

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОМЫМ НАСОСОМ В СОСТАВЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПАСТЕРИЗАЦИИ И ОХЛАЖДЕНИЯ МОЛОКА, часть II

Шит М.Л., Шит Б.М.
Институт Энергетики АН Молдовы

Аннотация. Целью работы является разработка схема системы компенсации возмущений, действующих на расход хладагента через испарители и газоохладители теплонасосной установки, входящей в состав пастеризационно-охладительной установки для молока, а также системы автоматического регулирования теплообменника с двумя выходными параметрами - температурами воды на выходе из цепей первичного и вторичного теплоносителя путем регулирования расхода вторичного теплоносителя и поверхности теплообмена. Структуры систем базируются на принципах координированного управления и управления многомерными системами. Показано, что предложенная структурная схема координированной системы регулирования суммы расходов через испарители для узлов приготовления горячей и ледяной воды обладает большей точностью в переходных процессах по сравнению с использованием независимых систем регулирования расхода рабочего тела каждого из испарителей. Система управления теплообменником с двумя управлениями (регулирование площади поверхности теплообмена и регулирование расхода вторичного теплоносителя) обладает хорошими характеристиками переходных процессов.

Ключевые слова: тепловой насос, пастеризационно-охладительная установка, диоксид углерода, система управления.

SISTEMUL DE DIRIJARE AUTOMATĂ A POMPEI DE CĂLDURĂ ÎN COMPONENTA INSTALAȚIEI DE PASTEURIZARE-RĂCIRE A LAPTELUI, partea II

Șit M.L., Șit B.M.

Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei

Rezumat. Scopul lucrării este elaborarea schemei sistemului de compensare a perturbațiilor, ce influențează consumul agentului frigorific prin evaporatoarele și răcitoarele de gaze a pompei de căldură, ce intră în componența dispozitivului de pasteurizare-răcire a laptelui, și sistemului de dirijare automată a termoschimbătorului cu doi parametri de ieșire – temperaturile apei la ieșire din lanțurile agentului termic primar și secundar prin reglarea consumului agentului termic secundar și suprafeței schimbului de căldură. Structurile sistemelor se bazează pe principiile controlului coordonat și controlului sistemelor multidimensionale. Este demonstrat că schema structurală propusă a sistemului coordonat de reglare a sumei consumurilor agenților frigorifici prin evaporatoare pentru nodurile de pregătire a apei calde și rece are o precizie mai înaltă în procesele tranzitorii în comparație cu utilizarea sistemelor de reglare independente a consumului corpului de lucru al fiecărui evaporator. Sistemul de dirijare a schimbătorului de căldură cu două dirijări (reglarea ariei suprafeței de schimb termic și reglarea consumului agentului termic secundar) are caracteristici bune ale proceselor tranzitorii. **Cuvinte-cheie:** sistem de dirijare, dioxid de carbon, pompa de căldură, instalație pentru pasteurizare-răcire a laptelui.

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR THE HEAT PUMP EMBEDDED IN THE MILK PASTEURIZATION AND COOLING INSTALLATION, part II

Șit M.L., Șit B.M.

Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova

Abstract. The goal of the present work is to elaborate the scheme of the disturbance compensation system, which is influencing the level of refrigerant consumption in evaporators and gas coolers of the heat pump embedded in the milk pasteurization and cooling installation, as well as, to design the automatic control system for the heat-exchanger with two output parameters – the water temperature at the outlet of the primary and secondary heat-carrying agent circuits by adjusting the consumption level in the secondary heat-carrying agent

circuit and by adjusting the heat exchange surface area. System structures are based on principles of the coordinated control and the multidimensional systems control. The proposed structural scheme of the coordinated system for control of the consumption in evaporators, both water heating and cooling segments, is more accurate in transient processes than alternative systems of non-integrated control of the working agent consumption in each evaporator. The heat exchanger control system with two controls controlling segments (controlling the heat exchange surface area and controlling the consumption level in the secondary coolant circuit) has proven to have good transient characteristics.

