

АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДЕАЛКОГОЛІЗАЦІЇ ВИНА В ВАКУУМНОМУ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОМУ ДИСТИЛЯТОРІ

*С. О. Пашков, магістрант кафедри автоматизації технологічних процесів і
робототехнічних систем*

*Д. С. Петренко, магістрант кафедри автоматизації технологічних
процесів і робототехнічних систем*

*О. В. Мазур, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації
технологічних процесів і робототехнічних систем*

Одеський Національний Технологічний Університет

E-mail: mazur.a.v.ua@gmail.com

Анотація. *Робота присвячена розробці системи автоматичного керування процесом безперервної деалкоголізації вина в вакуумному термоелектричному дистиляторі. Складено параметризовану технологічну схему процесу як об'єкту керування, виділено основні параметри, що підлягають регулюванню, а саме: тиск у ресивері, температура деалкоголізованого виноматеріалу на виході з випарника, температура в конденсаторі, визначено їх технологічні регламенти. Визначені відповідні керуючі дії: частота обертання вакуумного насоса, струм термоелектричного перетворювача випарника, струм термоелектричного перетворювача конденсатора. Розроблено структурну схему технологічного процесу деалкоголізації вина як об'єкту керування. На імітаційній моделі вакуумного дистилятора в середовищі Matlab Simulink проведені експерименти з дослідження динамічних властивостей основних каналів перетворень. З отриманих перехідних характеристик визначено передатні функції каналів регулювання. Проведено синтез тримірної системи автоматичного керування температури деалкоголізованого виноматеріалу на виході з випарника, температури в конденсаторі та тиску в ресивері. Розраховані початкові налаштування регуляторів, проведена параметрична оптимізація їх налаштувань та отримані перехідні характеристики регульованих змінних при східчастих вхідних впливах. Отримані системи автоматичного керування температури деалкоголізованого виноматеріалу на виході з випарника, температури в конденсаторі та тиску в ресивері перевірені на грубість при дії параметричних збурень.*

Ключові слова: *термоелектричний перетворювач, вакуумний дистилятор, деалкоголізація, система автоматичного керування*

Актуальність. *У бродильних виробництвах при виготовленні алкогольних*

напоїв постає проблема нормалізації вмісту алкоголю в готовому продукті. Процес деалкоголізації застосовується для зменшення вмісту алкоголю в одних продуктах та отримання спирту для зміцнення інших. Для підвищення енергоефективності процесу видалення алкоголю та поліпшення якості отриманих продуктів зазвичай використовується вакуумна дистиляція в плівкових випарниках. Використання термоелектричних перетворювачів (ТЕП) є одним зі шляхів зниження енергетичних витрат та зменшення рівня теплових «енергетичних відходів» при реалізації таких процесів. ТЕП підігрівають виноматеріал і випаровують спирти та охолоджують і конденсують пари спирту. Але їх введення збільшує кількість взаємозв'язків в об'єкті керування (ОК), що безумовно ускладнює керування технологічним процесом (ТП). Тому розробка ефективних алгоритмів керування таким процесом є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Процес деалкоголізації вина досить енергоємний і може відбуватися в апаратах як періодичної, так і безперервної дії. Нагрівання продукту та охолодження дистиляту виконують різними методами, але використання теплових насосів є одним зі шляхів суттєвого зниження енергетичних витрат та відповідно зменшення рівня теплових «енергетичних відходів» в технологічних процесах харчової промисловості [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Аналіз літературних джерел показує, що використання термоелектричних перетворювачів як теплових насосів дозволяє створювати компактні установки з низькою матеріалоємністю та високою енергетичною ефективністю [4, 5, 6]. У [5] розроблено та досліджено імітаційну модель процесу термовакуумної обробки харчових продуктів як об'єкту керування. У винаході [4] термоелектричні перетворювачі використовувалися для забезпечення теплових параметрів процесу та рекуперації тепла в малогабаритному термоелектричному вакуумному деалкоголізаторі періодичної дії. У [6] розглянута термоелектрична вакуумна мультиварка та автоматизоване робоче місце для її дослідження як об'єкту керування.

Мета дослідження – розробка багатомірної САК процесом деалкоголізації вина в вакуумному термоелектричному дистиляторі безперервної дії.

Матеріали і методи дослідження. Основним методом проведеного дослідження є метод системного аналізу. Ідентифікація моделей об'єкту виконувалася за інженерною методикою ідентифікації моделей об'єктів керування [7]. При синтезі системи автоматичного керування використані методики параметричного синтезу систем керування та оптимального параметричного синтезу [8]. Основним експериментальним методом обрано метод імітаційного моделювання.

