

*Національний університет біоресурсів і природокористування України, м.Київ, Україна*

### **Синтез модального керування багатовимірними лінійними системами з використанням лінійних матричних нерівностей**

Дається розв'язок задачі побудови модальних регуляторів для лінійних багатовимірних систем, що забезпечують  $D$ -стійкість (асимптотичну стійкість) об'єкта керування. Керування представлено у вигляді регуляторів, що забезпечують зворотний зв'язок за виходом об'єкта керування, і використовує спостерігачі Луенбергера повного і зниженого порядку. Для обчислення матриць регуляторів використовується техніка лінійних матричних нерівностей і узагальнення поняття стійкості за Ляпуновим ( $D$  - стійкість). Наведені теореми, що дають необхідні і достатні умови  $D$  - стійкості керованої системи.

В роботі дається конструктивний розв'язок задачі синтезу  $D$  - стабілізуювальних (модальних) регуляторів за вимірюваним виходом об'єкта керування, заснований на побудові спостерігачів стану об'єкта певного порядку. Розв'язок отримано на основі використання теорії лінійних матричних нерівностей (LMI). Для чисельного моделювання отриманих модальних регуляторів можна використовувати ефективні методи опуклої оптимізації і відповідне програмне забезпечення, яке входить до ряду пакетів прикладних програм, зокрема, в систему MatLab.

Описуються методи розв'язання не тільки прямої задачі модального керування, коли вибором параметрів регулятора забезпечується збіг коренів характеристичного рівняння замкненої системи з попередньо заданим набором комплексних чисел, розташованих в лівій частині комплексної площини, але і інших задач модального регулювання, в яких вимога точного розміщення коренів в лівій комплексній півплощині вже не накладається, а потрібна лише їх приналежність до деяких заданих областей. Такі області, описані системою лінійних матричних нерівностей, називаються LMI-областями.

**динамічна система, модальне керування, регулятори,  $D$  - стійкість, спостерігачі Луенбергера, лінійні матричні нерівності, кронекеровий добуток матриць**

Одержано (Received) 19.04.2018

**УДК 681.536.54**

**Д.М. Лужков, асп., С.І. Осадчий, проф., д-р техн. наук, О.К. Дідик, доц., канд. техн. наук**

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна, E-mail: srg2005@ukr.net*

## **Ідентифікація лінеаризованої моделі динаміки контролера та терморегулювального вентиля фірми Danfoss за даними пасивного експерименту**

Мета статті полягає у забезпеченні конструкторів та дослідників роботи систем автоматизації процесу керування холодильним обладнанням з одним терморегулювальним вентилям вихідними даними про лінеаризовану модель динаміки контролера разом з регулювальним органом. Ідентифікація виконана у три етапи. На першому етапі на основі даних пасивного експерименту одержані спектральні та взаємні спектральні щільності сигналів. На другому етапі, на основі результатів першого, визначені передаточні функції елементів системи та формуючого фільтру завод. На третьому етапі виконана верифікація результатів ідентифікації, при якій використовувались експериментальні дані та одержані передаточні функції на другому етапі.

**хладагент, випарник, структурна схема, вектор, збурення, регулятор**

© Д.М. Лужков, С.І. Осадчий, О.К. Дідик, 2018

Д.М. Лужков, асп., С.И. Осадчий, проф., д-р техн. наук, А.К. Дидык, доц., канд. техн. наук  
Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Україна

### **Идентификация линеаризованной модели динамики контроллера и реморегулирующего вентиля фирмы Danfoss по данным пассивного эксперимента**

Цель статьи заключается в обеспечении конструкторов и исследователей работы систем автоматизации процесса управления холодильным оборудованием с одним терморегулирующим вентилем исходными данными о линеаризованной модели динамики контроллера вместе с регулирующим органом. Идентификация выполнена в три этапа. На первом этапе на основе данных пассивного эксперимента полученные спектральные и взаимные спектральные плотности сигналов. На втором этапе, на основе результатов первого, определены передаточные функции элементов системы и формирующего фильтра помех. На третьем этапе выполнена верификация результатов идентификации, при которой использовались экспериментальные данные и полученные передаточные функции на втором этапе.

