

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 519.712.7, 681.5.013, 681.5.032

ГАВРИШ Б. А., асп., інженер з АСКВ; КОРЖИК М. В., к. т. н., доц.;

ЛУКІНЮК М. В., магістр, ст. вик.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
товариство з додатковою відповідальністю «Інститут радіовиміральної апаратури»

СТАТИКА РОТОРНОГО РЕКУПЕРАТОРА: ПОШУК ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ

Робота рекуператора потребує електричної енергії, проте заощаджує теплову. Актуальною проблемою є знаходження оптимального режиму роботи рекуператора.

У попередній статті описано проведення експерименту, наведені результати експериментальних досліджень, отримано модель статичної роторного рекуператора та порівняно її з експериментом – порівняння показало достатню точність (порядку десятої долі градуса). Експериментальні дослідження проводились з рекуператорами виробництва REMAK моделі XPXR.

Сформовано задачу статичної оптимізації за принципом найбільшої економічної вигоди (найбільшого енергозбереження в перерахунку на вартість енергії). Поставлена задача вирішена для випадку отримання теплової енергії від власної котельної підприємства.

Отриманий алгоритм пошуку оптимальних режимів роботи впроваджено для підвищення енергозбереження в ТДВ "Інститут радіовиміральної апаратури" в холодний період року.

Ключові слова: роторний рекуператор, оптимальні режими роботи.

DOI: 10.20535/2617-9741.4.2020.219781

© Гавриш Б. А., Коржик М. В., Лукінюк М. В., 2020.

Постановка проблеми. На роботу рекуператора витрачається електроенергія (двигун обертає його, продуктивність двигуна визначається частотним перетворювачем), тож постає задача знаходження оптимальної продуктивності для досягнення оптимуму між вартістю енергії що витрачається на обертання та вартістю заощаджуваної теплової енергії.

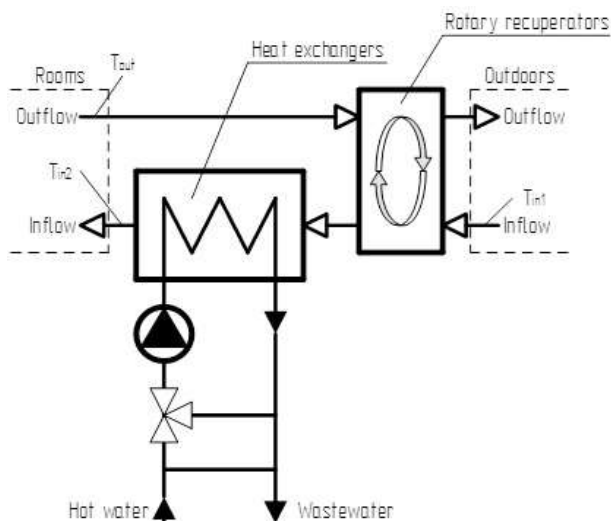
Аналіз попередніх досліджень. У попередній статті ("Статика роторного рекуператора: натурні дослідження та ідентифікація") наведено результати натурних досліджень і отримано модель статичної роторного рекуператора порівняння якої з експериментом дало похибку порядку десятої долі градуса.

Загальною науковою проблемою є задача пошуку оптимальних режимів роботи роторних рекуператорів [1, 2]. Оскільки модель статичної роторного рекуператора вже отримана, а її адекватність підтверджена експериментально, то невирішеною частиною наукової проблеми є формування і розв'язок задачі статичної оптимізації.

Метою статті є розробка алгоритму пошуку оптимального статичного режиму, такого, що задовольняв би умові мінімізації фінансових витрат.

Виклад основного матеріалу. В цій статті використано модель статичної роторного рекуператора що розроблена на базі результатів проведених натурних досліджень. Проведення експериментів та ідентифікація описано у статті «Статика роторного рекуператора: натурні дослідження та ідентифікація».

Технологічна схема припливно витяжних вентиляційних установок обладнаних рекуператором наведена на рисунку (опущено фільтри, двигуни, повітряні заслонки тощо). Детальний опис процесу можна знайти в літературі, наприклад у книзі [3 – 5].



