

8. Podlubny, I. Fractional Differential Equations [Text] / Mathematics in Sciences and Engineering, Vol. 198. – Academic Press, 1999. – 340 p.
9. Vinagre, B.M., Petras I., Podlubny I., Chen Y.Q. Using fractional order adjustment rules and fractional order reference models in model-reference adaptive control. *Nonlinear Dyn.* 29(1–4), 269–279 (2002).

**О.П. Лобок, доц., канд. фіз.-мат. наук, Б.М. Гончаренко, проф., д-р техн. наук, М.А. Сич, асп.**

*Національний університет харчових технологій, Київ, Україна*

**Л.Г. Віхрова, проф., канд. техн. наук**

*Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна*

#### **Моделювання оптимального автоматичного керування процесом біологічного очищення забруднених вод регуляторами дробового порядку**

Розглядається і розв'язується задача оптимального керування процесом біологічного очищення забруднених вод за допомогою дробових  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  - регуляторів. Пропонується математичне моделювання процесу біологічного очищення як об'єкта керування, виводиться нелінійна динамічна модель керування та проводиться її лінеаризація. Модель керування має один вхід та один вихід. Вводиться до розгляду оптимальний критерій якості автоматичного керування за допомогою дробового регулятора функціонування біологічної системи очищення води. Отримані оптимальні параметри налаштування дробових  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  - регуляторів. Досліджена динаміка перехідних процесів керувального впливу і стану системи очищення.

Чисельне моделювання дробового  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  - і класичного  $PID$  - керування проведене для підтвердження більш високої ефективності дробових регуляторів, що відображено в результатах досліджень.

**дробове числення, диферінтегратор, оптимальне керування, чисельне моделювання, біоочищення вод**

Одержано 16.05.17

**УДК 681.536.54**

**С.І. Осадчий, проф., д-р техн. наук, Д.М. Лужков, асп.**

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

*E-mail: srg2005@ukr.net*

## **Шляхи модернізації систем автоматичного управління холодильного устаткування з одним терморегулювальним вентилем**

Стаття присвячена аналізу тенденцій підвищення ефективності холодильного устаткування за рахунок модернізації системи керування роботою терморегулювального вентиля. Показано, що холодильне обладнання фірми Danfoss підвищує ефективність утворення холоду за рахунок зміни уставки перегріву випарника. Головна ідея модернізації полягає у застосуванні системного підходу до розгляду холодильного устаткування у комплексі з холодильною камерою та продуктами, які зберігаються у ній. Для реалізації зазначеної ідеї у статті розроблена нова структурна схема системи охолодження продуктів як багатовимірної системи слідкування, яка функціонує в умовах зміни температури у холодильній камері, коливаннях тиску та температури хладагенту.

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

**С.И. Осадчий, проф., д-р техн. наук, Д.М. Лужков, асп.**

*Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина*

### **Пути модернизации систем автоматизации холодильного оборудования с одним терморегулирующим вентилем**

Статья посвящена анализу тенденций повышения эффективности холодильного оборудования за счет модернизации системы управления работой терморегулирующего вентиля. Показано, что холодильное оборудование фирмы Danfoss повышает эффективность образования холода за счет изменения уставки перегрева испарителя. Главная идея модернизации заключается в применении системного подхода к рассмотрению холодильного оборудования в комплексе с холодильной камерой и продуктами, которые хранятся в ней. Для реализации указанной идеи в статье разработана новая структурная схема системы охлаждения продуктов как многомерной системы слежения, которая функционирует в условиях изменения температуры воздуха в холодильной камере, колебаниях давления и температуры хладагента.

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

**Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій.** Намагання підвищити ефективність сучасного промислового холодильного обладнання привело не тільки до вдосконалення конструкції його елементів [1, 2], зміни фізичних та хімічних властивостей хладагентів, але й до появи у їх складі вдосконалених засобів автоматизації, а саме електронних терморегулювальних вентилів (ТРВ) [3]. Як показано у статті [3], підвищення ефективності систем, розроблених фірмою Danfoss, пов'язане не тільки з використанням ТРВ, але й з застосуванням змінної уставки перегріву випарника. Однак, визначення, на скільки вичерпані можливості застосування такого способу формування програмного сигналу, потребує подальшого дослідження.