Результати дослідження та їх обговорення. Параметризована технологічна схема процесу безперервної деалкоголізації вина в вакуумному термоелектричному дистиляторі наведена на рис. 1.

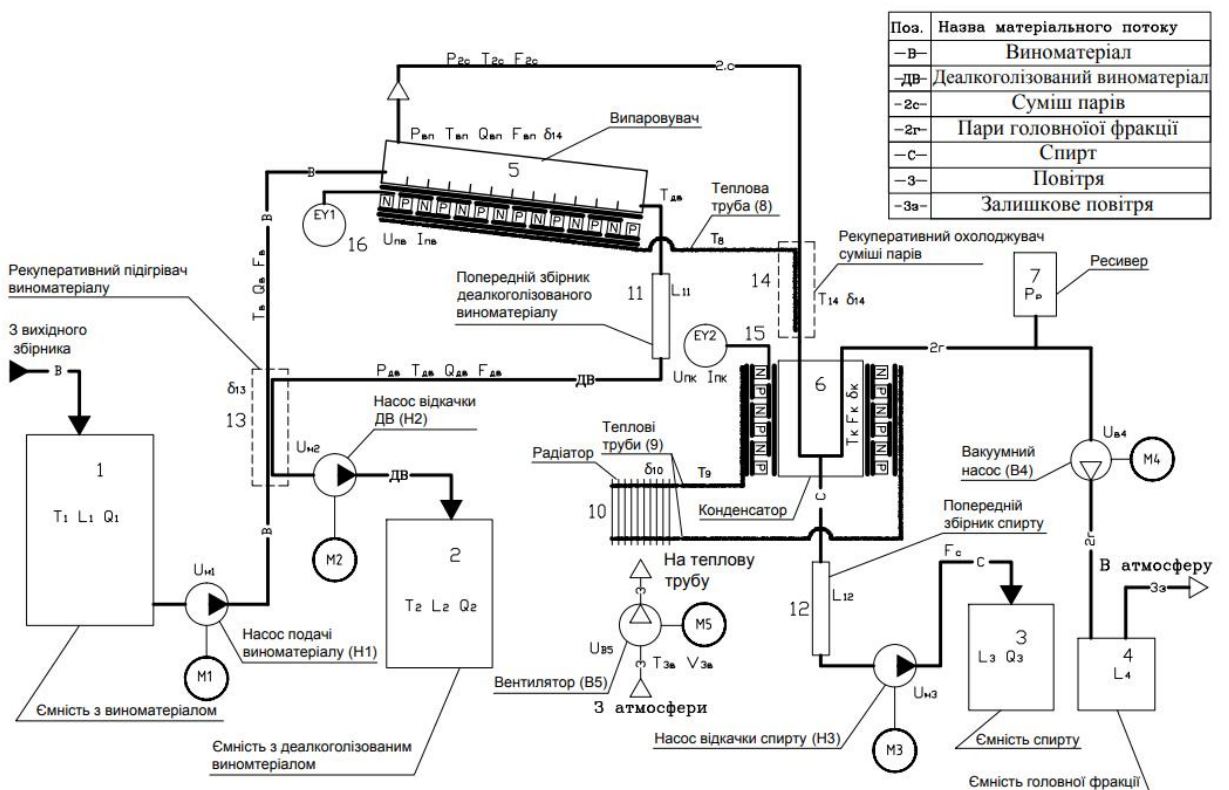


Рис. 1. Параметризована технологічна схема процесу безперервної деалкоголізації вина в вакуумному термоелектричному дистиляторі

Технологічне обладнання вакуумної системи, в якій реалізується процес безперервної деалкоголізації вина, складається з випарника 5, конденсатора 6, ресивера 7, попереднього збірника деалкоголізованого виноматеріалу 11, попереднього збірника спирту 12, рекуперативного підігрівача виноматеріалу 13, попереднього охолоджувача суміші парів 14 та трубопроводів між ними. Вакуумний насос Н4 підтримує тиск у системі (ресивері) на рівні 50-70 мБар. З приймальної

ємкості 1, що знаходиться під атмосферним тиском, насосом Н1 через рекуперативний підігрівач 13 виноматеріал подається у випарник 5. У ньому тепловий потік від «гарячої сторони» термоелектричного перетворювача 15 нагріває вино до температури +28 °С та випаровує спирти. Деалкоголізований виноматеріал надходить у попередній збірник ДВ 11, звідки відкачується насосом Н2 через рекуперативний підігрівач 13 в ємкість 2 з атмосферним тиском. Суміш парів з випарника 5 під дією перепаду тиску в паропроводі через попередній охолоджувач 14 надходять у конденсатор. У конденсаторі тепловий потік від «холодної сторони» термоелектричного перетворювача 16 охолоджує, конденсує пари та переохолоджує конденсат до температури +15...19 °С. Спиртовий конденсат збирається в збірнику 12 звідки насосом Н3 відкачується у ємкість 3 з атмосферним тиском. Пари головної фракції відкачуються вакуумним насосом Н4 в ємкість 4, де під дією атмосферного тиску конденсуються. Залишкове повітря видаляється в атмосферу.