Key words: milk pasteurization and cooling installation, control system, carbon dioxide.

Условные обозначения	
T_H	температура горячего потока на выходе из теплообменника, °C
T_C	температура молока на выходе из теплообменника, °C
c_H	удельная теплоемкость горячего потока, (кДж/кг·°C)
c_C	удельная теплоемкость холодного потока, (кДж/кг·°C)
m_H	масса горячего потока в теплообменнике, кг
m_C	масса холодного потока в теплообменнике, кг
F_H	массовый расход горячей жидкости, жидкости, кг/с
F_C	массовый расход холодной жидкости, жидкости, кг/с
k	коэффициент теплопередачи, Вт/м·°C
A	Площадь поверхности теплообмена, м ² .
Подстрочные индексы в формулах и на рисунках обозначают: Н, С- холодный и горячий поток, 0 - исходный стационарный режим, М - перемешивание, МН - перемешивание горячего потока, МС - перемешивание холодного потока.	

1. Введение

В предыдущей работе авторов [1] была приведена гидравлическая схема пастеризационно-охладительной установки для молочных продуктов, а также схема системы управления температурой молока после газоохладителя. В данной работе решается задача стабилизации температуры молока перед испарителем теплового насоса и стабилизации температуры охлаждения молока при различных возмущающих воздействиях.

2. Структурная схема и управление режимом работы установки

Моделируемая установка с четырьмя испарителями [1] (рис.1) состоит из компрессора 1, газоохладителя 2, рекуперативного теплообменника рабочего тела 3, теплообменника дополнительного подогрева рабочего тела 4, регулирующих клапанов 5, 6, 7, 7а испарителей 8 и 9, 8а, 9а, эжектора 10, рекуперативного теплообменника на линии подачи холодного молока 11 и теплообменника подогрева воды для технологических нужд 12, отделителя жидкости, поз.15, аккумулятора жидкости перед компрессором, поз.14. Регулирующий клапан 13 служит для температурного регулирования режима работы теплообменника поз.4.

Назначение испарителя, поз.9, следующее: он предназначен для получения ледяной воды параллельно с испарителем, поз.8а, в летний период времени или для подачи воды на теплообменник поз.12, в зимний или переходный период времени, а также для того, чтобы обеспечить требуемый режим работы эжектора, поз. 10, с целью повышения COP теплового насоса. Испаритель, поз. 8а, предназначен для получения ледяной воды или самостоятельно, в зимний период времени, или параллельно с

испарителем, поз.9а, в летний или переходный периоды времени. В любом случае роль испарителей, поз 8а и 9а состоит в том, чтобы обеспечить необходимый расход хладагента через испаритель молочного контура, поз.8, и одновременное обеспечение остальными испарителями такого режима работы, при котором сумма расходов хладагента через газоохладитель будет обеспечивать одновременно режим нагрева и охлаждения молока. Варьируемым параметром является расход ледяной воды, который и должен обеспечить балансировку расходов хладагента, а также расход воды через испаритель, поз.9а, который обеспечивает расход воды через теплообменник, поз. 12, необходимый для обеспечения режима работы испарителя, поз.8. Выдерживатель молока после пастеризации на схеме явно не показан, и размещен между аппаратами 2 и 11. «Точечные» линии на рис. 1 обозначают трубопроводы горячей воды для технологических или санитарных нужд. Штрих - пунктирными линиями показаны трубопроводы подачи молока, линии черного цвета – трубопроводы хладагента. Числа черного цвета в кружках обозначают температуры сред, числа красного цвета - нумерацию аппаратов в соответствии со схемой, числа черного цвета – точки соответствия схемы ТНУ и схемы термодинамического цикла, линии синего цвета - трассы молока.

