

## ТЕПЛОТЕХНІКА ТА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УДК 681.5.09

© Ковриго Ю.М.<sup>1</sup>, Саков Р.П.<sup>2</sup>

### ПИТАННЯ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ВИКОНАВЧИХ МЕХАНІЗМІВ І РЕГУЛЮЮЧИХ ОРГАНІВ В СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ КОТЛОАГРЕГАТОМ

*Виконано огляд проблеми наявності нелінійностей в системах керування котлоагрегатом. Сфокусовано увагу на проблемі моделювання роботи виконавчих механізмів та регулюючих органів в системах автоматичного керування. Розглянуто моделі ланок «насичення», «реле з зоною нечутливості», «люфт», «в'язке тертя», «сухе тертя» («залипання»). Проведено аналіз існуючих моделей з урахуванням даних сухого тертя і сформовано рекомендації щодо їх використання.*

**Ключові слова:** нелінійні системи автоматичного керування, люфт, сухе тертя.

*Ковриго Ю.М., Саков Р.П. Вопрос моделирования работы исполнительных механизмов и регулирующих органов в системе управления котлоагрегатом. Выполнен обзор проблем наличия нелинейностей в системах управления котлоагрегатом. Сфокусировано внимание на проблеме моделирования работы исполнительных механизмов и регулирующих органов в системах автоматического управления. Рассмотрено модели звеньев «насыщение», «реле с зоной нечувствительности», «люфт», «вязкое трение», «сухое трение» («залипание»). Проведен анализ существующих моделей с учетом данных сухого трения и сформулированы рекомендации относительно их использования.*

**Ключевые слова:** нелинейные системы автоматического управления, люфт, сухое трение.

*Y.M. Kovrygo, R.P. Sakov. Maintaining of actuators and final control elements modeling in a steam generating unit control system. Steam generating unit automation control system is a complex system with many sources of nonlinearities. There are two main types of nonlinearities in a steam generating unit automation control system. First, nonlinearity caused by a control object nonstationarity due to changes of operation modes and changes of object parameters with time. Second, nonlinearities caused by control system elements. Analysis of nonlinearities in steam generating unit automatic control system has been done. Attention is focused on the problem of modelling the actuators and final control element in automatic control systems. Models of saturation, relay with dead zone, backlash, viscous friction and dry friction have been studied. The available models taking into account dry friction data have been analyzed and recommendations as to applying them have been made. Operating data from the Power Block №4 automation control system of the Trypilska thermal power station have been processed. The steam generation unit control parameters of steam and water circuits for the four lines (A, B, V, G) were examined. They are temperature and pressure of steam and water in different points of steam and water circuits and the controller output signals. The relationship of a controlled parameter and time and the relationship of a controlled parameter and the controller output have been examined. Some control contours that may suffer from nonlinearity in an actuator or in a final control element were identified.*

**Keywords:** nonlinear automatic control systems, backlash, friction.

<sup>1</sup> канд. техн. наук, професор, НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, [yukovrygo@gmail.com](mailto:yukovrygo@gmail.com)

<sup>2</sup> аспірант, НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, [roman.sakov@gmail.com](mailto:roman.sakov@gmail.com)

**Постановка проблеми.** Управління теплоелектростанцією на сьогодні – високо інтегрований процес, який включає в себе десятки і навіть сотні контурів керування. Задача кожного контуру підтримувати процес на заданих робочих параметрах безпечно та ефективно. Неякісна робота контуру керування може призвести до порушення ходу технологічного процесу, зменшити якість кінцевого виробу, підвищити витрату енергії та ресурсів, що зменшує прибутковість підприємств. Дослідження методів підвищення якості перехідних процесів та факторів, що можуть погіршувати ефективність роботи автоматичних систем керування на об'єктах теплоенергетики, є актуальною науковою і практичною задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Велику увагу при розробці систем автоматичного керування для теплоенергетичних об'єктів, а саме для котлоагрегатів теплоелектростанцій, приділяється урахуванню нелінійностей. Значна частка досліджень присвячена боротьбі з нелінійностями, пов'язаними з нестационарністю об'єкта керування. При цьому використовуються адаптивні системи, наприклад, в [1] розглядається адаптивний комплекс на основі каскадної системи з моделлю об'єкта, в [2] розглянуто адаптивні системи автоматичного керування для теплоенергетичних об'єктів. Є запропоновані та впроваджені рішення з використанням динамічних коректорів [3]. Також пропонуються використання робастних регуляторів, як, наприклад, в [4] регулятор з внутрішньою моделлю.