Аналіз стану досліджень в галузі холодильної техніки, результати якого висвітлені у авторефераті [4], вказує на необхідність застосування системного підходу [5] до визначення граничних можливостей підвищення ефективності сучасного холодильного обладнання. 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 формалізованого опису замкненої системи «об'єкт - регулятор».

Одним з класів такого формалізованого опису системи у сучасній теорії керування є структурна схема системи. Отже, проблема дослідження полягає у тому, щоб у результаті вивчення технічної документації [6] на прикладі холодильного устаткування фірми Danfoss скласти структурну схему системи автоматичного керування температури у продуктивній холодильній камері, яка знаходиться у торговому приміщенні супермаркету, та визначити на ній місця дії збурень в реальних експлуатаційних умовах.

**Постановка завдання.** Мета статті полягає у визначенні можливості та напрямків модернізації системи автоматичного керування холодильною установкою з одним ТРВ, яка оснащена мікро контролером типу Danfoss АК-СС 550, з метою зменшення втрат енергії при виробництві холоду.

**Основний матеріал дослідження.** Вивчення технічної документації [6] та ознайомлення з конструкцією холодильного устаткування з одним ТРВ фірми Danfoss дозволило визначити, що до складу функціональної схеми системи регулювання (рис. 1) входять мікроконтролер АК-СС 550 1, випарник 2, датчики температури S2-S6,

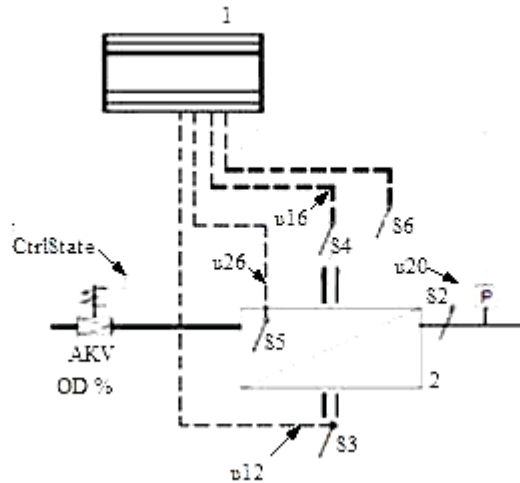


Рисунок 1 – Функціональна схема системи з одним TRB

терморегулювальний клапан АКВ. На відповідних входах мікроконтролера 1 діють сигнали:  $u_{12}$  про температуру повітря на вході до випарника 2,  $u_{16}$  про температуру повітря на виході з блоку 2,  $u_{26}$  про температуру на вході випарника,  $u_{20}$  про температуру хладагенту, які отримані з допомогою терморезисторних датчиків. При збільшенні комбінації температур повітря на вході та виході блоку 2 вище заданого рівня виникає сигнал CtrlState, який подається на блок АКВ. Під дією зазначеного сигналу відбувається зміна положення клапана. Сигнал, пропорційний ступені відкриття цього клапана OD% з датчика тиску P подається на вхід контролеру. Зміна положення клапана викликає подачу хладагенту на вхід випарника. Випарювання хладагенту викликає охолодження поверхонь випарника та зменшення температур повітря  $u_{16}$  та  $u_{12}$ .

Як показали спостереження за сигналами у трактах керування цієї системи, розташованій у торговельному приміщенні супермаркету, регулювання відбувається в умовах дії декількох груп неконтрольованих збурень ( $\psi_1, \psi_2, \psi_3$ ) та супроводжується шумом вимірювання. Перша група збурень  $\psi_1$  виникає в результаті коливань тиску хладагенту при проходженні крізь клапан та викликає коливання сигналу OD навколо заданого положення. Друга група  $\psi_2$  з'являється у камері зберігання продуктів за рахунок коливань температури продукту при зміні його кількості, за рахунок потоків теплого та холодного повітря у приміщенні, а також за рахунок руху людей крізь зону охолодження. Неконтрольовані збурення цієї групи змінюють сигнал  $u_{12}$ . Збурення третьої групи позначені  $\psi_3$ . Вони виникають у випарнику під час випарювання та впливають на температуру хладагенту  $u_{20}$ .

Таким чином, система автоматичного керування температурою повітря у холодильній камері містить два тракту керування.