Тепловий потік з "гарячої сторони" термоелектричного перетворювача 16 відводиться за допомогою теплових труб 9 до радіатора 10, що охолоджується вентилятором В5.

Для здійснення процесу вакуумної деалкоголізації вина необхідно підтримувати: 1) заданий рівень тиску в ресивері P_p ; 2) задану температуру деалкоголізованого виноматеріалу на виході з випарника $T_{дв}$, здійснюючи підвід тепла до випарника 5; 3) задану температуру в конденсаторі T_k , здійснюючи відвід надлишкового тепла з конденсатора 6.

Регламенти ведення технологічного процесу вакуумної деалкоголізації вина наведені в таблиці 1.

1. Таблиця регламентів ведення технологічного процесу безперервної деалкоголізації вина в вакуумному термоелектричному дистиляторі

Назва параметрів	Позначення	Одиниці вимірювання	Номінальне значення параметру	Припустимі відхилення від номіналу		
				тривалі		короткочасні
				величина	величина	
Температура ДВ на виході з випарника	$T_{дв}$	°С	28	±0.5	±1	60
Температура в конденсаторі	T_k	°С	18	±0.5	±1	60
Тиск у ресивері	P_p	мБар	68	±2	±5	60

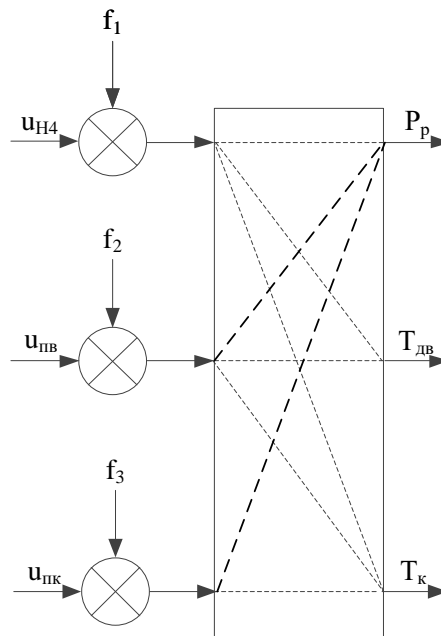


Рис. 2. Структурна схема технологічного процесу деалкоголізації вина як ОК

На рис. 2 наведені такі позначення:

Регульовані змінні: P_p – тиск у ресивері; $T_{дв}$ – температура ДВ на виході з випарника; T_k – температура в конденсаторі;

Керуючі впливи: $U_{н4}$ – частота обертання двигуна вакуум-наосу; $U_{пв}$ – струм живлення ТЕП випарника; $U_{пк}$ – струм живлення ТЕП конденсатора.

Всі вхідні дії, крім керуючих дій, віднесено до неконтрольованих збурень f_1 , f_2 , f_3 . Детерміновану складову цих збурень прикладено до керуючих дій.

Для попередньої оцінки енергетичних та конструктивних параметрів вакуумного термоелектричного дистилятора та дослідження динамічних властивостей основних каналів перетворень процесу проведено ряд експериментів з використанням імітаційної моделі процесу. У середовищі Matlab Simulink були організовані експерименти, в яких стабілізувались всі параметри процесу, крім досліджуваного, значення керуючого впливу якого (струм живлення ТЕП випарника, струм живлення ТЕП конденсатора або частота обертання вакуумного насосу) ступінчасто змінювалася. При цьому реєструвалася зміна параметрів в контрольних точках об'єкту ($T_{дв}$ – температура ДВ на виході з випарника, T_k – температура в конденсаторі, P_p – тиск у ресивері). Отримані перехідні

характеристики зображені на рисунках 3, 4, 5.