Схема работает следующим образом. Молоко поступает через рекуперативный теплообменник 11 на газоохладитель 2, где нагревается до 78°С. Далее молоко после теплообменника 11 поступает на теплообменник 4 (с целью стабилизации температуры хладагента после компрессора путем регулирования температуры хладагента перед компрессором), где охлаждается рабочим телом, подогревая его, и молоко поступает далее на теплообменник 12 и испарители 8 и 9, где охлаждается от 24°С до 4°С. Часть хладагента поступает на испарители 8а или 9а, которые вырабатывают дополнительный холод для стабилизации температуры воды, поступающей на теплообменник, поз.12 (использование испарителя 8а или 9а определяется исходной температурой входной воды) и для охлаждения других продуктов (творог, кефир и т.д.), а подогретая до 50°С вода может использоваться для санитарной обработки помещения и других целей.

После теплообменника 11 можно получить (при расходе молока 2,78 л/с) до 300 кВт тепловой мощности для нагрева водопроводной воды. Теплообменник 12 должен быть выполнен с переменной поверхностью теплообмена. Регулирование расходов и давлений на испарителях выполнено в виде двух регуляторов - одного регулятора расхода и второго - регулятора давления). В схеме установки по рис. 1 в теплообменнике, поз.4, производится дополнительный подогрев хладагента перед компрессором.

Особенностью системы управления установкой пастеризации молока на базе теплового насоса является ее свойство обеспечить поддержание баланса между заданным количеством теплоты, подведенной к газоохладителю, и заданным количеством теплоты, отобранной от охлаждаемого продукта, что достигается использованием дополнительных испарителей для получения холода («ледяная» вода) и горячей воды для технологических нужд. Как известно, соотношение между теплотой, отдаваемой в газоохладителе и теплотой, отбираемой от испарителей, определяется конструкцией теплового насоса. Горячая вода получается путем использования цепочки теплообменников 12 и 8а и 9а или 12 и 8а(9а) в зависимости от температуры источника холодного водоснабжения. Возмущениями в системе являются: температура источника холодного водоснабжения, случайные колебания температуры молока, подаваемого на пастеризацию и охлаждение, колебания расхода молока, изменение режима работы компрессора ТНУ и др. Регулируя расход воды от источника холодного водоснабжения в зависимости от заданной температуры молока перед испарителем, поз.8, можно получить заданную температуру горячей воды, а регулируя

расход хладагента через испаритель можно обеспечить заданный перегрев хладагента при заданном расходе воды.

2.1. Модель теплообменника с переменной площадью теплообмена

Целью функционирования системы управления режимом работы теплообменника, поз.12, является стабилизация выходных параметров теплоносителей:

- температуры молока, поступающей на теплообменник поз.8,
- температуры воды, поступающей на санитарные нужды (мойка оборудования и т.п.).

Поэтому для поддержания теплового режима этого теплообменника необходимо, как минимум, два управляющих воздействия. Такими управляющими воздействиями являются расход воды от источника холодного водоснабжения и площадь поверхности теплообмена. Поскольку приоритетом для установки является стабилизация режима охлаждения молока, то важно определить диапазон изменения второй выходной величины в процессе регулирования и определить допуски на изменения регулирующих величин (расхода молока, расхода воды). При выводе уравнений рассматриваем модель идеального вытеснения для молока и модель идеального перемешивания для воды. При построении передаточной функции теплообменника.

Запишем линеаризованную математическую модель динамического режима рассматриваемого теплообменника в абсолютных приращениях, например, по аналогии с [2,3].

$$\Delta W = k \cdot a_1 \cdot A(\Delta T_H - \Delta T_C) \quad (1)$$

$$\theta_H \frac{d\Delta T_H}{dt} = \Delta T_{H0} + \frac{W^0}{c_H (F_H^0)^2} \Delta F_H - \Delta T_H - \frac{1}{F_H^0 c_H} \Delta W \quad (2)$$

$$\theta_C \frac{d\Delta T_C}{dt} = \Delta T_{C0} - \frac{W^0}{c_C (F_C^0)^2} \Delta F_C - \Delta T_C - \frac{1}{F_C^0 c_C} \Delta W \quad (3)$$