T_{in1} – температура вулиці, °C; T_{in2} – температура притоку, °C; T_{out} – температура приміщення, °C

Рис. 1 – Технологічна схема припливно-витяжної вентиляційної установки з рекуперацією

В попередній статті («Статика роторного рекуператора: натурні дослідження та ідентифікація») на базі проведених натурних досліджень було отримано наступну модель статика роторного рекуператора:

$$T_{in2} = T_{out} - \varphi(T_{out} - T_{in1})e^{-(5.83+0.078P)n} + \Delta,$$

де T_{in2} , T_{out} , T_{in1} – температури повітря що подається в приміщення, температура повітря що викачується з приміщення і температура зовнішнього повітря, відповідно, °C; φ – параметр що вказує на схему підключення двигуна рекуператора (при підключенні за схемою трикутник $\varphi = 1$, при підключенні за схемою зірка $\varphi = 0,644$); P – потужність двигуна рекуператора, Вт; n – продуктивність рекуператора в абсолютних одиницях (від 0 до 1); Δ – відхилення спричинене нагрівом повітря двигунами, потоком тепла через стінки тощо (різниться в залежності від установки і зовнішніх умов і потребує адаптації), °C.

Ця модель відрізняється від існуючих [6, 7, 8] в першу чергу простотою розрахунку, хоч вона і менш деталізована. Незважаючи на простоту, порівняння з експериментом показало високу точність. Простота

моделі дозволяє інтегрувати базовані на ній алгоритми керування у вже існуючу систему керування без потреби покупки додаткового обладнання.

В першу чергу необхідно сформулювати задачу оптимізації. Оптимальний статичний режим має бути найбільш економічно вигідним і відпрацьовувати уставку. У подібних установках енергія витрачається на обертання рекуператора та нагрів повітря в теплообміннику [9]. Тобто функцією цілі буде:

$$I = F_R + F_H \rightarrow \min,$$

де F_R та F_H – фінанси витрачені на роботу рекуператора та теплообмінника відповідно, у.о..

Обмеженнями при цьому будуть:

$$T_{SP} \geq T_H, n \geq 0, n \leq 1,$$

де T_H – температура повітря після теплообмінника, °C; T_{SP} – уставка температури повітря, °C.

Можемо розписати функцію цілі так:

$$I = nPF_e + \frac{F_g c_a G_a}{q_g \eta} \min(0, T_{SP} - T_{in2}),$$

де F_e – вартість електроенергії, у.о./Вт; F_g – вартість газу, у.о./м³; c_a – питома теплоємність повітря, Дж/(кг·K); G_a – масова витрата повітря, кг/с. q_g – теплота отримувана з одиниці об'єму газу, Дж/м³; η – ефективність отримання теплоти з газу в котельній і її транспортування до повітря через теплообмінник.

Наявність функції \min спричинена тим що температура після рекуператора фізично може бути більшою за уставку, а таким чином ми внесли обмеження $T_{SP} \geq T_H$.

Підставивши в отриману функцію модель статика рекуператора отримаємо:

$$I = nPF_e + \frac{F_g c_a G_a}{q_g \eta} \min\left(0, T_{SP} - T_{out} + \varphi(T_{out} - T_{in1})e^{-(5.83+0.078P)n} - \Delta\right).$$

Перша похідна по керуванню (продуктивності рекуператора) має такий вигляд:

$$\frac{\partial I}{\partial n} = PF_e - \frac{F_g c_a G_a \varphi (T_{out} - T_{in1}) (5.83 + 0.078P)}{q_g \eta} e^{-(5.83+0.078P)n} \min\left(0, T_{SP} - T_{out} + \varphi(T_{out} - T_{in1})e^{-(5.83+0.078P)n} - \Delta\right).$$

Прирівняємо цей вираз до нуля і запишемо при $T_{SP} - T_{out} + \varphi(T_{out} - T_{in1})e^{-(5.83+0.078P)n} - \Delta > 0$:

$$e^{-(5.83+0.078P)n} \left(T_{SP} - T_{out} + \varphi(T_{out} - T_{in1})e^{-(5.83+0.078P)n} - \Delta \right) = \frac{PF_e q_g \eta}{F_g c_a G_a \varphi (T_{out} - T_{in1}) (5.83 + 0.078P)},$$

а при $T_{SP} - T_{out} + \varphi(T_{out} - T_{in1})e^{-(5.83+0.078P)n} - \Delta \leq 0$ отримаємо $PF_e = 0$.