**хладагент, испаритель, структурная схема, вектор, возмущение, регулятор**

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вивчення публікацій [1-4], результати якого представлені у статті [5], показало, що визначення меж підвищення ефективності сучасного холодильного обладнання вимагає застосування положень системного підходу [6]. Такий підхід, з одного боку вимагає розглядати ефективність холодильного устаткування у комплексі з холодильною камерою, яка завантажена відповідними продуктами, та знаходиться під дією різноманітних зовнішніх та внутрішніх впливів, а з іншого потребує наявності моделей динаміки усіх елементів замкненої системи «об'єкт - регулятор».

Вивчення технічної документації [7] дозволило у статті [5] скласти структурну схему системи керування холодильним обладнанням фірми Danfos, яке знаходиться у торговому приміщенні супермаркету, визначити на ній місця дії збурень в реальних експлуатаційних умовах та обґрунтувати необхідність визначення линеаризованої моделі динаміки контроллера разом з терморегулювальним вентилем. Визначена модель динаміки, з одного боку, повинна досить точно характеризувати процеси, які відбуваються у системі керування, а з іншого повинна мати мінімальну складність [8].

Досягнення такого компромісу можливе [9], якщо модель динаміки елемента або системи визначена в результаті структурної ідентифікації за даними відповідним чином поставленого експерименту.

**Постановка проблеми.** Виходячи з цього проблема дослідження полягає у тому, щоб за даними пасивного експерименту про зміну сигналів на вході та виході контролеру та терморегулювального вентиля знайти передатну функцію системи «контролер-вентиль» та спектральну щільність збурень, які супроводжують процес формування керувальної дії.

**Постановка завдання.** Мета статті полягає у забезпеченні конструкторів та дослідників роботи систем автоматизації процесу керування холодильним обладнанням з одним терморегулювальним вентилем вихідними даними про линеаризовану модель динаміки контроллера разом з регулювальним органом.

**Виклад основного матеріалу.** Вивчення технічної документації [7] та ознайомлення з конструкцією холодильного устаткування з одним ТРВ фірми Danfoss дозволили визначити [5], що мікроконтролер АК-СС 550 та терморегулювальний вентиль належать до нелінійних елементів.

В результаті застосування принципу визначення линеаризованої моделі динаміки нелінійного елемента за експериментальними даними, викладеного у статті [10], побудована структурна схема (рис. 1) з'єднання контроллера з вентилем та системи збору та обробки сигналів. На вході схеми діє сигнал зміни температури повітря холодильної камери  $x$ , а на виході сигнал про положення регулювального вентиля  $u$ .

Процес формування сигналу зміни положення вентилію у згідно із описом [6] має нелінійний характер. При зростанні температури  $x$  вище за задане значення плюс допуск  $\Delta$  мікроконтролер АК-СС 550 формує сигнал  $y$  на відкриття вентилію. При зменшенні температури нижче за уставку формується сигнал  $y$  на закриття вентилію.

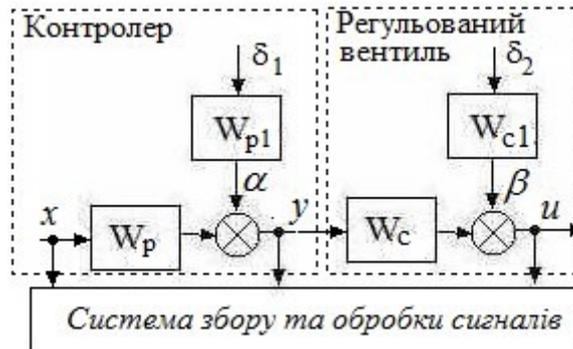


Рисунок 1 – Функціональна схема системи з одним ТРВ

Внаслідок наявності зони нечутливості сигнал  $y$  спотворюється дією завад  $\alpha$ , які не можуть бути вимірними. Сигнал  $y$  з виходу контролеру подається на вхід вентилію та викликає зміну його положення  $u$ . Зміна положення вентилію супроводжується дією неконтрольованого збурення  $\beta$ .

Будемо вважати, що сигнали  $x$ ,  $y$ ,  $u$  вимірюються з допомогою відповідних датчиків, які подають сигнали на входи системи збору та обробки інформації (рис. 1), та являють стаціонарні випадкові процеси. Припустимо також, що завади  $\alpha$  та збурення  $\beta$  також є стаціонарними центрованими випадковими процесами, які формуються з некорельованих білих шумів одиничної інтенсивності  $\delta_1$  та  $\delta_2$  з допомогою формуючих фільтрів  $W_{p1}$  та  $W_{c1}$ .