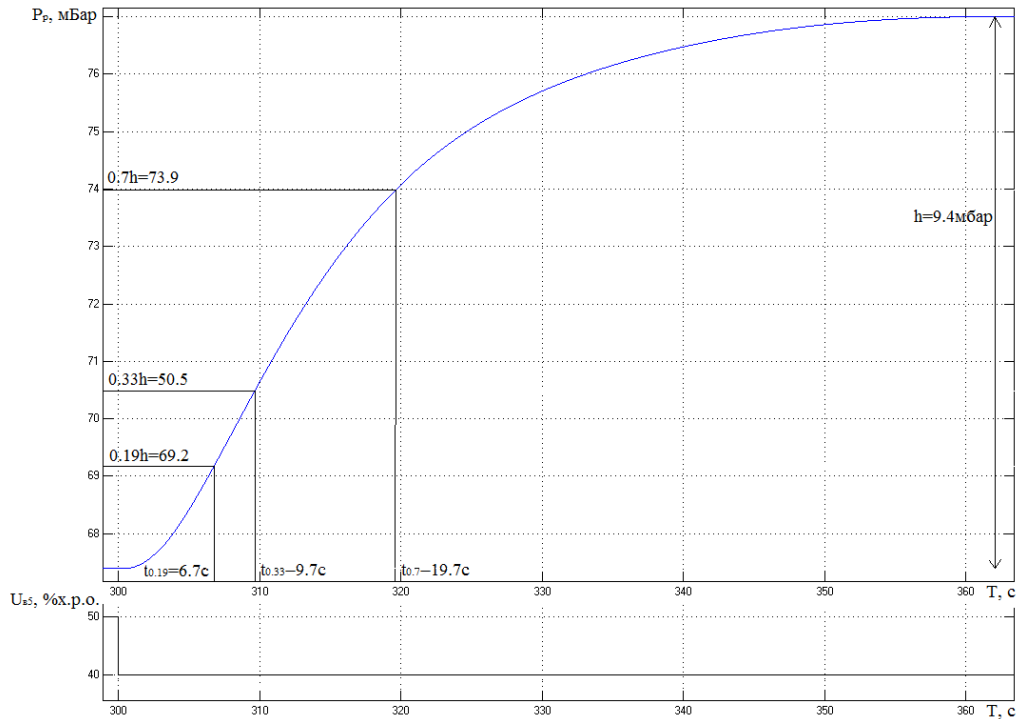


Рис. 3. Реакція тиску в ресивері на ступінчасту зміну частоти обертання вакуумного насоса

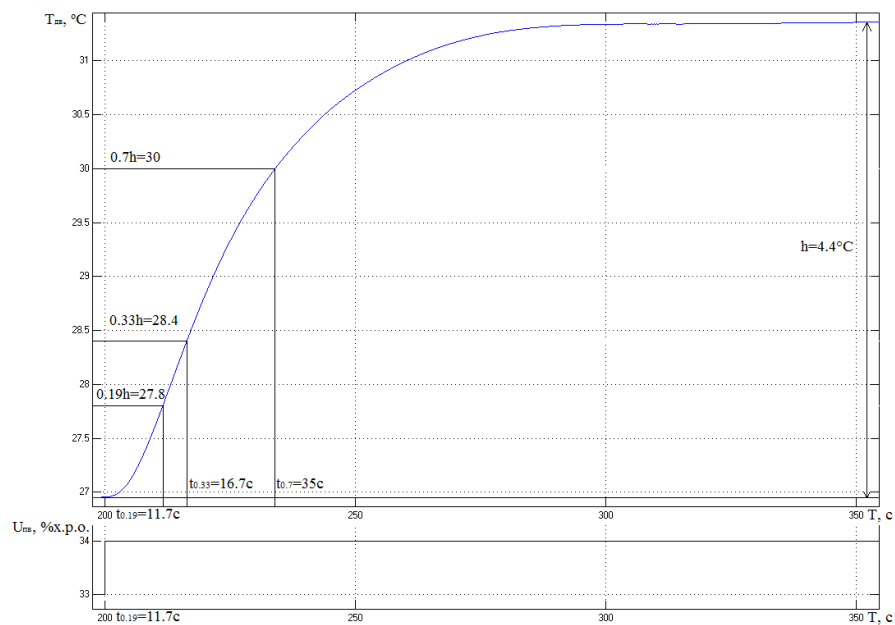


Рис. 4. Реакція температури ДВ на виході з випарника на ступінчасту зміну струму живлення ТЕП випарника

