ШРОУ 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 ШРОУ згенерує командні сигнали на виконання завершальних дій: плавне зменшення потоку пари через ШРОУ та вимкнення виконавчих механізмів ШРОУ (перекриття системи впорскування води, закриття клапанів, тощо). Якщо система керування ШРОУ отримуватиме від датчиків вимірювання параметрів сигнали про стабілізацію таких параметрів у прийнятних межах протягом заздалегідь визначеного проміжку часу, система керування ШРОУ також згенерує командні сигнали на виконання вищезазначених завершальних дій. Гіпотетична функціональна схема ШРОУ зображена на рис. 2.

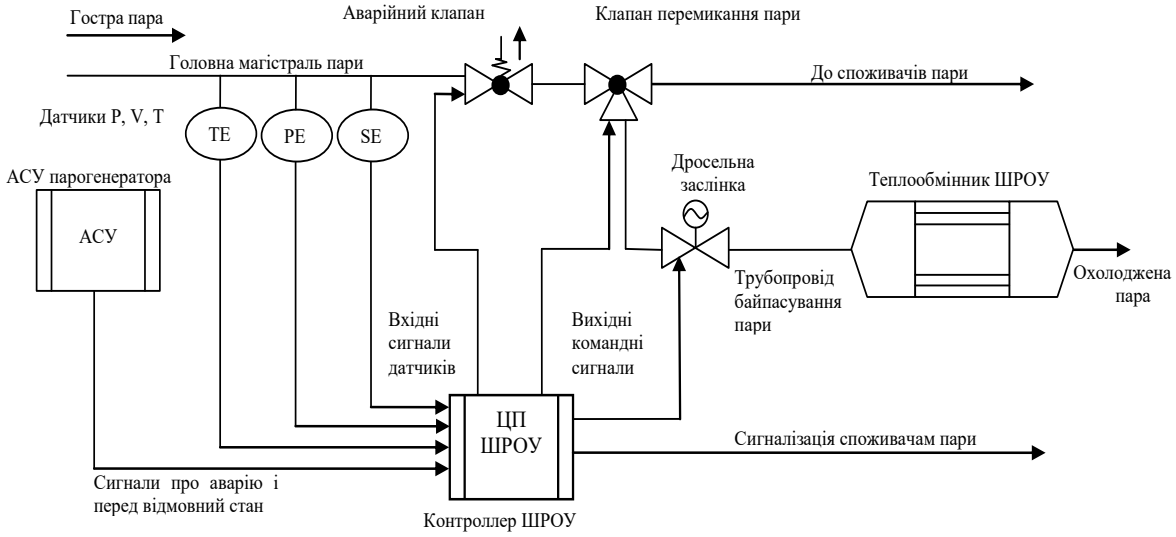

Рис. 2. Функціональна схема ШРОУ (варіант)

На схемі наведено головні компоненти ШРОУ 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 ШРОУ надсилає сигнал на аварійний клапан про перекриття магістралі та на клапан перемикання пари для спрямування потоку пари на іншу лінію. Відкриття дросельної заслінки сприяє переходу нари по трубопроводу бай пасування пари на теплообмінник ШРОУ звідки виходить охолоджена вода.

Запропонований алгоритм роботи ШРОУ відображений на рис. 3. На початку роботи ШРОУ 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 P.T.V. потоку пари, обчислювання поточного значення $E_{П}(t_i)$, $E^{'}_{П}(t_i)$, $E^{''}_{П}(t_i)$. На основі отриманих значень перевіряється умова $E^{''}_{П}(t_i) > 0$ у разі ствердження приймаємо, що $E^{'}_{П}(t_i) = E^{''}_{П}(t_i) \times \Delta t$, за умови спростування приймаємо, що $E^{'}_{П}(t_i) = E^{'}_{П}(t_i)$. Таким чином отримуємо рівняння $t_{КР} = \dfrac{\Delta E(t_i)}{E^{'}_{П}(t_i)}$ на основі отриманих значень перевіряємо умову $t_{КР} > t_{ВПД} + t_З$, 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.

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.