Дещо менше розглядаються проблеми, пов'язані з нелінійностями, що виникають в регулюючих органах та виконавчих механізмах. В [5] розглядаються проблеми регулювання при наявності обмежень та наведено приклади їх вирішення. В [6] наводяться приклади моделювання роботи автоматичних систем керування (АСК) при наявності обмежень. Автори даної статті також займалися питанням вибору типу елемента «зона нечутливості» та його впливу на роботу АСК теплоенергетичних об'єктів керування.

**Мета даної роботи.** Приблизно 20-30% всіх контурів керування містять коливання через проблеми, пов'язані з виконавчими механізмами та регулюючими органами такими як, сухе тертя («залипання»), люфти, гістерезис та зона нечутливості [7]. Отже, дослідження моделювання нелінійностей в роботі виконавчих механізмів і регулюючих органів є актуальною науковою задачею.

**Викладення основного матеріалу.** Найбільш розповсюджені в енергетиці виконавчі механізми (ВМ) – це електричні ВМ постійної швидкості на базі електродвигунів постійної швидкості та пневматичні ВМ. Таким ВМ, в залежності від їх характеристик, що визначаються як технологічно, так і технічним станом механізмів, характерні нелінійні властивості, що визначаються окремими нелінійними елементами або певною комбінацією нелінійних елементів. Статичні нелінійні елементи – це такі елементи системи автоматичного управління (САУ), вхідна змінна яких не залежить від швидкості зміни вхідної величини, до них відносяться: ланка типу «Обмеження» (1) (рис. 1, а), ланка «Реле з зоною нечутливості» (2) (рис. 1, б):

$$y(x) = \begin{cases} -c & \text{при } x \leq -b \\ \frac{c}{b} \cdot x & \text{при } |x| < b \\ c & \text{при } x \geq b \end{cases}, \quad (1)$$

$$y(x) = \begin{cases} -c & \text{при } x \leq -b \\ 0 & \text{при } x = 0 \\ c & \text{при } x \geq b \end{cases}, \quad (2)$$

де тут і далі  $y$  – вихід, а  $x$  – вхід моделі.

Динамічні нелінійні елементи – це такі елементи САУ, вхідна змінна яких залежить не тільки від величини вхідного впливу, а від швидкості його зміни, до них відносяться:

ланка типу «Люфт» (3) (рис. 1, в)

$$y(x) = \begin{cases} c & \text{при } \dot{x} < 0 \text{ и } \dot{y} = 0 \\ -c & \text{при } \dot{x} > 0 \text{ и } \dot{y} = 0 \\ k \cdot (x+b) & \text{при } \dot{x} < 0 \\ k \cdot (x-b) & \text{при } \dot{x} > 0 \end{cases}; \quad (3)$$

в'язке тертя (4)

$$F_{B.T.} = k \cdot v^2 \cdot \text{sign} V, \quad (4)$$

де  $V$  – швидкість руху об'єкта;  $k$  – коефіцієнт пропорційності. Напрямок  $F_{B.T.}$  протилежний руху об'єкта;

ланка типу «Сухе тертя», інший варіант «Залипання» (англ. stiction) (рис. 1, г), в самому простому варіанті може бути описана за допомогою функції (5)

$$F_{c.T} = -f \cdot \text{sign} V, \quad (5)$$

де  $f$  – визначає коефіцієнт сухого тертя.

Статична характеристика для елементів люфт, гістерезис, насичення та зона нечутливості наведено в [7] у вигляді графіків та формул.