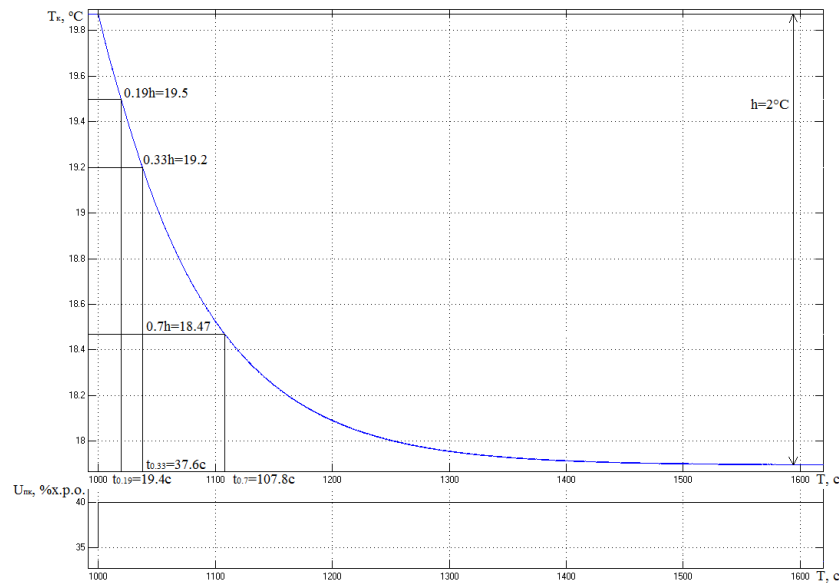


Рис. 5. Реакція температури в конденсаторі на ступінчасту зміну струму живлення ТЕП конденсатора

Ідентифікація моделей динаміки процесу безперервної деалкоголізації вина в вакуумному термоелектричному дистиляторі проведена методом Мініної першого порядку, результати наведені у таблиці 2.

2. Результати ідентифікації моделей динаміки процесу безперервної деалкоголізації вина в вакуумному термоелектричному дистиляторі

Канал ОК	Модель динаміки першого порядку
« $u_{пв} - T_{дв}$ »	$W_0(p) = \frac{4,4 \cdot e^{-7,4p}}{23p + 1}$
« $u_{пк} - T_k$ »	$W_0(p) = \frac{-0,4 \cdot e^{-2,5p}}{87,8p + 1}$
« $u_{н4} - P_p$ »	$W_0(p) = \frac{-0,94 \cdot e^{-4,7p}}{12,5p + 1}$

Структурна схема тримірної САР процесу деалкоголізації вина наведена на рис.

6.

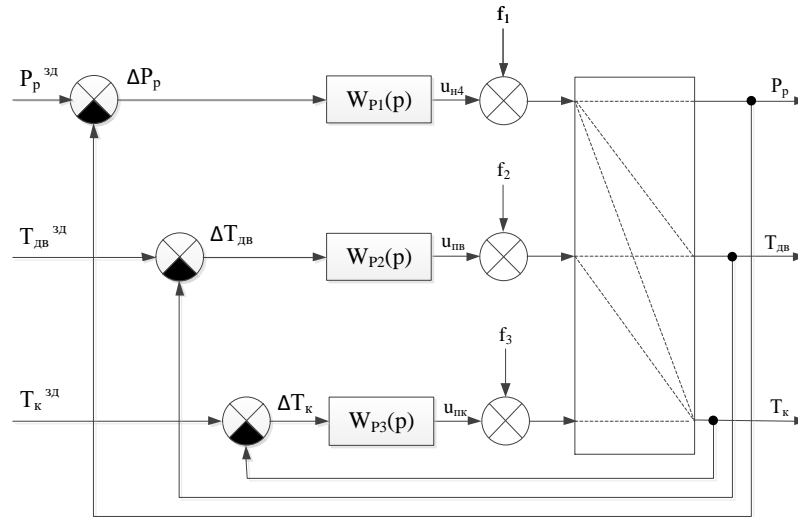


Рис. 6. Структурна схема тримірної САР процесу деалкоголізації вина

На рисунку: $u_{н4}$ – частота обертання вакуумного насоса; P_p – тиск у ресивері; P_p^{zd} – задане значення тиску у ресивері; ΔP_p – помилка регулювання тиску у ресивері; f_1 – вектор неконтрольованих збурень; $W_{p1}(p)$ – передатна функція регулятора тиску у ресивері; $u_{пв}$ – струм ТЕП випарника; $T_{дв}$ – температура ДВ на виході з випарника; $T_{дв}^{zd}$ – задане значення температури ДВ на виході з випарника; $\Delta T_{дв}$ – помилка регулювання температури ДВ на виході з випарника; f_2 – вектор неконтрольованих збурень; $W_{p2}(p)$ – передатна функція регулятора температури вина у випарнику; $u_{нк}$ – струм ТЕП конденсатора; T_k – температура в конденсаторі; T_k^{zd} – задане значення температури в конденсаторі; ΔT_k – помилка регулювання температури в конденсаторі; f_3 – вектор неконтрольованих збурень; $W_{p3}(p)$ – передатна функція регулятора температури в конденсаторі.