где $\theta_H = \frac{m_H}{F_H^0}$ – постоянная времени пространства горячей жидкости теплообменника, с;

$\theta_C = \frac{m_C}{F_C^0}$ – постоянная времени пространства холодной жидкости теплообменника, с.

a_1 – коэффициент, учитывающий реальные разности температур потоков на концах теплообменника;

$$\theta_H \frac{d\Delta T_H}{dt} + \left(1 - \frac{1}{F_H^0 c_H} k a_1 A_0\right) \Delta T_H = \frac{W^0}{c_H (F_H^0)^2} \Delta F_H - \frac{1}{F_H^0 c_H} \Delta A \cdot k a_1 (T_{H0} - T_{C0}) - \frac{1}{F_H^0 c_H} k a_1 A_0 \Delta T_C \quad (4)$$

$$\theta_C \frac{d\Delta T_C}{dt} + \left(1 + \frac{1}{F_C^0 c_C} k a_1 A_0\right) \Delta T_C = -\frac{W^0}{c_C (F_C^0)^2} \Delta F_C - \frac{1}{F_C^0 c_C} \Delta A \cdot k a_1 (T_{H0} - T_{C0}) - \frac{1}{F_C^0 c_C} k a_1 A_0 \Delta T_H \quad (5)$$

$$T_H = \frac{\theta_H}{1 - \frac{1}{F_H^0 c_H} k a_1 A_0}; \quad T_C = \frac{\theta_C}{1 - \frac{1}{F_C^0 c_C} k a_1 A_0}; \quad (6)$$

Из рассмотрения этих уравнений видно влияние перекрестных связей по температуре теплоносителей и то, что два управления: расход холодного теплоносителя ΔF_c и изменение поверхности теплообмена ΔA , согласовано действуют на температуру холодного теплоносителя, а изменение температуры горячего теплоносителя действует по отношению к этим управлениям в противофазе. Т.е. случайное увеличение температуры горячего теплоносителя приведет к увеличению температуры холодного теплоносителя, что потребует снижения расхода холодного теплоносителя.

При уменьшении температуры холодного теплоносителя произойдет увеличение температуры горячего теплоносителя, что приведет к увеличению перегрева испарителя. Для устранения этого необходимо будет увеличить площадь поверхности теплообмена, что приведет к уменьшению температуры горячего теплоносителя и стабилизации режима. Если не использовать дополнительное управление в виде изменения площади поверхности теплообмена, то потребовалось бы уменьшить расход холодного теплоносителя, что привело бы к увеличению температуры холодного теплоносителя и дальнейшему увеличению температуры горячего теплоносителя, что могло бы привести к потере технической устойчивости системы управления.