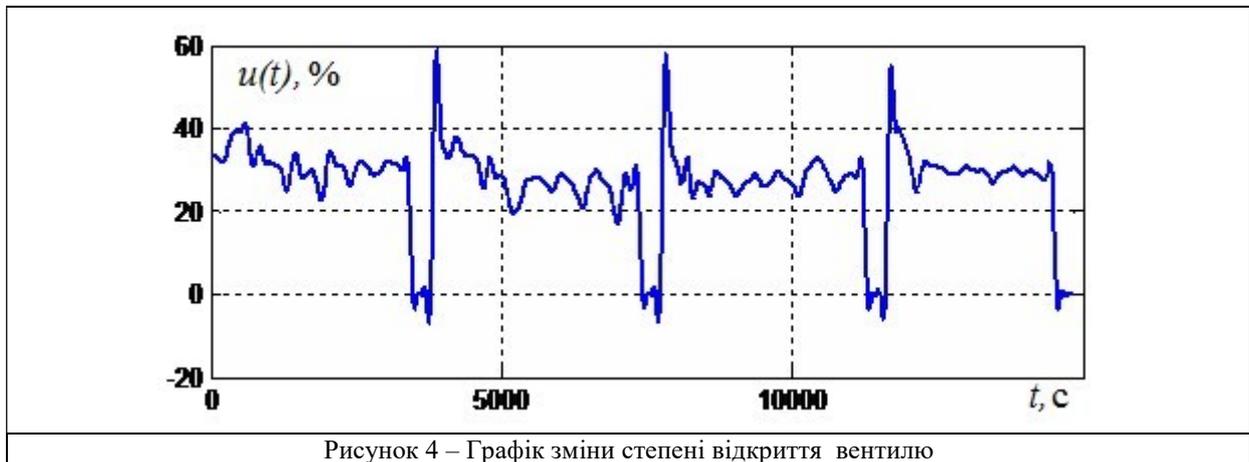
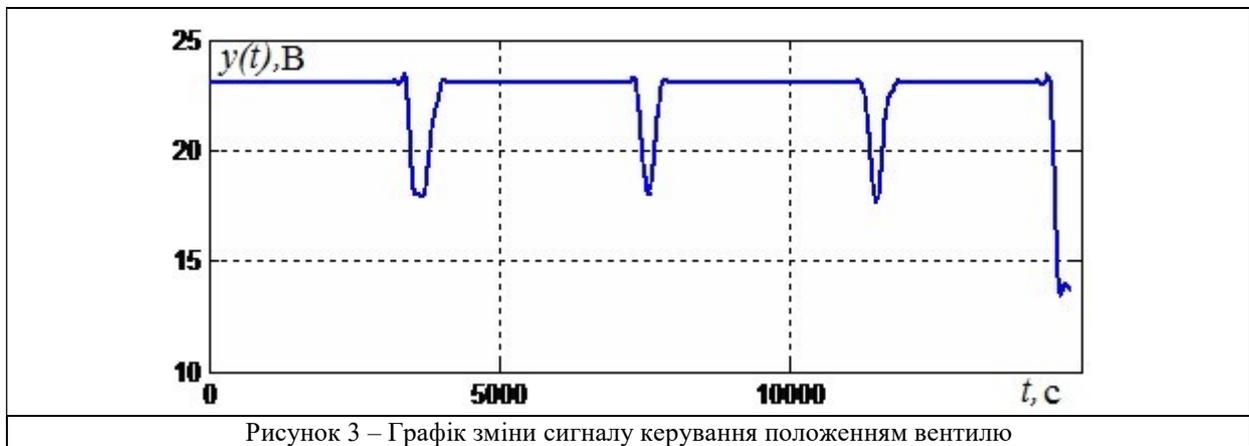
Задача ідентифікації полягає у тому, щоб за відомими записами сигналів  $x$ ,  $y$ ,  $u$  зайти передаточні функції  $W_p$ ,  $W_c$ , які характеризують динаміку керованої частини контролеру та вентилію, та передаточні функції формувальних фільтрів  $W_{p1}$  та  $W_{c1}$ , які є слухними та мінімізують дисперсію похибки ідентифікації.