Оскільки другий випадок виникає при температурі після рекуператора більшій за завдання, відсутність екстремуму не спричиняє жодних незручностей. Знайдемо другу похідну для першого випадку:

$$\frac{\partial^2 I}{\partial n^2} = \frac{F_g c_a G_a}{q_g \eta} \varphi (T_{out} - T_{in1}) (5.83 + 0.078P)^2 e^{-(5.83+0.078P)n}.$$

Очевидно що її знак, а отже і тип екстремуму (максимум чи мінімум), визначається лише складовою $T_{out} - T_{in1}$, отже при $T_{out} > T_{in1}$ в точці де перша похідна рівна нулю існує локальний мінімум. Якщо ж температура в приміщенні менша за температуру на вулиці, очевидно що недоцільно використовувати рекуператор для нагріву припливного повітря.

Прирівняємо першу похідну до нуля і після певних перетворень отримаємо (також необхідно обмежити значення n між нулем та одиницею):

$$n = \min \left(\max \left(0, \frac{\ln \left(\frac{2\varphi(T_{in1} - T_{out})}{T_{SP} - T_{out} - \Delta - \sqrt{(T_{SP} - T_{out} - \Delta)^2 + \frac{PF_e q_g \eta}{F_g c_a Q_a \rho_a (5.83 + 0.078P)}}} \right)}{5.83 + 0.078P} \right), 1 \right),$$

де Q_a – об’ємна витрата припливного повітря, м³/год; ρ_a – густина повітря, кг/м³.

В результаті отримали залежність, котра дуже просто програмується в звичайний промисловий контролер і дозволяє оптимізувати енерговитрати вентиляційних установок що обладнані роторними рекуператорами в холодну пору року. Оскільки для керування вентиляційними установками і так використовуються промислові контролери [10], а ніяких додаткових входів чи виходів використовувати немає потреби, можна реалізувати керування за отриманим законом без додаткових витрат на покупку обладнання.

Наведемо графічно приклад залежності оптимальної продуктивності від температури на вулиці та температури в приміщенні. Для цього будемо вважати всі інші параметри незмінними, а саме: підключення двигуна типу трикутник, уставка 24 °С, нульовий параметр Δ , потужність двигуна рекуператора 180 Вт, вартість електроенергії 1 у.о./Вт, кількість енергії отримуваної з газу $43 \cdot 10^6$ Дж/м³, коефіцієнт корисної дії згоряння газу та транспортування теплоти до теплообмінників вентиляційних установок рівний одиниці, вартість газу 3 у.о./м³, питома теплоємність повітря 1000 Дж/(кг·К), витрата припливного повітря 7000 м³/год, густина повітря 1.28 кг/м³.