Перший тракт (рис. 2) призначений для стабілізації температури повітря. Програмний сигнал заданої температури повітря у холодильній камері  $t_3$  подається на перший вхід регулятора P. На другий вхід P надходить сигнал зворотного зв'язку  $u_{17}$ , який обчислено у контролері за сигналами температур на виходах блоків камера + трубопровід від камери до випарника (K+Tr) та випарник + трубопровід від випарника до холодильної камери (B+Tr).

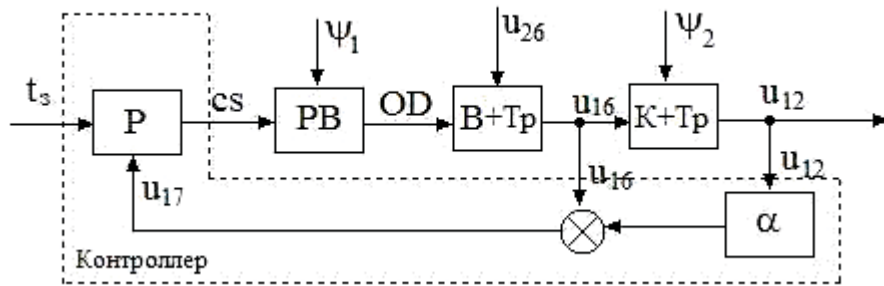


Рисунок 2 – Функціональна схема тракту стабілізації температури повітря

У результаті порівняння сигналів  $t_3$  та  $u_{17}$  формується сигнал керування зміною стану ТРВ  $cs$ , який подається на керований вхід ТРВ та змінює положення вентилію. Зміна положення вентилію супроводжується дією неконтрольованого збурення  $\psi_1$ . Отримана таким чином комбінація сигналів  $OD$  змінює температуру повітря  $u_{16}$ , яке надходить до холодильної камери з випарника крізь трубопровід. Блок який характеризує вплив сигналів  $OD$  та температури випарника  $u_{26}$  на температуру повітря на вході до холодильної камери позначено  $B+T_p$ . Повітря з температурою  $u_{16}$  взаємодіє з продуктом та змінює свою температуру до величини, яку характеризує сигнал  $u_{12}$ . Зв'язок між корисним сигналом  $u_{16}$ , збуренням  $\psi_2$  та температурою повітря на виході з холодильної камери характеризує блок  $K+T_p$ . Коефіцієнт  $\alpha$  характеризує вплив температури повітря на виході камери на формування сигналу зворотного зв'язку  $u_{17}$ .

Другий тракт системи (рис. 3) призначений для виробництва холоду. Його входом також є сигнал пропорційний  $t_3$ , а виходом є сигнал  $u_{20}$ .

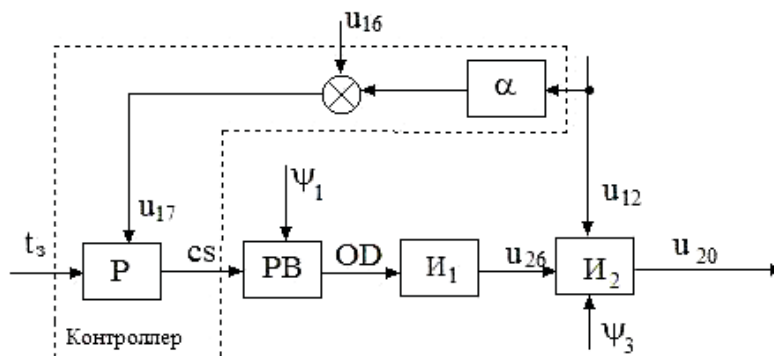


Рисунок 3 – Функціональна схема тракту виробництва холоду

Блоками  $I_1$  та  $I_2$  на функціональній схемі (рис. 3) позначені елементи системи, які характеризують зв'язок між положенням вентилію ТРВ  $OD$  та температурою випарника  $u_{26}$ , а також вплив зміни сигналів  $u_{26}$ ,  $u_{12}$  та збурення  $\psi_3$  на температуру хладагента  $u_{20}$ , яка виміряна на виході випарника.