Для розв'язання поставленої задачі у відповідності з базовим методом [10] розроблено алгоритм ідентифікації, який включає виконання декількох взаємозв'язаних етапів дослідження.

Перший етап є допоміжним. Його мета полягає у первинній обробці експериментальних даних та оцінці спектральних та взаємних спектральних щільностей сигналів  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Для його виконання використані записи сигналів, отримані в результаті спостереження за роботою холодильного обладнання фірми Danfoss в умовах супермаркету. Аналіз фрагментів записів сигналів  $x$ ,  $y$ ,  $u$  рис. 2 – рис. 4 показує наявність в них регулярної та випадкової складових, тому [10] для оцінювання спектральних та взаємних спектральних щільностей зазначених сигналів з записів сигналів  $x$ ,  $y$ ,  $u$  необхідно виділити випадкові складові. Обробка випадкових складових сигналів  $x$ ,  $y$ ,  $u$  методом Блекмена-Тьюки [11] дозволила знайти оцінки спектральних щільностей зміни температури повітря у камері  $S_{xx}$ , зміни сигналу керування вентилем  $S_{yy}$ , зміни положення вентилію  $S_{uu}$ , а також оцінки взаємних спектральних щільностей між випадковими складовими зазначених сигналів  $S_{xy}$  та  $S_{yu}$  (рис. 5-рис.9).

Апроксимація отриманих оцінок методом типових логарифмічних характеристик на класі дробово-раціональних функцій комплексного аргументу  $s=j\omega$

дозволила знайти необхідні для ідентифікації спектральні та взаємні спектральні щільності



$$S_{xx} = \frac{2.38 \cdot 10^{-4} |s + 0.0004|^2}{|s^2 + 2 \cdot 0.4 \cdot 1.65 \cdot 10^{-3} s + (1.65 \cdot 10^{-3})^2|^2}, \quad (1)$$

$$S_{yy} = \frac{0.064 |(s + 0.0009)(s + 0.0015)(s + 0.06)(s + 0.07)(s^2 + 0.12s + 0.04)|^2}{|(s^2 + 0.0064s + 0.008^2)(s^2 + 1.32 \cdot 10^{-3} s + 0.00165^2)(s^2 + 0.014s + 0.028^2)|^2}, \quad (2)$$

$$S_{uu} = \frac{2.14(s + 0.0015)(s + 0.0025)(s + 0.007)(s + 0.06)(s + 0.2)(s^2 + 0.12s + 0.04)^2}{|(s + 0.03)(s^2 + 0.0064s + 0.008^2)(s^2 + 1.32 \cdot 10^{-3}s + 0.00165^2)(s^2 + 0.014s + 0.028^2)|^2}, \quad (3)$$

$$S_{xy} = \frac{1.13 \cdot 10^{-5}(-s + 0.0004)(-s + 0.0005)(s + 0.00375)(s + 0.005)}{|(s^2 + 0.0064s + 0.008^2)(s^2 + 1.32 \cdot 10^{-3}s + 0.00165^2)|^2 (s + 0.015)}, \quad (4)$$

$$S_{yu} = \frac{0.28(s - 0.0003)(s + 0.0015)(s + 0.0009)(s + 0.07)(s + 0.06)(s^2 + 0.12s + 0.04)^2}{(s + 0.0002)(s^2 + 0.0064s + 0.008^2)(s^2 + 1.32 \cdot 10^{-3}s + 0.00165^2)(s^2 + 0.014s + 0.028^2)^2}. \quad (5)$$