За методикою Копеловича А. П. розраховано початкові наближення параметрів налаштування ПІД-регуляторів температури ДВ на виході з випарника, температури в конденсаторі та тиску в ресивері для 20 % коливального перехідного процесу. Проведено їх параметричну оптимізацію при східчастих вхідних впливах за модульним інтегральним критерієм у середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink. Результати оптимізації налаштувань ПІД-регуляторів наведено у таблицях 3, 4.

3. Результати параметричної оптимізації налаштувань регуляторів температури

Назва змінної	Оптимальне значення	Нижнє обмеження	Початкове наближене	Верхнє обмеження	Значення критерію оптимальності: до – 50.819 після – 20.4796 оптимізації.
Налаштування регулятора температури ДВ на виході з випарника					
Kr1	0.81256	0	0.7	10	
Tiz1	12.9226	0	14.8	30	
Trp1	7.1168	0	7.4	20	
Налаштування регулятора температури в конденсаторі					
Kr2	-94.114	-100	-87.8	0	
Tiz2	4.5818	0	5	20	
Trp2	2.4853	0	2.5	10	

4. Результати параметричної оптимізації налаштувань регуляторів тиску в ресивері

Назва змінної	Оптимальне значення	Нижнє обмеження	Початкове наближене	Верхнє обмеження	Значення критерію оптимальності: до – 38.1607 після – 27.5817 оптимізації.
Kr	-3.3133	-15	-2.8	0	
Tiz	6.8933	0	9.4	20	
Trp	4.7	0	4.7	30	

Отримана САР з оптимальними налаштуваннями ПІД-регуляторів перевірена на грубість при дії параметричних збурень у середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink. Результати перевірки САР на грубість наведено на рис. 8.

Значення параметрів об'єкта керування і значення критерію оптимальності		
1. k1=1.24 k2=1.2 J=31.1932 k3=1 k4=0.8	2. k1=1 k2=1.2 J=31.2096 k3=1.2 k4=0.8	3. k1=0.8 k2=1.2 J=31.2106 k3=1.2 k4=0.8
4. k1=0.8 k2=1.2 J=31.2117 k3=1 k4=0.8	5. k1=1 k2=1.2 J=31.2131 k3=1 k4=0.8	6. k1=1 k2=0.8 J=42.7359 k3=0.8 k4=1.2
7. k1=1.24 k2=1.2 J=42.9475 k3=0.8 k4=1.2	8. k1=1.24 k2=1 J=43.2294 k3=0.8 k4=1.2	9. k1=1.24 k2=0.8 J=43.6311 k3=0.8 k4=1.2

Рис. 8. Результати перевірки САР на грубість

У середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink отримані перехідні характеристики САР з оптимальними налаштуваннями ПІД-регуляторів температури ДВ на виході з випарника, температури в конденсаторі та тиску в ресивері при східчастих вхідних впливах. Перехідні характеристики наведено на рисунках 9, 10.

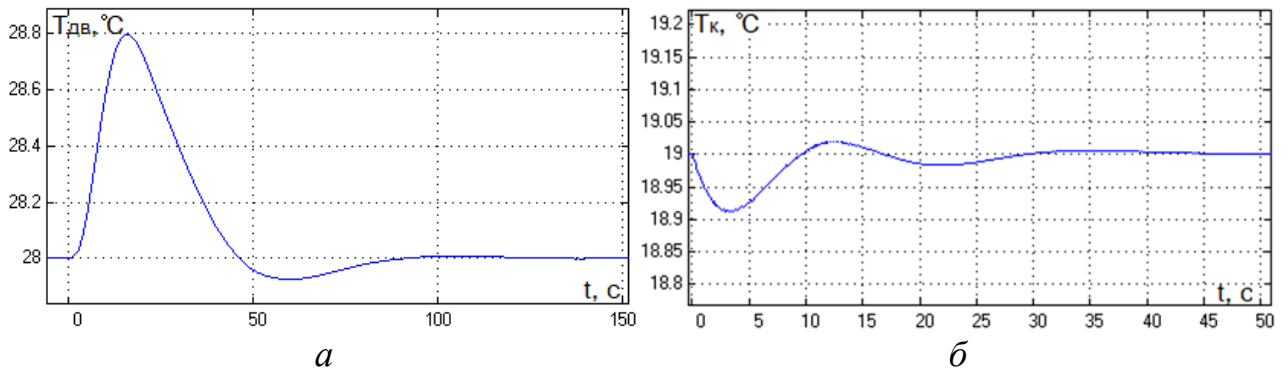


Рис. 9. а – перехідна характеристика САР з оптимальними налаштуваннями ПД-регулятора температури ДВ на виході з випарника при східчастому входному впливі; б – перехідна характеристика САР з оптимальними налаштуваннями ПД-регулятора температури в конденсаторі при східчастому входному впливі