Вивчення розроблених функціональних схем (рис.2) та (рис. 3) дозволяє зробити висновок, що система автоматичного керування температурою повітря у холодильній камері з одним ТРВ належить до багатовимірних систем автоматичного керування, оскільки перший та другий тракти керування впливають один на одного з допомогою сигналів  $u_{26}$ ,  $u_{12}$ ,  $u_{16}$ .

Процес формування сигналу  $cs$  згідно із описом [6] має нелінійний характер (рис. 4). При зростанні температури  $u_{17}$  вище за задане значення плюс допуск  $\Delta$

мікроконтролер АК-СС 550 формує сигнал  $cs$  на відкриття ТРВ. При зменшенні температури нижче  $t_3$  сигнал  $cs$  встановлюється у нульове значення.

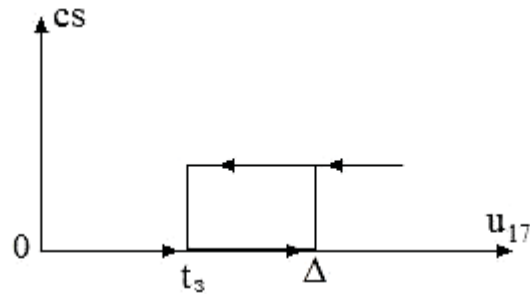


Рисунок 4 – Функція формування сигналу на зміну стану терморегулювального вентилялю

Отримані таким чином результати дозволили застосувати положення статті [7] до функції на рис.4 та розробити на цій основі структурну схему лінеаризованої системи автоматичного керування температурою повітря у холодильній камері (рис.5).

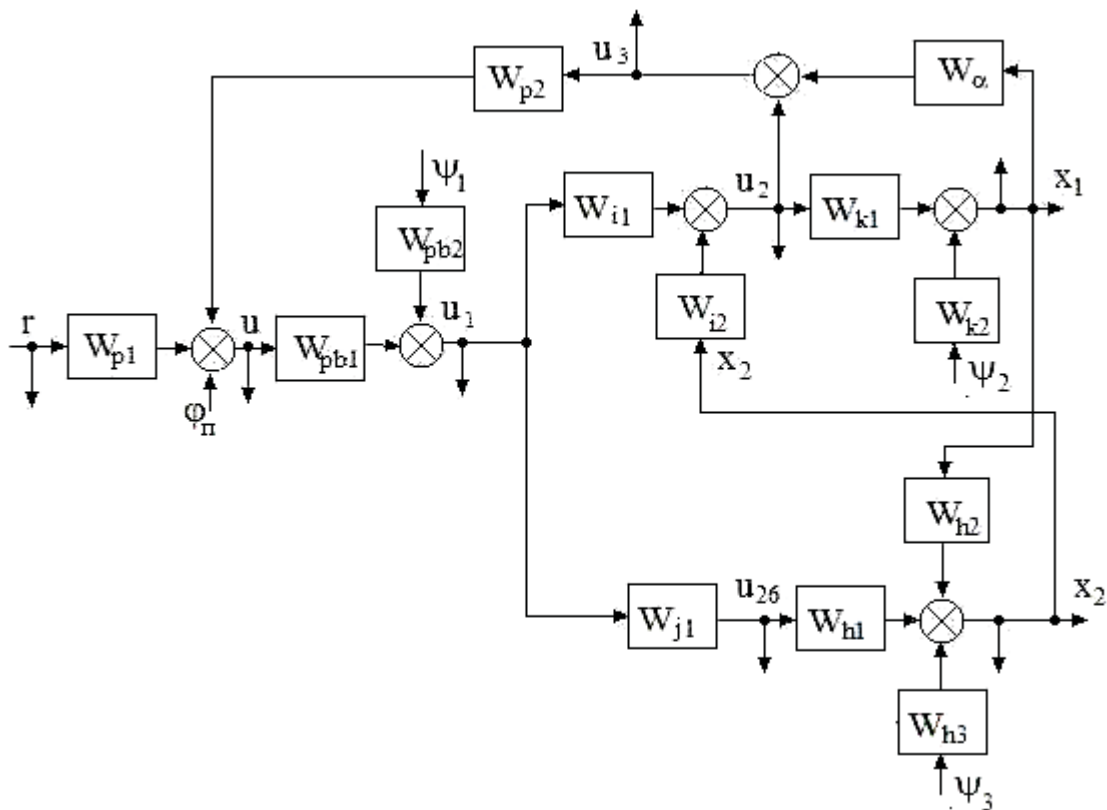


Рисунок 5 – Структурна схема системи керування температурою повітря у холодильній камері