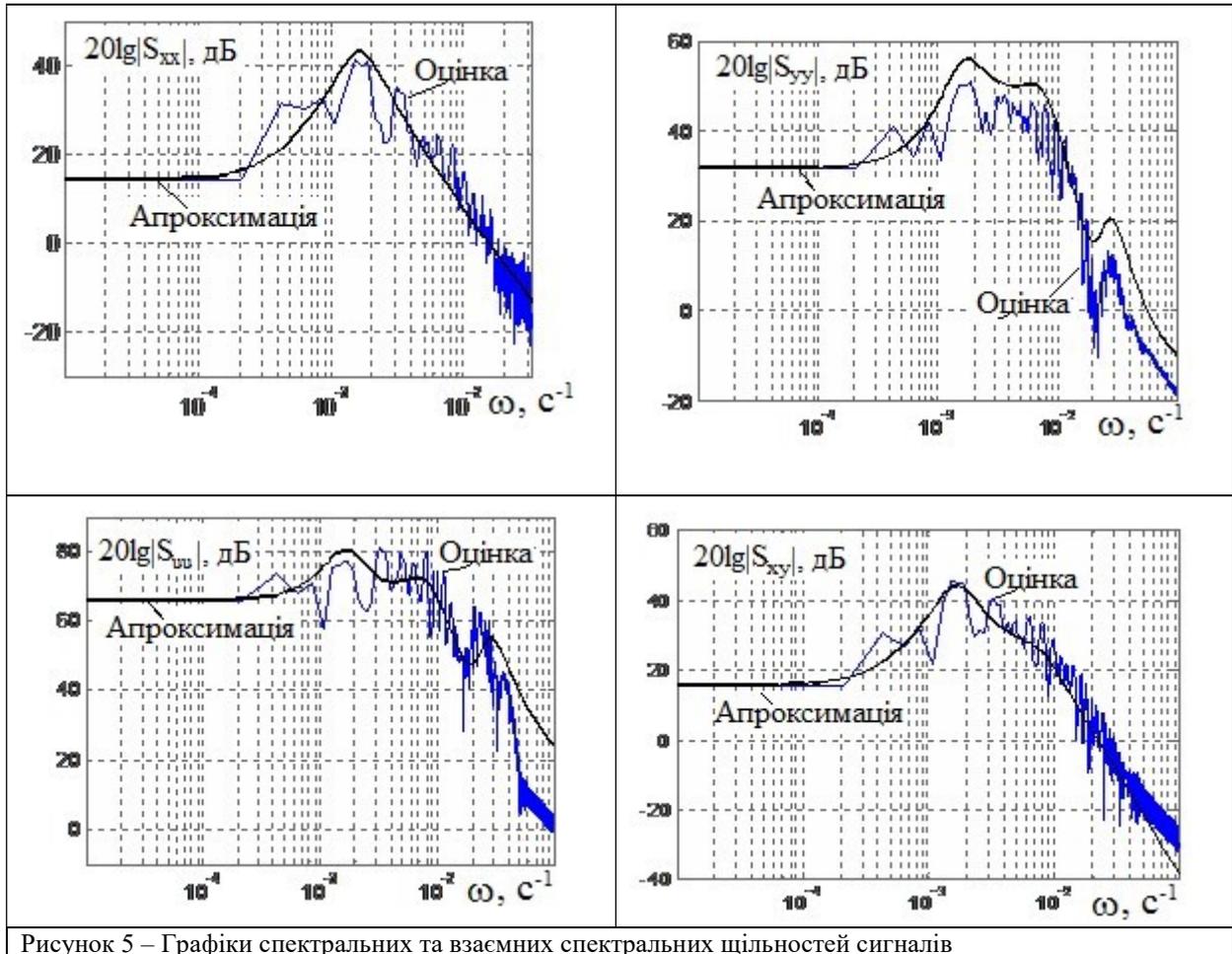


Рисунок 5 – Графіки спектральних та взаємних спектральних щільностей сигналів

За теоремою Вінера-Хінчина [12] зв'язок між входом  $x$  та виходом  $u$  динамічного об'єкту характеризує взаємна спектральна щільність  $S_{xy}$ , яка з урахуванням схеми (рис. 1) дорівнює