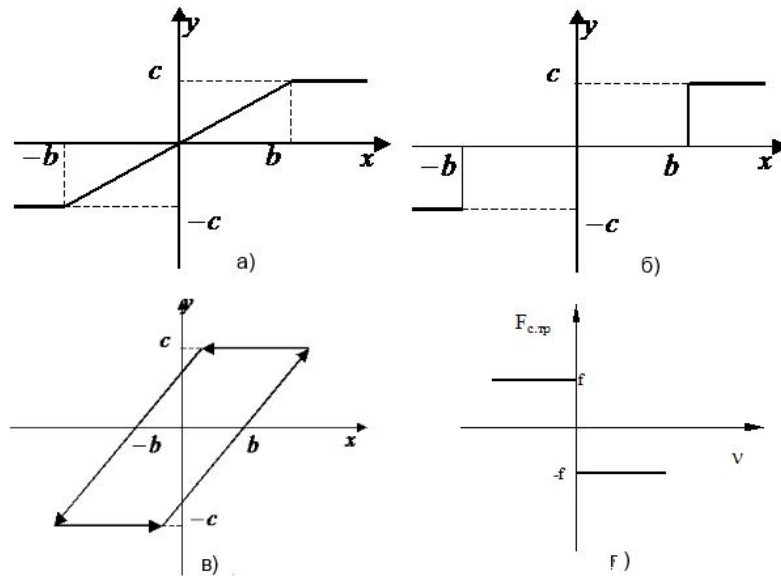


Рис. 1 – Статичні характеристики нелінійних ланок: а) – насичення, б) – реле з зоною нечутливості, в) – люфт, г) – сухе тертя

*Моделі сухого тертя.* Сухе тертя – найбільш розповсюджена проблема, що виникає при роботі пневматичних ВМ [8]. Модель сухого тертя, наведена вище, є дуже спрощеною і для відтворення реальної поведінки ВМ застосовуватися не може. Взагалі можна виділити два типи моделей сухого тертя: фізичні та моделі з урахуванням даних («data driven models»).

Фізичні моделі будуються на основі другого закону Ньютона. Велика кількість моделей була досліджена і запропоновано багато уточнень, що можуть враховувати різні фактори, такі, наприклад, як залежність сили тертя від часу, в якому ВМ знаходився в нерухомому стані. Вони потребують знання багатьох параметрів регулюючого клапана, таких як маса рухомих частин, сили тертя і т.д., які зазвичай не доступні або їх важко чи неможливо визначити. Такі моделі дають гарне розуміння процесів, що проходять при роботі ВМ, але при цьому вони дають загальне розуміння ефекту сухого тертя.

На практиці сухе тертя та зв'язані з ним явища простіше описуються процентами ходу регулюючого органу або інтервалом вхідного сигналу регулюючого органу. Моделі з урахуванням даних використовують параметри, які однозначно можна отримати з цих параметрів, є відносно простими, добре зрозумілими і зручними для моделювання. На рис. 2. [8, 9] зображено статичну характеристику РО з пневматичним ВМ.

Чаудхурі та інші в [9] визначають величини  $S$  (зона нечутливості (dead band) плюс складова сухого тертя (stick)) та  $J$  (скачок проковзування (slip jump)) для характеристики сухого тертя в РО. На рис. 2 вісь  $MV$  – положення РО, а  $OP$  – вихід регулятора. Так як положення РО і вихід регулятора зручно задавати у процентах, величини  $S$  та  $J$  також задаються в процентах, що дозволяє виконувати алгебраїчні операції без приведення величин. Параметри  $f_s$  (нормована

сила тертя Кулона) та  $f_d$  (нормована сила тертя Кулона/ кінетична/ статична) можуть бути зв'язні з  $S$  та  $J$  наступними виразами:

$$S = f_s + f_d, \quad J = f_s - f_d, \quad (6)$$

або:

$$f_s = \frac{S+J}{2}, \quad f_d = \frac{S-J}{2}. \quad (7)$$

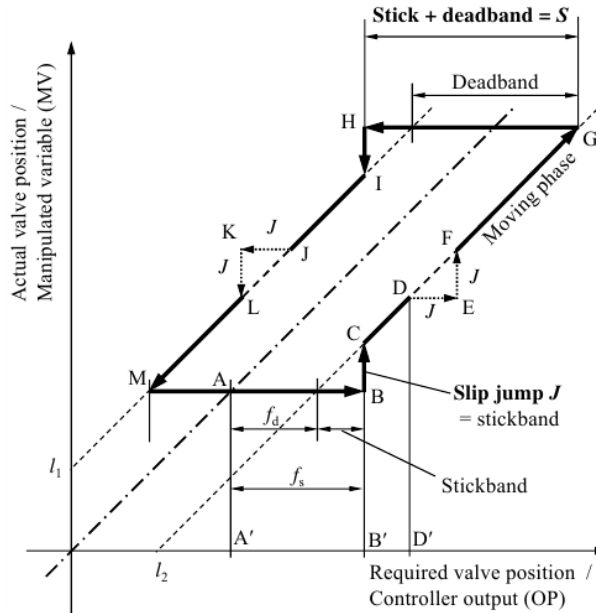


Рис. 2 – Статична характеристика залежності положення РО з пневматичним ВМ від виходу контролера [8, 9]