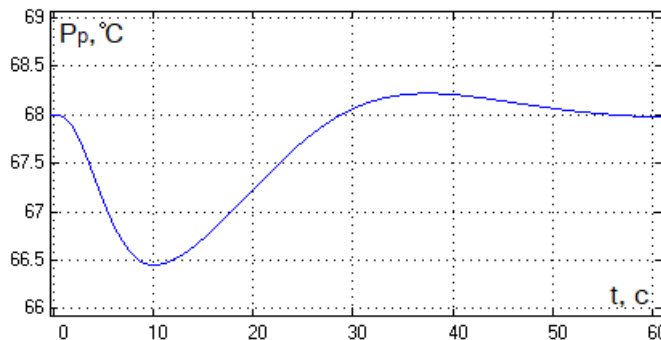


Рис. 10. Перехідна характеристика САР з оптимальними налаштуваннями ПД-регулятора тиску в ресивері при східчастому входному впливі

В

исновки і перспективи. Наукова робота виконана з метою оцінки енергетичних та конструктивних параметрів для побудови фізичної моделі вакуумного термоелектричного дистильатора, а також дослідження можливостей автоматичного керування енергоефективним процесом безперервної dealкоголізації вина. Виконано аналіз, синтез та параметричну оптимізацію САК базової структури. Розроблену САК реалізовано в середовищі MATLAB Simulink. Синтезовані САК температури dealкоголізованого виноматеріалу на виході з випарника, температури в конденсаторі та тиску в ресивері перевірені на грубість при дії параметричних збурень, отримані перехідні характеристики при східчастих входних впливах. Отримані результати дозволять провести аналіз процесу dealкоголізації з метою пошуку найбільш енергоефективних режимів його ведення за рахунок вдосконалення алгоритмів керування.

Список використаних джерел

1. Kovalchuk, D., Mazur, A., & Hudz, S. (2017). The model for power efficiency assessment of condensation heating installations. *Automation of Technological and Business Processes*, 9(3). <https://doi.org/10.15673/atbp.v9i3.715>
2. Ковальчук Д., Мазур О., Гудзь, С. (2018). Дослідження процесів утилізації тепла пароповітряних сумішей: лабораторна установка, вимірювані змінні, автоматизація експериментів. *Automation of Technological and Business Processes*, 10(2). <https://doi.org/10.15673/atbp.v10i2.981>
3. Ковальчук, Д., & Мазур, О. (2020). Дослідження процесів утилізації тепла пароповітряних сумішей: імітаційне моделювання. *Automation of Technological and Business Processes*, 11(4), 68-82. <https://doi.org/10.15673/atbp.v11i4.1601>
4. Малогабаритний термоелектричний вакуумний деалкоголізатор: пат. на винахід 117540 Україна, МПК С12Н 3/02, В01D 3/10. № а201704635; заявл. 13.05.2017 ; опубл. 10.08.2018, Бюл. № 15.
5. Мазур О. В., Грабанова К. Є., Гудзь С. С. Розробка та дослідження імітаційної моделі процесу термовакуумної обробки харчових продуктів як об'єкту керування. *Automation of technological and business processes*. 2020. Т. 12. №. 1. С. 75-88.
6. Hudz S., Mazur A., Kovalchuk D. The thermoelectric vacuum crock-pot and the automated workplace for its research as a control object. *Automation of technological and business processes*. 2017. Т. 9. №. 2.
7. Хобін В. А. Конспект лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування» для студентів, які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форми навчання. Ч1. Одеса: ОНАХТ, 2012. 112с.
8. Хобін В. А. Конспект лекцій з курсу «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів» для студентів, які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форми навчання. Одеса: ОНАХТ, 2016. 96 с.