$$S_{xy} = W_p S_{xx}, \quad (6)$$

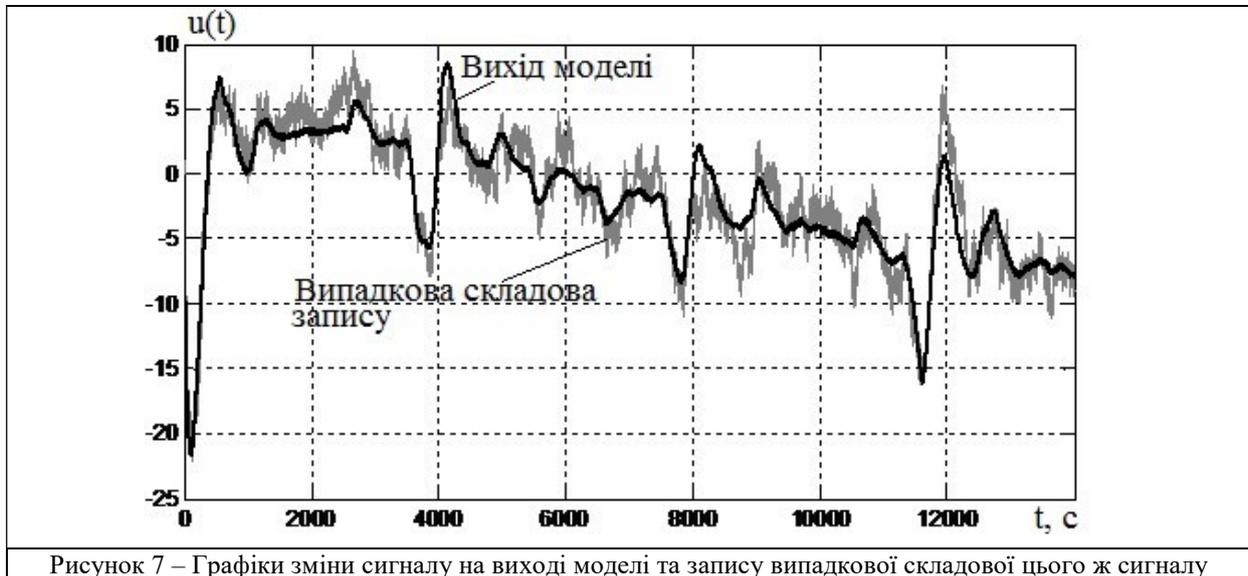
при умові відсутності кореляції між сигналами  $x$  та  $\alpha$ . Оскільки джерела сигналів зміни температури у камері та завади перетворення є різними, то зазначена умова виконується. Розв'язок рівняння (6) відносно передаточної функції  $W_p$  при відомих спектральних щільностях (1), (4) має вигляд

$$W_p = \frac{0.05(-s + 0.0005)(s + 0.0038)(s + 0.005)}{(s + 0.0004)(s + 0.015)(s^2 + 0.0064s + 6.4 \cdot 10^{-5})}. \quad (7)$$



відповідно. З допомогою блоків  $W_c$  та  $W_{c1}$  відбувається моделювання роботи регульованого вентиляю.

В результаті подачі на вхід моделі відповідних випадкових складових сигналів на екрані осцилографу отримані графіки зміни сигналу на виході моделі та запису випадкової складової цього ж сигналу (рис.7).



Як видно з рисунку 1 визначена модель відповідає експериментальним даним, тому її прийнято як остаточну.

Таким чином, завдання ідентифікації виконано.

### Висновки.

Розділення записів сигналів, які діють на входах та виходах контролеру АК-СС 550 та терморегульовального вентиляю фірми Danfoss, дозволяє визначати лінеризовану модель динаміки зазначених елементів, яка відповідає режиму роботи цих елементів під час запису сигналів.

Для ідентифікації зазначеної моделі достатньо скористатися випадковими складовими сигналів «вхід-вихід»

Отримані нові передаточні функції складають основу для адаптації відомих методів синтезу систем керування до визначення структури та параметрів закону керування, який спрямований на забезпечення підвищення ефективності використання холоду в реальних експлуатаційних умовах.

### Список літератури

1. Мизин В.А. Инновационные методы повышения эффективности существующих типов кожухотрубных аппаратов [Текст] / В.М. Мизин, А.А. Цветков // Научн. журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». – 2014. – №3. – С.71-77
2. Корнивец Д.В. Повышение эффективности холодильных установок с компрессорами «Битцер» [Текст] / Д.В. Корнивец // Холодильная техника. – 2011. – №10. – С.22-26
3. Катраев М.Ю. Повышение эффективности работы холодильной установки. Выбор алгоритма управления терморегулирующим вентилем [Текст] / Ю.М. Катраев // Холодильная техника. – 2011. – №4. – С.4-5
4. Эрлихман В.Н. Разработка принципов повышения эффективности технологических процессов холодильных производств [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.04, 05.18.12 / Эрлихман Владимир Наумович; Калининградский гос. техн. ун-т. – Калининград, 2005. – 49 с.
5. Шляхи модернізації систем автоматизації холодної устаткування з одним терморегульовальним вентилем [Текст] / С.І. Осадчий, Д.М. Лужков // Збірник наукових праць Кіровоградського

- національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2017. – Вип. 30. – С. 160-167.
6. Згуровський М.З. Основи системного аналізу [Текст] / М.З. Згуровський, Н.Д. Панкратова. – К.: Видавнича група BHV, 2007. – 544с.
  7. Контроллер испарителя АК-СС 550 для управления холодильными установками. Руководство пользователя. – Danfoos – RS.8E.N1.50. – 44с.
  8. Азарсков В.Н. Методология конструирования оптимальных систем стохастической стабилизации: Монография [Текст] / В.Н. Азарсков, Л.Н. Блохин, Л.С. Житецкий ; под ред. Блохина Л.Н. – К.: Книжное издательство НАУ, 2006. – 440с.
  9. Блохин Л.М. Методологічні основи та етапи забезпечення конкурентноздатності процесів стабілізації існуючих рухомих об'єктів [Текст] / Л.М. Блохин, С.І. Осадчий, О.П. Кривоносенко // Вісник НАУ. – 2009. – №2. – С. 61-68.
  10. Блохин Л.Н. Нелинейные оптимальные системы стохастической стабилизации [Текст] / Л.Н. Блохин, Л.С. Житецкий // Кибернетика и вычислительная техника. – 2003. – Вып. 139. – С.12-23.
  11. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы [Текст] : монография / Р. Отнес, Л. Энксон; пер. с англ. В.И. Хохлова. – М.: Мир, 1982. – 428с. – Библиогр.: с.410-415.
  12. Статистична динаміка систем управління [Текст] : підручник / Л.М. Блохин, М.Ю. Буриченко, Н.В. Білак [та ін.]. – К.: НАУ, 2014. – 300с.

## Referencis

1. Mizin, V.A. & Cvetkov, A.A. (2014). Innovacionnye metody povysheniya jeffektivnosti sushhestvujushhijh tipov kozhuhotrubnyh apparatov [Innovative methods to improve efficiency existing types of shell-and-tube devices]. *Nauchn. zhurnal NIU ITMO. Serija «Holodil'naja tehnika i kondicionirovanie» – Scientific journal NRU ITMO Series "Refrigeration and Air Conditioning", 3, 71-77.*
2. Kornivec, D.V. (2011). Povyshenie jeffektivnosti holodil'nih ustanovok s kompressorami «Bitcer» [Improving the efficiency of refrigeration systems with compressors "Bitzer"]. *Holodil'naja tehnika – Kholodil'naja Tekhnika, 10, 22-26.*
3. Katraev, M.Ju. (2011). Povyshenie jeffektivnosti raboty holodil'noj ustanovki. Vybora algoritma upravlenija termoregulirujushhim ventilem [Improving the efficiency of the refrigeration unit. Selection of control algorithm thermostatic valve]. *Holodil'naja tehnika – Kholodil'naja Tekhnika, 4, 4-5.*
4. Jerlihman, V.N. (2005). Razrabotka principov povysheniya jeffektivnosti tehnologicheskijh processov holodil'nyh proizvodstv [Development of principles for improving the efficiency of technological processes of refrigeration production]. *Doctor's thesis. Kaliningradskij gos. tehn. un-t. Kaliningrad.*
5. Osadchij, S.I. & Luzhkov, D.M. (2017). Shliakhy modernizatsii system avtomatyky kholodyl'noho ustatkuvannia z odnym termorehuliuval'nym ventylem [Paths of Modernization of Automation Systems of the Refrigeration Equipment with a Single Thermal Adjusting Valve]. *Zbirnyk naukovykh prats' Kirovohrads'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v sil's'kohospodars'komu vyrobnytviv, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Collected Works of KNTU: Machinery in Agricultural Production, industry machine building, automation, Vol. 30, 160-167.*
6. Zghurov's'kyj, M.Z. & Pankratova, N.D. (2007). *Osnovy systemnoho analizu [Basics of system analysis].* Kyiv: Vydavnycha hrupa BHV.
7. *AK-SS 550 Evaporator Controller for controlling refrigeration units. User's Guide.* Danfoos, RS.8E.N1.50.
8. Azarskov, V.N., Blohin, L.N. & Zhiteckij L.S. (2006). *Methodology for constructing optimal stochastic stabilization systems.* L.N. Blohina (Ed.). Kiev: Knizhnoe izdatel'stvo NAU.
9. Blokhin, L.M., Osadchij, S.I. & Krivonosenko, O.P. (2009). Metodolohichni osnovy ta etapy zabezpechennia konkurentnozdatnosti protsesiv stabilizatsii isnujuchykh rukhomykh ob'ektiv [Methodological principles and stages of competitive processes of stabilization of existing moving objects]. *Visnyk NAU – Proceedings of the NAU, 2, 61-68.*
10. Blohin, L.N. & Zhiteckij, L.S. (2003). Nelinejnye optimal'nye sistemy shasticheskoi stabilizatsii [Nonlinear optimal systems of shechastic stabilization]. *Kibernetika i vychislitel'naja tehnika – Cybernetics and Computer Engineering, Vol. 139, 12-23.*
11. Otnes, R. & Jenokson, L. (1982). *Applied time series analysis. Basic methods.* (V.I. Hohlova, Trans). Moscow: Mir.
12. Blohin, L.M., Burichenko, M.Ju., Bilak, N.V. & et.al. (2014). *Statistichna dinamika sistem upravlinnja: pidruchnik [Statistical dynamics of control systems].* – Kyiv: NAU.