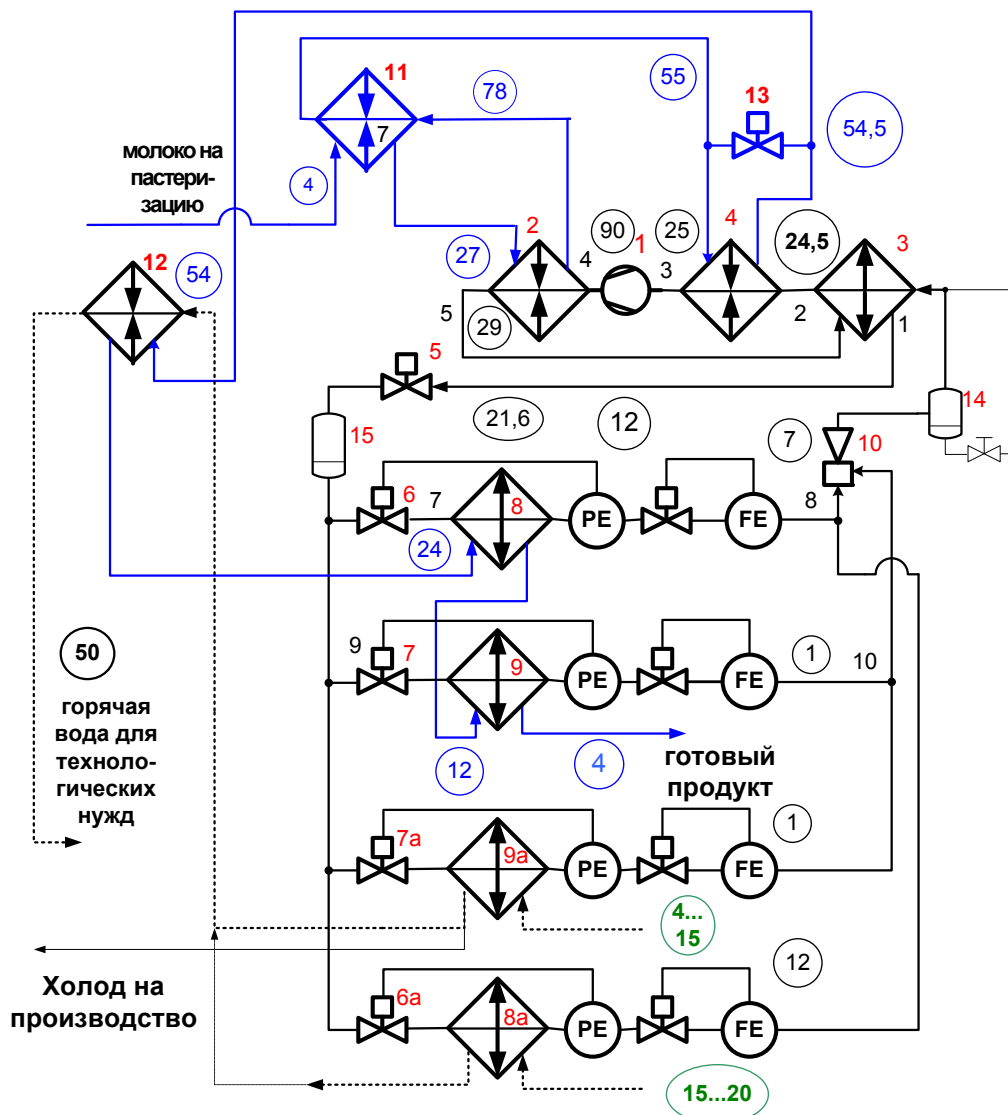


Рис. 1. Принципиальная схема теплового насоса, встроенного в пастеризационно-охладительную установку для молока

Структурная схема системы управления теплообменника, поз.12., приведена на рис.2. На рис.2 передаточная функция $W(p) = \frac{k_1}{T_A p + 1}$ принята эквивалентной замкнутой передаточной функции контура регулирования площади теплообменника (не показана). При моделировании этой системы в системе Matlab были приняты следующие значения параметров: $A_3 = -0,9; A_4 = -0,1; A_5 = 0,9$.

$$k_1 = 1; k_2 = 2; T_A = 6; \tau_H = 2; k_3 = 3; T_C = 30; T_{MC} = 10; \tau_C = 10; A_1 = -1; A_2 = 1.$$

Параметры параллельного ПИД регулятора контура регулирования температуры горячего теплоносителя следующие: $k_p = 0,48; k_i = 0,84; k_D = 0,2; T_{FD} = 21,53$. Здесь T_{FD} - значение коэффициента инерционного звена, включенного последовательно с дифференцирующим звеном ПИД- регулятора. Параметры параллельного ПИД регулятора контура регулирования температуры холодного теплоносителя следующие: $k_p = 0,47; k_i = 0,0076$. Результаты моделирования системы приведены на рис.3.