На структурній схемі (рис.5) додаткові стрілки позначають сигнали, які вимірюються та реєструються при використанні мікроконтролера АК-СС 550. Функціональні блоки зі схем (рис.2), (рис.3) замінені передаточними функціями, що описують їх динаміку. Нелінійний регулятор  $P$  заміщують [7] дві передаточні функції  $W_{p1}$ ,  $W_{p2}$  та шум лінеаризації  $\phi_{\pi}$ , які формують сигнал управління  $u$  за наступним рівнянням

$$u = W_{p1}r + W_{p2}u_3,$$

де  $u=cs$ ;  $r=t_3$ ;  $u_3=u_{17}$ .

Динаміку ТРВ характеризують також дві передаточні функції  $W_{pb1}$ ,  $W_{pb2}$  та  $\psi_1$ , зв'язані між собою наступним співвідношенням

$$u_1 = W_{pb1}u + W_{pb2}\psi,$$

у якому

$$u_1 = OD.$$

Передаточні функції  $W_{i1}$  та  $W_{i2}$  визначають динаміку впливу зміни сигналу управління та температури хладагента на температуру повітря на вході до холодильної камери у відповідності з наступним виразом

$$u_2 = W_{i1}u_1 + W_{i2}x_2; \quad (1)$$

де  $u_2=u_{16}$ ,  $x_2=u_{12}$ .

Модель динаміки холодильної камери, на вході якої діють сигнали  $u_2$  та  $\psi_2$ , а на виході сигнал  $x_1$  ( $x_1=u_{12}$ ), що відповідає рівнянню

$$x_1 = W_{k1}u_2 + W_{k2}\psi_2, \quad (2)$$

складається з передаточних функцій  $W_{k1}$ ,  $W_{k2}$ .

Другий тракт керування характеризують передаточні функції  $W_{j1}$ ,  $W_{h1}$ ,  $W_{h2}$ ,  $W_{h3}$  та неконтрольоване збурення  $\psi_3$ , які зв'язані наступним рівнянням балансу

$$x_2 = W_{h1}W_{j1}u_1 + W_{h2}x_1 + W_{h3}\psi_3. \quad (3)$$

Як видно з рис. 5 система керування має багатовимірний об'єкт з двома перехресними зв'язками, які утворені передаточними функціями  $W_{h2}$  та  $W_{i2}$ . На вході зазначеного об'єкта діє один сигнал управління  $u_1$ , а на виході два вихідні сигнали  $x_1$ ,  $x_2$ . Отже, з позицій сучасної теорії керування доцільно здійснити опис роботи такої системи у векторно-матричній формі та виходячи з рівнянь (1)-(3) скласти наступні вектори вихідних сигналів системи

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix};$$

та збурень

$$\psi = \begin{bmatrix} \psi_2 \\ \psi_3 \end{bmatrix}.$$

В такому разі рівняння (1)-(3) перетворюється на наступне матричне рівняння

$$Q_x x = Q_u u_1 + Q_\psi \psi, \quad (4)$$

де  $Q_x$  – матриця передаточних функцій розміру  $2 \times 2$ , що дорівнює

$$Q_x = \begin{bmatrix} 1 & -W_{k1}W_{i2} \\ -W_{h2} & 1 \end{bmatrix};$$

$Q_u$  – матриця передаточних функцій вигляду

$$Q_u = \begin{bmatrix} W_{k1}W_{i1} \\ W_{h1}W_{j1} \end{bmatrix};$$

$Q_\psi$  – матриця передаточних функцій впливу збурень

$$Q_{\psi} = \begin{bmatrix} W_{k2} & 0 \\ 0 & W_{h3} \end{bmatrix}.$$

В результаті множення лівої та правої частини рівняння (4) на обернену матрицю  $Q_x^{-1}$  визначено, що

$$x = F_u u_1 + F_{\psi} \psi, \quad (5)$$

де  $F_u$  – матриця передаточних функцій об'єкта керування від зміни положення ТРВ до вектору вихідних сигналів  $x$

$$F_u = Q_x^{-1} Q_u;$$

$F_{\psi}$  – матриця передаточних функцій об'єкта керування від вектору збурень  $\psi$  до вектору вихідних сигналів  $x$

$$F_{\psi} = Q_x^{-1} Q_{\psi}.$$

Використання рівняння (5) дозволяє суттєво спростити структурну схему замкненої системи (рис. 6), визначити декілька напрямів підвищення якості роботи системи стабілізації температури та як наслідок зменшення втрат при виробництві холоду.