Моделі з урахуванням даних поділяються на моделі з одним параметром та моделі з двома параметрами. Модель сухого тертя з одним параметром представлена Стенманом [8]. Вона використовує лише один параметр, що виражає величину сухого тертя і подібна до формули (5). Така модель досить просто реалізується, але вона не враховує сукупну зміну вхідного сигналу ВМ на проміжку часу, в який відбувається зупинка РО, тому не може адекватно використовуватися, як динамічна модель ВМ з урахуванням даних.

Найбільш розповсюдженні моделі з урахуванням даних з двома параметрами. Вперше така модель була описана Чаудхурі в [10], а трохи пізніше була представлена модель Кано в [11], яка розроблена на основі моделі Чаудхурі. Обидві моделі представлені у вигляді блок схем та використовують параметри  $S$  та  $J$ . Через особливості програмної реалізації обидві моделі потребують для правильної роботи використання фільтрів перед подачею вхідного сигналу. Принципова відмінність між цими моделями полягає лише в рекомендованому до використання фільтрі: фільтр з ковзаючим середнім для моделі Кано і аперіодична ланка першого порядку, що описує повітряну камеру ВМ, для моделі Чаудхурі.

Модель, запропонована Хі в [12], має значно спрощену структуру у порівнянні з моделями Чаудхурі та Кано. В порівнянні з моделями Чаудхурі та Кано модель Хі більш точно описує поведінку ВМ. Але запропонована модель не враховує обмежень типу насичення ВМ, які враховуються моделями Чаудхурі і Кано.

Подальші розробки проводилися з метою отримання моделі з урахуванням даних, яка б максимально точно описувала поведінку фізичної моделі. Такі моделі отримані Хі: модель з трьома параметрами та частковий і окремий випадок модифікована модель з двома параметрами [8] (рис. 3), крім цього в літературі можна зустріти модель Сівагамасундари та Сівакумари [13]. Результати моделювання цих моделей є дуже подібними, і обидві моделі у якості параметрів використовують  $f_s$  та  $f_d$ . Можна говорити, що модифікована модель Хі на сьогодні найбільш точна і можна рекомендувати її використання для моделювання.

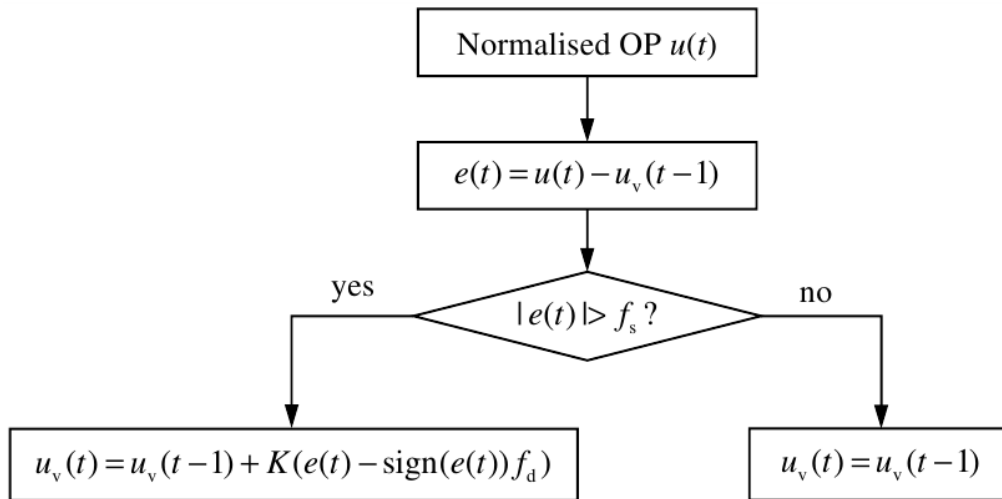


Рис. 3 – Блок схема модифікованої моделі з урахуванням даних сухого тертя  $X_i$  [14]

*Моделі люфтів.* Люфт можна виділити, як основну нелінійність електричних ВМ, яка не обумовлена конструктивними особливостями ВМ.