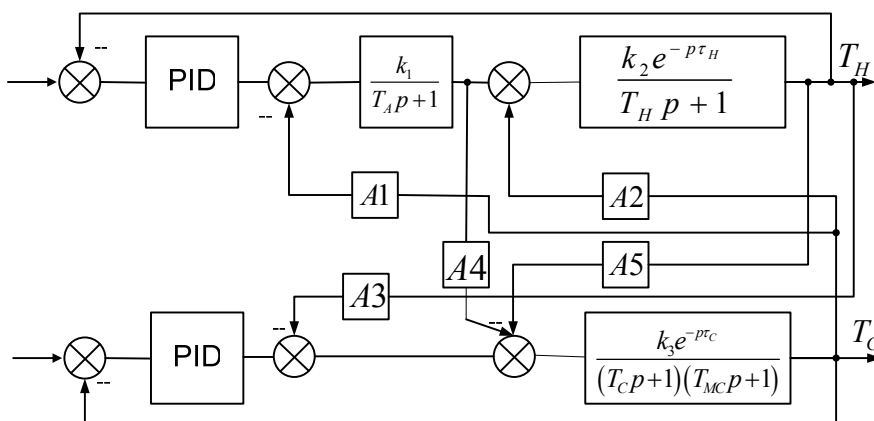


Рис. 2. Структурная схема системы управления промежуточным теплообменником охлаждения молока

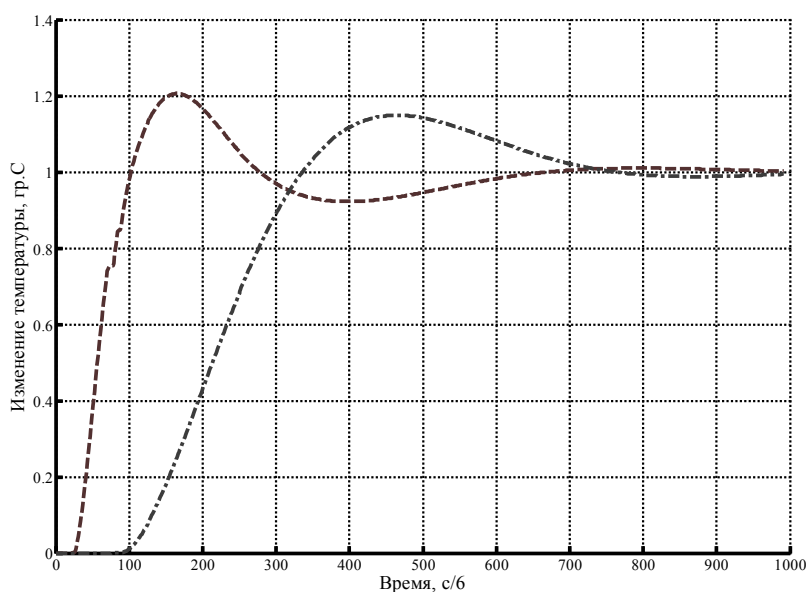


Рис. 3. Графики переходных процессов при скачкообразном возмущении сигналов задания на двух входах

Из рассмотрения графика видно, что качество переходных процессов может рассматриваться, как вполне удовлетворительное.

2.2. Координированная система автоматической стабилизации суммы расходов хладагента через два испарителя.

Обеспечение заданной температуры молока после испарителей, поз.8 и поз.9, а также перегрева рабочего тела после этих испарителей достигается регулированием давления после каждого испарителя и расхода хладагента через испаритель. Одновременно необходимо стабилизировать сумму расходов хладагента через испарители 8а и 9а с целью обеспечения заданных значений перегрева хладагента после них. С целью минимизации возмущений по расходу хладагента, действующих на газоохладитель и испарители 8 и 9 целесообразно разработать координированную систему регулирования суммы расходов через испарители 8а и 9а. Структурная схема системы приведена на рис. 4.

Схема моделировалась при следующих данных: $k_1 = 1; T_{F1} = 2; \tau_{F1} = 0,2; k_2 = 0,9; T_{F1} = 3; \tau_{F1} = 0,3$. Значения коэффициентов параллельных ПИД - регуляторов ПИД1 и ПИД2 были следующими: $k_p = 1,65; k_i = 1,07; k_D = -0,41; T_{FD} = 1,06$. Для регулятора ПИД: $k_p = 1,79; k_i = 1,26; k_D = 0,32; T_{FD} = 2,76$. Значения коэффициентов $a_1 = 0,5; a_2 = 0,5$. В качестве возмущения f был использован гауссовский белый шум.