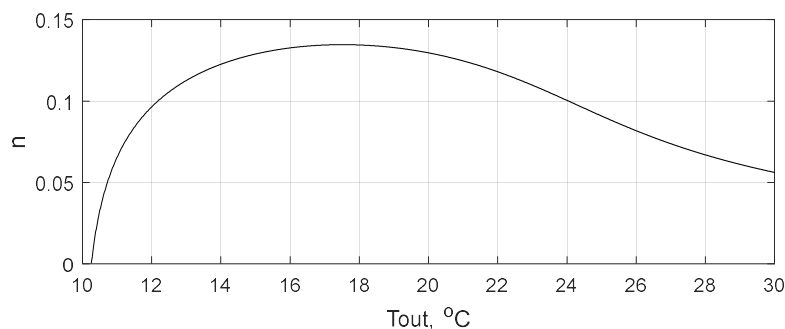


Рис. 2 – Оптимальна продуктивність при незмінній температурі на вулиці 10 °С

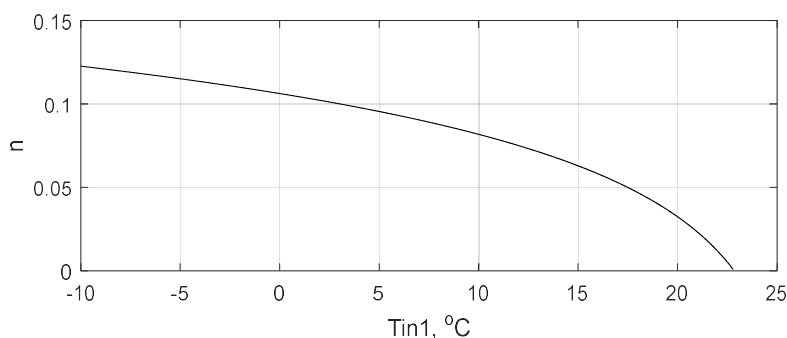


Рис. 3 – Оптимальна продуктивність при незмінній температурі в приміщенні 26 °C

Наведемо також залежність оптимального керування від співвідношення вартостей електроенергії та газу при температурі зовнішнього повітря 10 °C і температурі в приміщенні 26 °C:

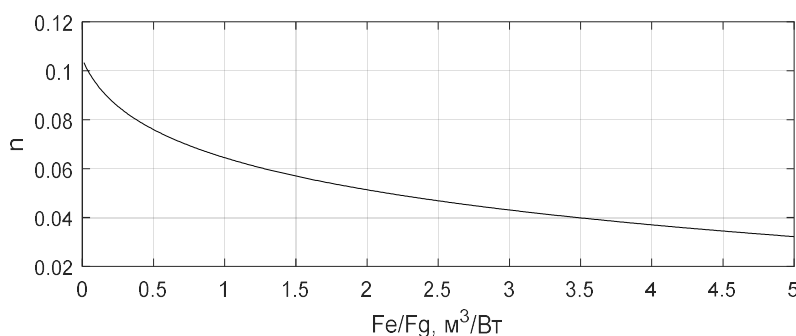


Рис. 4 – Залежність оптимальної продуктивності рекуператора від F_e/F_g

Результатом даної роботи є алгоритм, що легко програмується у звичайні промислові контролери і дозволяє підвищити енергоефективність роботи вентиляційних установок за рахунок статичної оптимізації рекуператора. Подальшого дослідження потребує робота рекуператора в режимі охолодження припливного повітря, проте вірогідно вона гарно описується тією ж моделлю.

Використання отриманого алгоритму оптимізації на інших установках потребує уточнення параметрів моделі, проте з відомою структурою моделі для цього потрібна невелика кількість експериментальних даних і, до того ж, ця процедура може бути легко автоматизована.

Висновки. Сформульовано задачу оптимізації для мінімізації фінансових витрат і знайдено її розв'язок. Отриманий алгоритм може бути використано для підвищення енергоефективності вентиляційних припливно-витяжних установок що обладнані роторними рекуператорами в холодний період року. Результати роботи впроваджені на підприємстві ТДВ "Інститут радіовиміррювальної апаратури".

Перспективи подальших досліджень. Для підвищення енергоефективності подібних установок в теплий період року необхідно провести серію експериментальних досліджень по роботі рекуператора в режимі рекуперації холоду та ідентифікувати модель статички для подальшого формулювання та розв'язку аналогічної розглянутій задачі оптимізації. Ми припускаємо що модель процесу буде мати таку ж структуру, проте необхідне експериментальне підтвердження.

Список використаної літератури

1. Qi Xu, Saffa Riffat, Shihao Zhang Review of Heat Recovery Technologies for Building Applications // Energies. 2019. Vol. 12, Issue 7, 1285. doi: <https://doi.org/10.3390/en12071285>
2. Applicability of rotary thermal wheels to hot and humid climates / H. M. D. P. Herath, M. D. A. Wickramasinghe, A. M. C. K. Polgolla, A. S. Jayasena, R. A. C. P. Ranasinghe, M. A. Wijewardane // Energy Reports. 2020. Vol. 6, Supplement 2, P. 539-544. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.11.116>

3. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха: [навч. посіб.] / Е. С. Бондарь, А. С. Гордиенко, В. А. Михайлов, Г. В. Нимич. Під заг. ред. Е. С. Бондаря – К.: ТОВ "Видавничий будинок "Аванпост-Прим", 2005. – 560 с.: іл. – Бібліогр.: с. 548-549. ISBN 966-8571-15-0.
4. Ghaith Alshami Rotary heat exchangers for Heat Recovery in Ventilation Systems Handbook for Design, Installation and Operation / Hoval Aktiengesellschaft, Liechtenstein, 2011.
5. Mohammad Rasouli, J. Simonson, Robert W. Besant Applicability and optimum control strategy of energy recovery ventilators in different climatic conditions // Energy and Buildings. 2010. Vol. 42(9), 1376-1385. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.006>
6. Кряклина И. В. Математическая модель и оптимизация параметров работы пластинчатого рекуператора // Инженерный вестник Дона, Vol. 28, no. 1, 2014, pp. 14.
7. Andrzej Grzbielec, Artur Rusowicz, Adam Ruciński Analysis of the performance of the rotary heat exchanger in the real ventilation systems // The 9th International Conference "Environmental Engineering". 2014.
8. Stefano De Antonellis, Manuel Intini, Cesare Maria Joppolo, Calogero Leone Design Optimization of Heat Wheels for Energy Recovery in HVAC Systems // Energies. 2014. Vol. 7, Issue 12, 7348-7367. doi: <https://doi.org/10.3390/en7117348>
9. Припливно-витяжні установки Aerostart, Aerosmart 2020 [Електронний ресурс]. URL: http://www.ccktm.com/contentimages/catalog-ukr/Aerostart_Aerosmart_ukr.pdf (дата звернення: 15.11.2020).
10. Пример построения системы управления вентиляцией и кондиционирования [Електронний ресурс]. URL: https://www.svaltera.ua/solutions/typical/water_supply/6863.php (дата звернення: 15.11.2020).

Надійшла до редакції 21.09.2020

Havrysh B. A., Korzyk M. V., Lukiniuk M. V.

ROTARY RECUPERATOR STATICS: SEARCH FOR OPTIMAL OPERATING MODES

The operation of the recuperator requires electricity, but saves heat. An urgent problem is to find the optimal mode of operation of the recuperator.

The previous article described the experiment, presented the results of experimental studies, obtained a model of statics of a rotary recuperator and compared it with the experiment - the comparison showed sufficient accuracy (about a tenth of a degree). Experimental studies were performed with recuperators manufactured by REMAK model XPXR.

The problem of static optimization on the principle of the greatest economic benefit (the greatest energy saving in terms of energy cost) is formed. The problem is solved for the case of obtaining thermal energy from the own boiler of the company.

The received algorithm of search of optimum operating modes is introduced for increase of energy saving in ALC "Institute of the radio measuring equipment" in the cold period of the year.

Key words: rotary recuperator, optimal operating modes.

References

1. Qi Xu, Saffa Riffat, Shihao Zhang Review of Heat Recovery Technologies for Building Applications // Energies. 2019. Vol. 12, Issue 7, 1285. doi: <https://doi.org/10.3390/en12071285>
2. Applicability of rotary thermal wheels to hot and humid climates / H. M. D. P. Herath, M. D. A. Wickramasinghe, A. M. C. K. Polgolla, A. S. Jayasena, R. A. C. P. Ranasinghe, M. A. Wijewardane // Energy Reports. 2020. Vol. 6, Supplement 2, P. 539-544. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.116>
3. "Avtomatizacija sistem ventiljacii i kondicionirovanija vozduha" [Automation of ventilation and air conditioning systems], E. S. Bondar, A. S. Hordyenko, V. A. Mykhailov, H. V. Nymych. Pid zah. red. E. S. Bondaria, Kyiv, Vydavnychiy budynok "Avanpost-Prym" (2005), ISBN 966-8571-15-0.
4. Ghaith Alshami Rotary heat exchangers for Heat Recovery in Ventilation Systems Handbook for Design, Installation and Operation / Hoval Aktiengesellschaft, Liechtenstein, 2011.
5. Mohammad Rasouli, J. Simonson, Robert W. Besant Applicability and optimum control strategy of energy recovery ventilators in different climatic conditions // Energy and Buildings. 2010. Vol. 42(9), 1376-1385. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.006>