Модель ланки «Люфт» доступна у середовищі Matlab, як блок Simulink «Backlash». Але не можна вважати таку модель повною, оскільки вона не враховує динаміку ВМ та не описує зону нечутливості. Тому, розробка повноцінної моделі ВМ у вигляді моделі з урахуванням даних, що буде враховувати динаміку ВМ, зону нечутливості та люфт, є важливою задачею.

*Дослідження роботи АСК ТЕС.* Було проведено збір оперативних даних на 4 енергоблоці Трипільської ТЕЦ. Розглядалися наступні параметри: температура за вприском регулятора вприскуючого РВ-2, температура за ширмовим пароперегрівачем ШПП, температура за вприском РВ-3, температура за конвективним пароперегрівачем високого тиску КПП ВД, тиск води до регулюючого живильного клапану РПК живильного турбонасоса ПТН, витрата води через РПК, температура змішування РПП, температура за конвективним пароперегрівачем низького тиску КПП НД 2 ст., температура нижньої радіаційної частини НРЧ, температура верхньої радіаційної частини ВПЧ, температура за поточним пароперегрівачем ШПП, витрата пари за ВРЧ (всі параметри по ниткам А, Б, В, Г).

Для дослідження контурів регулювання, що страждають від нелінійностей типу залипання, використовуються залежності: вихід регулятора (ВР) – положення РО, ВР – керована величина (КВ), час – КВ. Найбільш показовою є залежність ВР - положення РО, але для досліджуваного об'єкту не доступні данні по положенню РО, а фіксуються лише ВР. Тому досліджувалися залежності ВР – КВ.

Графіки КВ – ВР для температури за ШПП (рис. 4) та температури за вприском РВ-2 (рис. 5) мають характерну для контурів керування з проблемами у ВМ форму, приведену в [8].