**Dmytro Luzshkov, postgraduate, Sergiy Osadchy, Prof., DSc., Olexandr Didyk, Assoc. Prof., PhD tech. sci.**

*Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitsky, Ukraine*

### **Identification of the Linearized Model of Controller Dynamics and Danfoss Temperature Control Valve According to the Passive Experiment**

Main purpose of the article is to provide designers and researchers with a dynamics models of a controller for refrigerating equipment with one thermal control valves in conjunction with a regulatory body..

This article is devoted to an analysis of the trends improve refrigeration efficiency by upgrading the control system of a thermostatic expansion valve. It is shown that Danfoss refrigeration equipment increases the efficiency of the formation of the cold due to changes in the evaporator superheat setting. The main idea of upgrading is to use a systems approach to the consideration of refrigeration equipment in conjunction with the cooling chamber and the products which are stored in it. To realize this idea one has developed a new block diagram of the cooling system as a multidimensional follow-up system that operates in conditions of air temperature changes in the refrigerating chamber and fluctuations of the refrigerant temperature and its pressure. The definition of a linearized model took place in three stages. In the first stage, based on the data of the passive experiment, spectral and cross spectral densities of signals are obtained. In the second stage, based on the results of the first, the transfer functions of the system elements and the filtering block are defined. In the third stage, the verification of the identification results, which used experimental data and received transfer functions in the second stage, was performed.

The separation of the signal records that are active at the inputs and outputs of the AK-CC 550 controller and Danfoss thermostat valve allows you to determine the linearized pattern of the dynamics of the specified elements, which corresponds to the mode of operation of these elements during the recording of signals. The new transfer functions obtained form the basis for adapting the known methods of synthesis of control systems to the definition of the structure and parameters of the law of control, which is aimed at improving the efficiency of the use of cold in real operating conditions.

**a refrigerant, an evaporator, a block diagram, a vector, a disturbance, a regulator**

Одержано (Received) 05.02.2018

**УДК 62:374:004.231.3**

**Ю.Б. Паладійчук, доц., канд. техн. наук, В.С. Руткевич, канд. техн. наук, М.В. Зінєв, асист.**

*Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна*

**І.О. Лісовий, канд. техн. наук**

*Уманський національний університет садівництва, м. Умань, Україна*

## **Перспективи використання відкритого програмного комплексу arduino для вивчення технічних дисциплін**

Стаття присвячена питанню підвищення рівня якості навчання технічним дисциплінам у вищих навчальних закладах освіти, за рахунок впровадження в навчальний процес апаратної платформи Arduino UNO. В статті проаналізовано сучасний стан проблеми підготовки технічних фахівців, методи їх підготовки в найбільш розвинених країнах світу, можливі напрямки вирішення існуючої проблеми за рахунок використання інноваційних методів навчання технічним дисциплінам, з використанням програмованої апаратної платформи Arduino UNO. Для обґрунтування запропонованої методики виконано порівняльний аналіз ряду популярних програмних платформ з наведеною Arduino UNO,

© Ю.Б. Паладійчук, В.С. Руткевич, М.В. Зінєв, І.О. Лісовий, 2018