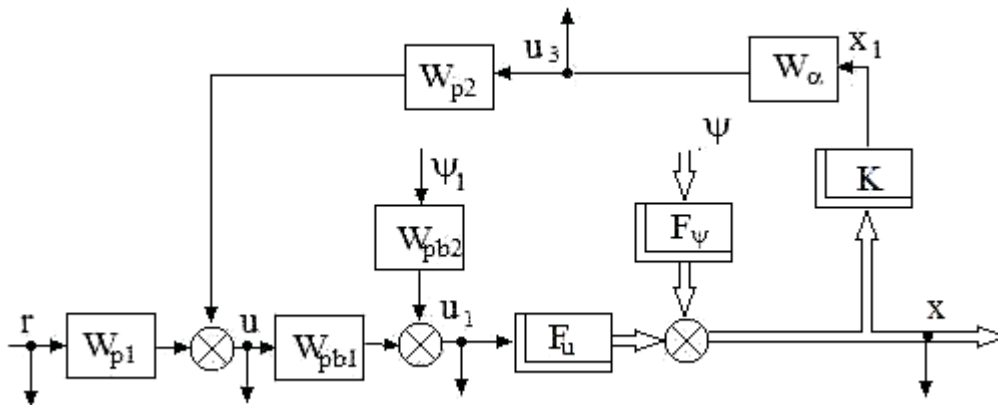


Рисунок 6 – Спрощена структурна схема системи

Перший напрям пов'язаний із тим, що в процесі роботи системи керування вимірюються обидві координати вектору  $x$ , а для стабілізації температури використовується лише одна. Отже, підвищити якість стабілізації можна за рахунок використання інформації про температуру хладагенту на виході випарника.

Другий напрям – збільшення кількості сигналів керування. Наприклад, забезпечити можливість зміни швидкості руху повітря крізь випарник.

Третій напрям стосується вдосконалення конструкції ТРВ та характеристик системи подачі хладагенту, які повинні бути спрямовані на зменшення неконтрольованого збурення  $\psi_1$ .

Четвертий напрям створення комбінованої системи стабілізації із зворотніми зв'язками за відхилення та за збуренням.

**Висновки.** Застосування системного підходу для дослідження складу системи автоматичної стабілізації температури у холодильній камері з одним ТРВ доводить можливість суттєво змінити проходження процесу керування за рахунок комплексного використання чотирьох напрямів модернізації системи керування. Реалізація

комплексного підходу вимагає використання експериментально-аналітичного методу проектування багатовимірних оптимальних систем стабілізації.

Отримані нові структурні схеми складають основу для адаптації відомих методів структурної ідентифікації динамічних об'єктів до визначення моделей динаміки неконтрольованих збурень, що діють на об'єкт керування 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. ... доктор техн. наук: 05.18.04, 05.18.12 / Эрлихман Владимир Наумович; Калининградский гос. техн. ун-т. – Калининград, 2005. – 49 с.
5. Згуровський, М.З. Основи системного аналізу [Текст] / М.З. Згуровський, Н.Д. Панкратова. – К.: Видавнича група ВНУ, 2007. – 544 с.
6. Контроллер испарителя АК-СС 550 для управления холодильными установками. Руководство пользователя. – Danfoos – RS.8E.N1.50. – 44 с.
7. 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.

**Sergey Osadchy, Prof., DSc., Dmytro Luzhkov, post-graduate**

*Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitsky, Ukraine*

### **Paths of Modernization of Automation Systems of the Refrigeration Equipment with a Single Thermal Adjusting Valve**

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 resulting new structural schemes form the basis for adapting known methods of structural identification of dynamical models of objects to determine the dynamics of uncontrolled disturbances acting on a control object in real operating conditions.

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

Одержано 23.02.17