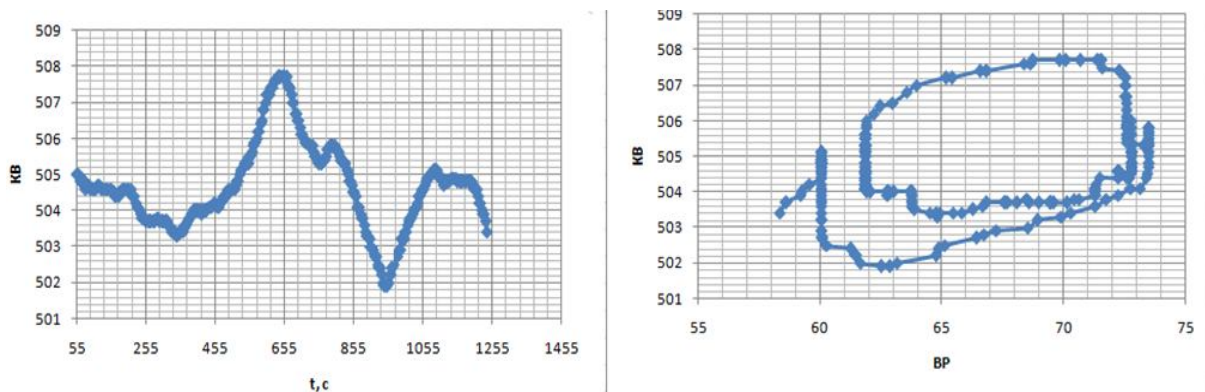


Рис. 4 – Графік залежності КВ-t (зліва) та КВ-ВР (справа) для температури за ШПП

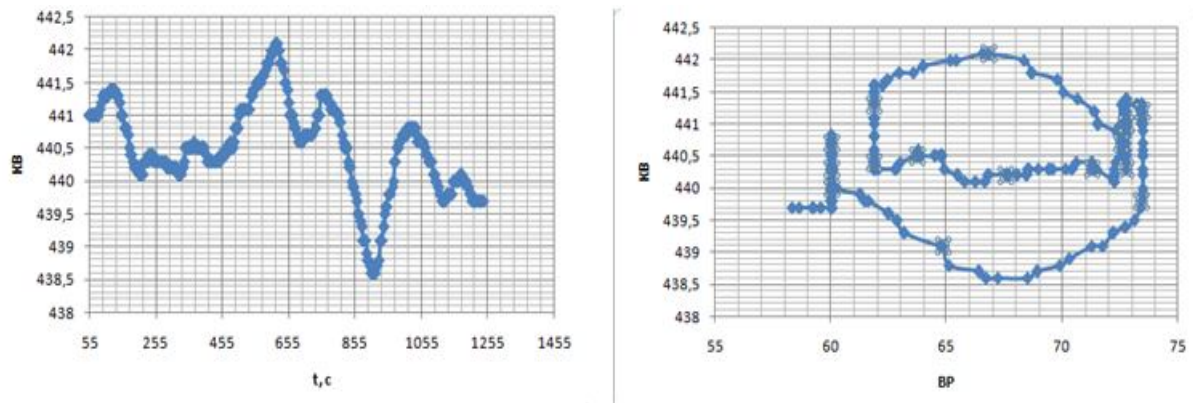


Рис. 5 – Графік залежності KB-t (зліва) та KB-BP (справа) для температури за вприском

### Висновки

В роботі розглянуто основні нелінійні ланки АСК котлоагрегатів та наведено приклади їх математичного опису. Дослідження моделей нелінійностей, що присутні у АСК, є важливим, адже їх вплив на систему є дуже значним і це підтверджено численними дослідженнями. Існуючі моделі нелінійностей у фазових просторах можна використовувати з системами 1-2 порядку і галузь їх застосування обмежена. Для повного аналізу систем керування і дослідження роботи нових законів керування, що можуть бути реалізовані сучасною технікою, доцільно використовувати моделі з урахуванням даних, що дозволяють розглядати перехідні процеси в системі.

Проведено аналіз існуючих моделей сухого тертя та дано рекомендації щодо використання модифікованої моделі  $X_i$  для моделювання АСК.

На сьогодні не існує моделей електричних ВМ з урахуванням даних, що буде враховують динаміку ВМ, зону нечутливості та гістерезис.

### Список використаних джерел:

1. Степанец А.В. Регулирующий адаптивный комплекс на основе каскадной системы с моделью объекта управления / А.В. Степанец // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 2/10(56). – С. 14-18.
2. Степанец О.В. Адаптивные системы автоматического управления для теплоэнергетических объектов / О.В. Степанец, А.П. Мовчан // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 3/11 (57). – С. 56-61.
3. Ковриго Ю.М. Модернизация системы управления тепловой нагрузкой прямоточного котлоагрегата ТЭС с использованием динамического корректора / Ю.М. Ковриго, М.А. Коновалов, А.С. Бунке // Теплоэнергетика. – 2012. - № 10. - С. 43-49.
4. Ковриго Ю.М. Способи покращення якості для робастних систем з регулятором з внутрішньою моделлю управління / Ю.М. Ковриго, Т.Г. Баган // Матеріали XXI Міжнар. конф. з автоматичного управління (Автоматика-2014), м. Київ, 23-27 вересня 2014 р. – К. : Вид-во НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка», 2014. – С. 114-115.
5. Ковриго Ю.М. Врахування обмежень для підвищення якості функціонування систем регулювання енергоблоків ТЕС і АЕС / Ю.М. Ковриго, Б.В. Фоменко // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2008. – № 2(22). – С. 180-186.
6. Ковриго Ю.М. Математическое моделирование систем автоматического регулирования с учетом ограничений на управление в пакете Matlab / Ю.М. Ковриго, Б.В. Фоменко, И.А. Полищук // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2007. – № 2. – С. 21-28.
7. Мирошник И.В. Теория автоматического управления: Нелинейные и оптимальные системы : учебное пособие. – СПб. : Питер, 2006. – 272 с.
8. Jelali M. Detection and diagnosis of stiction in control loops. State of the art and advanced methods / M. Jelali, B. Huang. – Springer, 2010. – 409 p.