References

1. Kovalchuk, D., Mazur, A., Hudz, S. (2017). The model for power efficiency assessment of condensation heating installations. *Automation of Technological and Business Processes*, 9(3). <https://doi.org/10.15673/atbp.v9i3.715>
2. Kovalchuk D., Mazur O., Hudz, S. (2018). Doslidzhennia protsesiv utylizatsii tepla paropovitrianykh sumishei: laboratorna ustanovka, vymiriuvani zminni, avtomatyzatsia eksperymentiv [Research of heat utilization processes of steam-air mixtures: laboratory model, measured variables, automation of experiments]. *Automation of Technological and Business Processes*, 10(2). <https://doi.org/10.15673/atbp.v10i2.981>
3. Kovalchuk D., Mazur O. (2020). Doslidzhennia protsesiv utylizatsii tepla paropovitrianykh sumishei: imitatsiine modeliuвання [Study of processes of heat utilization of steam-air mixtures: simulation modeling]. *Automation of Technological and Business Processes*, 11(4), 68-82. <https://doi.org/10.15673/atbp.v11i4.1601>
4. Hudz S. S., Mazur O. V. (2018). Small-sized thermoelectric vacuum dealcoholizer. Patent of Ukraine for an invention. C12H 3/02, B01D 3/10. № а201704635; declared

13.05.2017; published 10.08.2018, № 15.

5. Mazur O. V., Hrabanova K. Ye., Hudz, S. (2020). Rozrobka ta doslidzhennia imitatsiinoi modeli protsesu termovakuumnoi obrobky kharchovykh produktiv yak ob'ektu keruvannia. [Development and research of a simulation model of the process of thermovacuum processing of food products as an object of control]. *Automation of Technological and Business Processes*, 12(1), 75-88. <https://doi.org/10.15673/atbp.v12i1.1708>

6. Hudz S., Mazur A., Kovalchuk D. (2017). The thermoelectric vacuum crock-pot and the automated workplace for its research as a control object. *Automation of Technological and Business Processes*, 9(2). <https://doi.org/10.15673/atbp.v9i2.562>

7. Khobin V. A. (2012) Konspekt lektsii z kursu «Teoriia avtomatychnoho keruvannia» dlia studentiv, yaki navchaiutsia za spetsialnistiu 151 «Avtomatyzatsiia ta komp'iuterno-intehrovani tekhnolohii» dennoi ta zaochnoi formy navchannia [Synopsis of lectures from the course "Theory of automatic control" for students studying in the specialty 151 "Automation and computer-integrated technologies" of full-time and part-time education]. Odesa: ONAFT, 112.

8. Khobin V. A. (2016) Konspekt kursu lektsii z dystsypliny "Identyfikatsia ta modeliuvannia tekhnolohichnykh ob'ektiv" dlia studentiv, yaki navchaiutsia za spetsialnistiu 151 "Avtomatyzatsiia ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii" dennoi ta zaochnoi formy navchannia [Synopsis of lectures of the course "Identification and modeling of technological objects" for students studying in the specialty 151 "Automation and computer-integrated technologies" of full-time and part-time study]. Odesa: ONAFT, 96.

AUTOMATIC CONTROL OF THE PROCESS OF CONTINUOUS DEALCOHOLIZATION OF WINE IN A VACUUM THERMOELECTRIC DISTILLER

S. Pashkov, D. Petrenko, O. Mazur

Abstract. *The work is devoted to the development of a system for automatic control of the process of continuous dealcoholization of wine in a vacuum thermoelectric distiller. A parameterized technological diagram of the process as a control object has been developed, the main parameters subject to regulation have been identified, namely the pressure in the receiver, the temperature of the dealcoholized wine material at the outlet of the evaporator, the temperature in the condenser, and their technological regulations have been determined. The corresponding control actions are defined: the rotation frequency of the vacuum pump, the current of the thermoelectric converter of the evaporator, the current of the thermoelectric converter of the condenser. A structural diagram of the technological process of wine dealcoholization as an object of management has been developed. On the simulation model of a vacuum distiller in the Matlab Simulink environment, experiments were conducted to study the dynamic properties of the main channels of transformations. From the received transient characteristics, the transfer functions of the control channels are determined. The synthesis of a three-dimensional system of automatic control of the temperature of the dealcoholized wine material at the outlet of the evaporator, the temperature in the condenser and the pressure in the receiver*

was carried out. The initial settings of the regulators were calculated, the parametric optimization of their settings was carried out, and the transient characteristics of the regulated variables under stepped input influences were obtained. The obtained systems of automatic control of the temperature of the dealcoholized wine material at the outlet of the evaporator, the temperature in the condenser and the pressure in the receiver are tested for roughness under the influence of parametric disturbances.

Key words: *thermoelectric converter, vacuum distiller, dealcoholization, automatic control system*