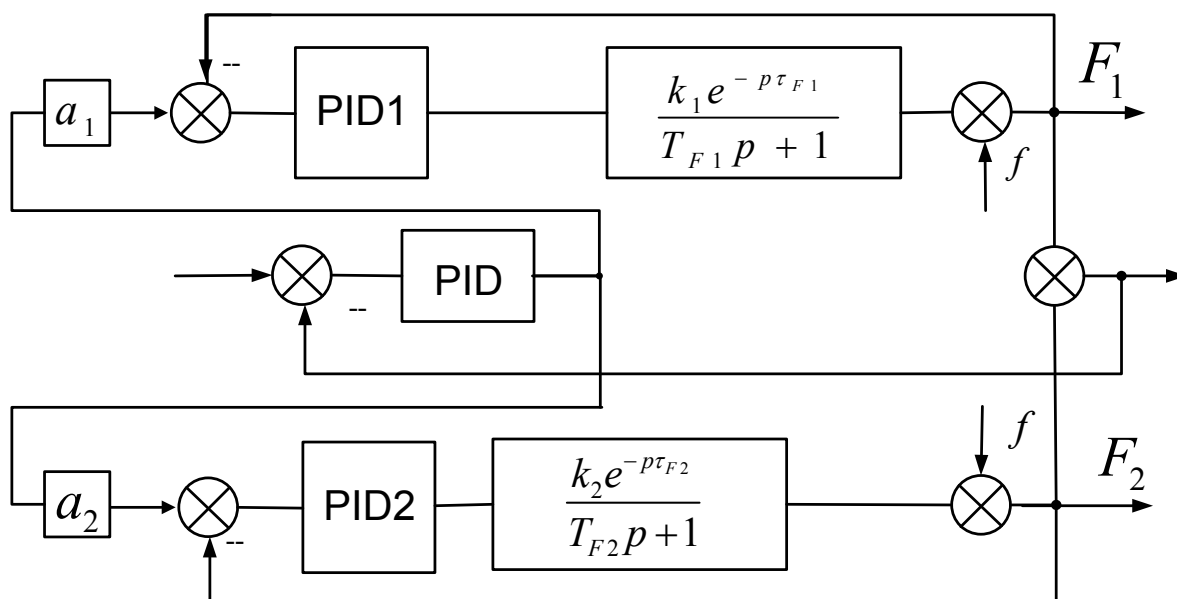


Рис.4. Структурная схема координированной системы управления.