9. Choudhury M.A.A.S. Modelling valve stiction / M.A.A.S. Choudhury, N.F. Thornhill, S.L. Shah // Control engineering practice. – 2005. – № 13. – P. 641-658.
10. Choudhury M.A.A.S. A data-driven model for valve stiction / M.A.A.S. Choudhury, N.F. Thornhill, S.L. Shah // Proceedings IFAC Symposium on Advanced Control of Chemical Processes (ADCHEM). – Hong Kong, 2004. – P. 2071-2077.
11. Practical model and detection algorithm for valve stiction / M. Kano, H. Maruta, H. Kugemoto, K. Shimizu // Proceedings IFAC DYCOPS, Cambridge, USA. – 2004. – P. 3308-3317.
12. A curve fitting method for detecting valve stiction in oscillating control loops / Q.P. He, J. Wang, M. Pottmann, S.J. Qin // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2007. – № 46. – P. 4549-4560.
13. Sivagamasundari S. A Practical Modelling Approach for Stiction in Control Valve / S. Sivagamasundari, D. Sivakumar // International Conference on Modeling, Optimization and Computing (ICMOC 2012). – 2012. – № 38. – P. 3308-3317.

#### Bibliography:

1. Stepanets A.V. The control system based on an adaptive cascade system with a model of the control object / A.V. Stepanets // Eastern European Journal of advanced technologies. – 2012. – № 2/10(56). – P. 14-18. (Rus.)
2. Stepanets O.V. Adaptive automatic control system for heat power facilities. / O.V. Stepanets, A.P. Movchan // Eastern European Journal of advanced technologies. – 2012. – № 3/11 (57). – P. 56-61. (Ukr.)
3. Kovrygo Y.M. Modernization of control system of CHP boiler thermal load ram using dynamic leveling / Y.M. Kovrygo, M.A. Konovalov, A.S. Bunke // Thermal Engineering. – 2012. - № 10. - P. 43-49. (Rus.)
4. Kovrygo Y.M. Ways to improve quality for robust systems with internal model control / Y.M. Kovrygo, T.G. Bagan // Materials of XXI Intern. conf. on automatic control (Automatics-2014), – K.: NTUU «KPI» «Politechnika», 2014. – P. 114-115. (Ukr.)
5. Kovrygo Y.M. Taking into account the restrictions to improve the quality of functioning of control systems of TPP and NPP / Y.M. Kovrygo, B.V. Fomenko // Automatics. Automation. Electrotechnical complexes and systems. – 2008. – № 2 (22). – P. 180-186. (Ukr.)
6. Kovrygo Y.M. Mathematical modeling of the automatic control systems within the constraints of managing the package Matlab / Y.M. Kovrygo, B.V. Fomenko, I.A. Polyshuk // Автоматика. Automatics. Automation. Electrotechnical complexes and systems. – 2007. – № 2. – P. 21-28. (Rus.)
7. Miroshnik I.V. Automatic control theory: Nonlinear and optimal systems. – SPb. : Piter, 2006. – 272 p. (Rus.)
8. Jelali M. Detection and diagnosis of stiction in control loops. State of the art and advanced methods / M. Jelali, B. Huang. – Springer, 2010. – 409 p.
9. Choudhury M.A.A.S. Modelling valve stiction / M.A.A.S. Choudhury, N.F. Thornhill, S.L. Shah // Control engineering practice. – 2005. – № 13. – P. 641-658.
10. Choudhury M.A.A.S. A data-driven model for valve stiction / M.A.A.S. Choudhury, N.F. Thornhill, S.L. Shah // Proceedings IFAC Symposium on Advanced Control of Chemical Processes (ADCHEM). – Hong Kong, 2004. – P. 2071-2077.
11. Practical model and detection algorithm for valve stiction / M. Kano, H. Maruta, H. Kugemoto, K. Shimizu // Proceedings IFAC DYCOPS, Cambridge, USA. – 2004. – P. 3308-3317.
12. A curve fitting method for detecting valve stiction in oscillating control loops / Q.P. He, J. Wang, M. Pottmann, S.J. Qin // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2007. – № 46. – P. 4549-4560.
13. Sivagamasundari S. A Practical Modelling Approach for Stiction in Control Valve / S. Sivagamasundari, D. Sivakumar // International Conference on Modeling, Optimization and Computing (ICMOC 2012). – 2012. – № 38. – P. 3308-3317.

Рецензент: В.Г. Трегуб  
д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ»

Стаття надійшла 04.09.2015