6. Kriaklyna Y. V. (2014) "Matematicheskaja model' i optimizacija parametrov raboty plastinchatogo rekuperatora" [Mathematical model and optimization of the operating parameters of the plate recuperator], Inzhenernyj vestnik Dona. Vol. 28, no. 1, 2014, pp. 14.
 7. Andrzej Grzebielec, Artur Rusowicz, Adam Ruciński Analysis of the performance of the rotary heat exchanger in the real ventilation systems // The 9th International Conference "Environmental Engineering". 2014.
 8. Stefano De Antonellis, Manuel Intini, Cesare Maria Joppolo, Calogero Leone Design Optimization of Heat Wheels for Energy Recovery in HVAC Systems // Energies. 2014. Vol. 7, Issue 12, 7348-7367. doi: <https://doi.org/10.3390/en7117348>
 9. "Pryplyvno-vytiazhni ustanovky Aerostart, Aerosmart 2020" [Supply and exhaust installations Aerostart, Aerosmart 2020] [Electronic resource]. URL: http://www.ccktm.com/contentimages/catalog-ukr/Aerostart_Aerosmart_ukr.pdf (date of application: 15.11.2020).
 10. "An example of building a ventilation and air conditioning control system" [An example of building a ventilation and air conditioning control system] [Electronic resource]. URL: https://www.svaltera.ua/solutions/typical/water_supply/6863.php (date of application: 15.11.2020).
-

УДК 66.095.81

ЖУЧЕНКО А.І. докт. техн. наук проф., ОНИЩЕНКО В.О. ас., ЦАПАР В.С. к.т.н доц.,

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕАКТОРА ОКИСЛЕННЯ АМІАКУ В РЕЖИМІ МАКСИМАЛЬНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ВИХОДУ АЗОТУ

Виробництво азотної кислоти достатньо складне і ускладнене різними стадіями виробництва, основні стадії це підготовка аміачно-повітряної суміші для забезпечення та проведення процесу окислення на стадії отримання окису азоту з подальшим використанням на стадії абсорбції з отриманням кінцевого продукту азотної кислоти. У виробництві азотної кислоти особливу увагу приділяють, саме стадії окислення, на даній стадії формується основний продукт, який забезпечує отримання азотної кислоти в ході реакції азоту з водою на стадії адсорбції. Стадія окислення становить основну затратну частину при формуванні цінової функції вартості продукту виробництва, тому завдання підвищення продуктивності роботи обладнання на даній стадії, одне із важливих завдань при побудові системи керування та експлуатації реактора окислення аміаку.

В статті розглядається використання спрощеної математичної [1] моделі динаміки реакторного простору. На основі даної моделі проведені дослідження та побудована крива розгону реактора окислення АПС. Одним із важливих особливостей реактора окислення є його складна багато секційна структура [2]. Окислення проходить на трьох послідовно змонтованих шарах в реакторі. Така конструкція дозволяє збільшити швидкість потоку навантаження і збільшити вихід азоту з реактора. Тому математична модель передбачає спрощену систему рівнянь з послідовним розрахунком кожного шару в динаміці роботи реактора та технологічні параметри процесу в заданий момент часу.

Реактор окислення в статті розглядається як об'єкт автоматичного керування і описується математичною моделлю динаміки у вигляді диференціальних рівнянь. Модель динаміки реакційного об'єму відображає залежність температури в шарі контакту від потоку навантаження, а також залежність концентрації окисі азоту від швидкості потоку та температури реакційної суміші, в момент контакту з каталізатором.

Данна математична модель, адекватна дійсному перебігу процесу окислення, дозволить дослідити залежність виходу окисі азоту від заданих вхідних значень витрати на кожній секції реактора. Підвищення виходу окисі азоту дозволить збільшити продуктивність реактора, завдяки виконанню вимог до якості вихідного продукту [3] та зменшенню економічних затрат на виробництво азотної кислоти.

Запропонована математична модель дозволяє розглядати реактор з трьома шарами контакту в режимі максимального навантаження, що дозволяє отримати максимальну степінь перетворення аміачно