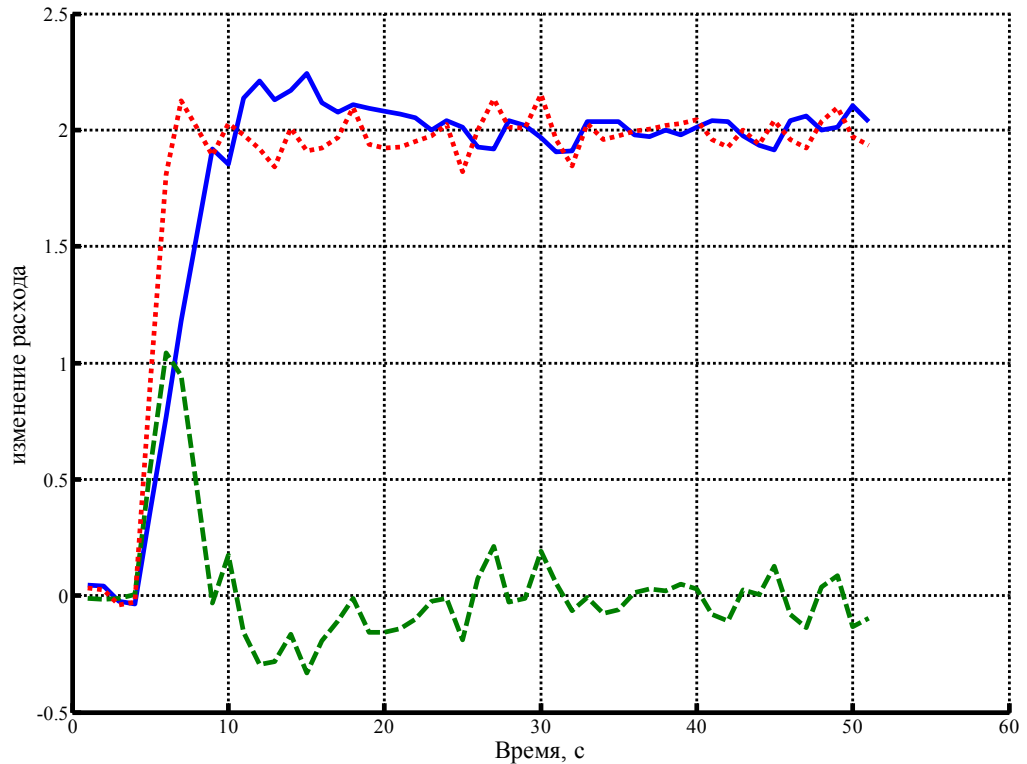


Рис. 5. Графики: суммы переходных процессов в системах координированного управления (точечная линия), некоординированного управления (сплошная линия) и их разности (пунктирная линия).

Из рассмотрения графиков (см. рис 5.), что координированная система обеспечивает более высокое качество управления, чем использование двух независимых систем, при действии скачкообразных возмущений по заданию и случайных возмущений расходов.

Выводы

1. В работе предложен двумерный регулятор для управления теплообменником с использованием расхода одного из теплоносителей и переменной поверхности теплообмена в качестве управляющих воздействий.
2. Показано, что использование ПИ- ПИД -регуляторов, а также перекрестных связей между каналами стабилизации температур горячего и холодного теплоносителей может обеспечить хорошее качество переходных процессов.
3. Предложена координированная система управления суммой расходов через два испарителя теплонасосной установки, являющейся базой для пастеризационно-охладительной установки для молока.
4. Качество переходных процессов в координированной системе управления оказалось выше, чем в отдельных системах управления каждым из испарителей.

Литература

- [1] Шит, М.Л.; Шит, Б.М. Система автоматического управления тепловым насосом в составе установки для пастеризации и охлаждения молока, часть I . Problemele Energeticii Regionale, 2012, 20 (3), 48-57.
http://ieasm.webart.md/data/m71_2_220.doc

- [2] Чернов Н.С., Каргина А.А., Пашкина А.В. «Математическое моделирование тепловых процессов в теплообменных аппаратах»
www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=43108
- [3] Хоршев В.И. "Математические модели объектов управления". . – М.: МИТХТ им М.В. Ломоносова, 2001 г., 75 с.
- [4] Mohler R.R. Bilinear control processes. With application to Engineering, Ecology and Medicine. Academic Press, New York and London, 1973.
- [5] S. Bittanti and L. Piroddi Nonlinear Identification and Control of a Heat Exchanger: A Neural Network Approach. .I. Franklin Institute Vol. 3348, No. 1, pp 135-153, 1997.
- [6] A. Kelman _ F. Borrelli Bilinear Model Predictive Control of a HVAC System Using Sequential Quadratic Programming. Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy) August 28 - September 2, 2011.

Сведения об авторах:



Шит Михаил Львович – к.т.н., зав. Лабораторией «Энергетической эффективности и систем управления» Института энергетики АНМ. Область научных интересов: тепловые насосы, автоматическое управление технологическими процессами в энергетике, промышленности, сельском хозяйстве. E-mail: mihail_sheet@yahoo.com



Шит Борис Михайлович – инженер-программист Института энергетики АНМ. Область научных интересов: тепловые насосы, автоматическое управление технологическими процессами в энергетике, промышленности, сельском хозяйстве. E-mail: boris@fld.rambler.ru.