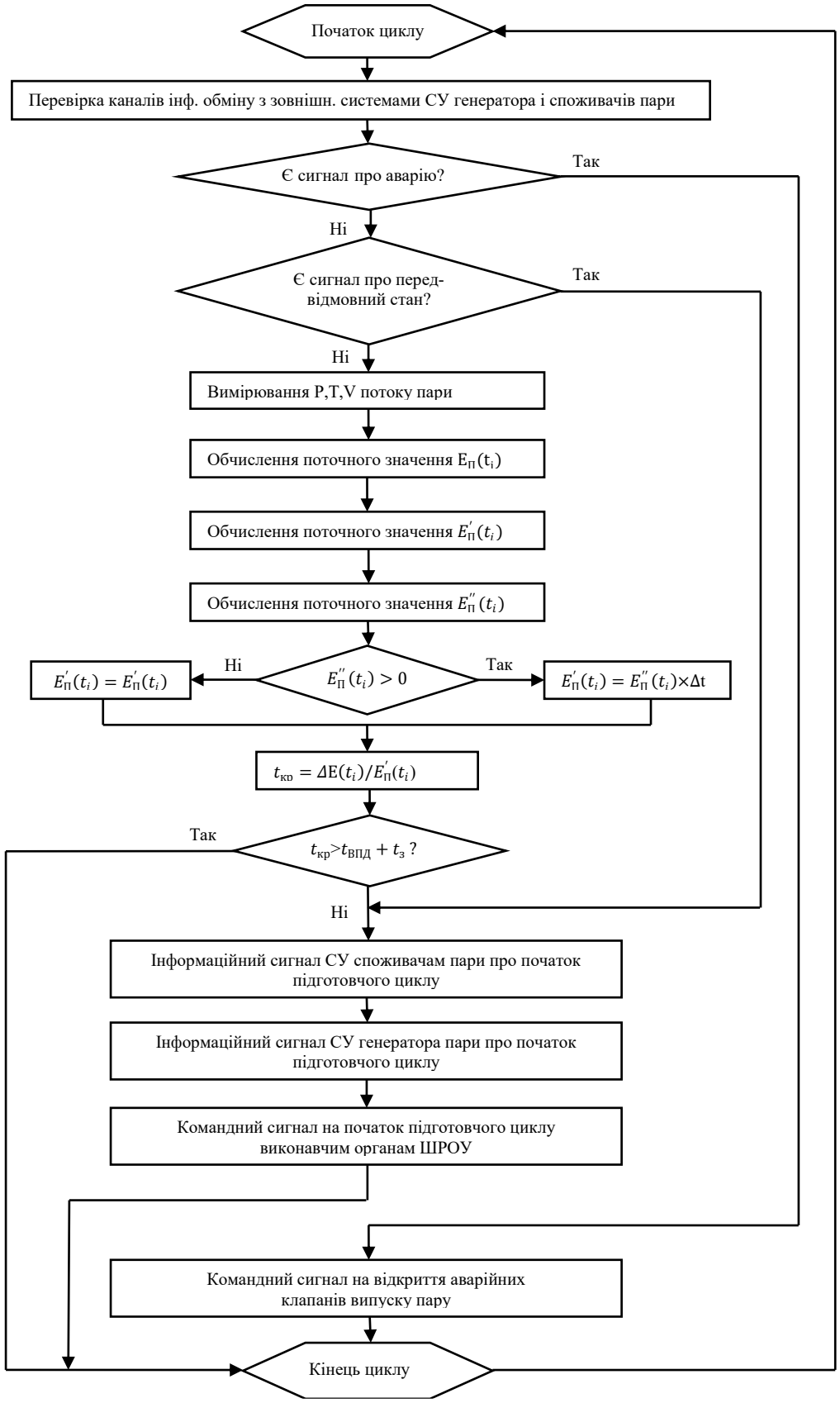

Рис. 3. Спрощений алгоритм роботи системи керування ШРОУ з випереджаючим прогнозом

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. Кащеев // 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-охладительной 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. Горелышева // 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 [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://images.app.goo.gl/TCMwSvjR2o5DWCVC8. — Назва з екрану.

10. Буланин В. А. Алгоритм анализа энергоэффективности источника теплоснабжения / Буланин В. А. // 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. Levadnyy V. A. Ustroystvo dlya ponizheniya davleniya i temperatury para / V. A. Levadnyy, V. N. Sorokin, V. P. Kashcheyev // Trudy mezhdunarodnogo seminara po konversionnoy tekhnike. Minsk. 17–22 maya 1999 g.: v 2 ch. — Minsk, 1999. — Ch. 1. — S. 312–315.

2. Imamova L. M. O tselesoobraznosti zameny reduktsionno-okhladitelnoy ustanovki turbinoy s tselyu povysheniya effektivnosti ispolzovaniya para / L. M. Imamova, R. M. Saitov // «Simvol nauki»: Mezhdunarodnyy Nauchnyy Zhurnal. — 2016. — №11-3. — S. 68-72.

3. Novikov. S. I. Optimizatsiya avtomaticheskikh sistem regulirovaniya teplo-energeticheskogo oborudovaniya / S. I. Novikov. — Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2006. — 108 s.

4. Novikov S. I. Prakticheskaya identifikatsiya dinamicheskikh kharakteristik obyektov upravleniya teploenergeticheskogo oborudovaniya / S. I. Novikov. — Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2004. — 64 s.

5. Pletnev G. P. Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv v teploenergetike / G. P. Pletnev. — 4-e izd.. stereot. — M.: Izdatelskiy dom MEI. 2007. — 352 s., il.

6. Kulakov G. T. Kompleksnaya metodika optimizatsii parametrov dinamicheskoy nastroyki regulyatorov vpryskov / G. T. Kulakov, M. L. Gorelysheva // Energetika… (Izv. vyssh. ucheb. zavedeniy). — 2009. — № 3. — S. 59-66.

7 Nechiporenko O.V. Research of control system and protection of reactor of nuclear power plants / OV Nechiporenko. Nechiporenko, O.Ya. Voloshanyuk / Computer Modeling and Optimization of Complex Systems (KMOSS-2019): Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference (Dnipro, November 6-8, 2019) / Ministry of Education and Science of Ukraine, State Higher Educational Institution "Ukrainian State Chemist -technological university ". - Dnipro: Balance Club, 2019. - P. 216-217

8. Pat. 0002581996 Rossiyskaya Federatsiya. Sposob raskrutki-tormozheniya koles shassi / F. R. Ismagilov, V. E. Vavilov, V. I. Bekuzin i dr.; zayavitel i patentoobladatel Federalnoye gosudarstvennoye byudzhetnoye obrazovatelnoye uchrezhdeniye vysshego professionalnogo obrazovaniya "Ufimskiy gosudarstvennyy aviatsionnyy tekhnicheskiy universitet". — №216.015.342D ; opubl. 20.04.16.

9. Skhema ROU ChZEM [Elektronniy resurs]. — Rezhim dostupu: https://images.app.goo.gl/TCMwSvjR2o5DWCVC8. — Nazva z ekranu.

10. Bulanin V. A. Algoritm analiza energoeffektivnosti istochnika teplosnabzheniya / Bulanin V. A. // Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova. — 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 Težak, Ivan Bahun, Ivan Petrović // Automatika – Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications, 2012, vol. 53, no. 2, pp. 199-214.

Надійшла / Paper received : 27.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.