

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-61-66>

УДК 681.5.015

СТАБІЛІЗАЦІЯ ЦИКЛУ СИНТЕЗУ МЕТАНОЛУ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМІЧНОГО КЕРУВАННЯ ВУЗЛОМ ОХОЛОДЖЕННЯ ТА КОНДЕНСАЦІЇ

Дуришев О.А

STABILISATION OF THE METHANOL SYNTHESIS CYCLE BASED ON ALGORITHMIC CONTROL OF THE COOLING AND CONDENSATION UNIT

Duryshv O. A.

У роботі досліджено вплив режимів роботи вузла охолодження і конденсації газопродуктової суміші на стійкість та економічну ефективність циклу синтезу метанолу. Показано, що неузгоджене керування апаратами повітряного охолодження, яке реалізується переважно в ручному режимі, призводить до значних температурних і гідравлічних збурень у циркуляційному контурі синтезу. Це, у свою чергу, спричиняє коливання витрат синтез-газу, зміну перепадів тиску на компресорі та зниження стабільності роботи агрегату в цілому. Проаналізовано існуючі підходи до регулювання теплообмінних процесів, зокрема застосування перетворювачів частоти для керування вентиляторами апаратів повітряного охолодження, та обґрунтовано їх обмежену ефективність і високу вартість для діючих виробництв.

Запропоновано альтернативний підхід до автоматизації вузла охолодження і конденсації, який базується на принципі компенсації збурень за вхідними параметрами процесу. Суть підходу полягає у використанні дискретної системи керування з алгоритмічним вибором оптимальної комбінації працюючих апаратів повітряного охолодження з урахуванням температури газопродуктової суміші на вході вузла, її витрати та температури навколишнього середовища. Такий підхід дозволяє мінімізувати температурні стрибки на виході вузла, зменшити зміну перепадів тиску та забезпечити більш плавний характер перехідних процесів у циклі синтезу метанолу. Перевагою запропонованого рішення є можливість його реалізації без встановлення додаткового дорогого обладнання, виключно на базі існуючих засобів автоматизації та керування. Отримані результати можуть бути використані для підвищення надійності та енергоефективності діючих агрегатів синтезу метанолу.

Впровадження запропонованого підходу створює передумови для подальшої інтеграції інтелектуальних методів керування та цифрових двійників технологічних процесів, що відповідає сучасним тенденціям розвитку хімічної промисловості та концепції Industry 4.0.

Ключові слова: синтез метанолу, апарати повітряного охолодження, конденсація, автоматизація, дискретне керування, компенсація збурень.

Вступ. Виробництво метанолу посідає одне з провідних місць у структурі сучасної хімічної промисловості, оскільки метанол є універсальною хімічною сировиною та енергоносієм, що широко використовується у виробництві формальдегіду, оцтової кислоти, синтетичних палив, полімерних матеріалів, фармацевтичних продуктів і компонентів альтернативних моторних палив. У контексті глобальних тенденцій декарбонізації та переходу до більш сталих технологій метанол також розглядається як перспективний носій енергії та проміжний продукт у технологіях Power-to-X, що додатково підвищує вимоги до ефективності та надійності його промислового виробництва.

Сучасні агрегати синтезу метанолу є складними багатоконтурними технологічними системами, у яких тісно взаємопов'язані хімічні, теплові, масообмінні та гідродинамічні процеси. Навіть незначні відхилення режимних параметрів у окремих вузлах можуть призводити до каскадного поширення збурень по всьому циркуляційному контуру,

викликаючи зниження продуктивності, перевитрату енергоресурсів і погіршення якості готового продукту. Особливо чутливим у цьому відношенні є вузол охолодження і конденсації газопродуктової суміші, який виконує функцію стабілізації температурного режиму після реактора синтезу та безпосередньо впливає на умови роботи циркуляційного компресора і реакційної системи.

В умовах експлуатації діючих хімічних підприємств, зокрема в Україні, значна частина обладнання агрегатів синтезу метанолу була введена в експлуатацію десятки років тому. Такі установки, як правило, проектувалися з урахуванням технологічних та економічних реалій свого часу і не передбачали широкого використання сучасних автоматизованих систем керування. У результаті регулювання багатьох критичних параметрів, зокрема температури та ступеня охолодження газопродуктових потоків, і досі здійснюється в ручному або напівавтоматичному режимах, що істотно обмежує можливості забезпечення стабільної роботи процесу.

Додатковим ускладнюючим чинником є змінність складу та витрати синтез-газу, що надходить у цикл синтезу метанолу. Коливання параметрів вихідної сировини можуть бути зумовлені як особливостями роботи суміжних виробництв, так і змінами режимів підготовки газу. У таких умовах вузол охолодження і конденсації фактично виконує роль демпфуючої ланки, від ефективності якої залежить здатність усього агрегату адаптуватися до збурень без втрати стійкості.

Традиційні підходи до підвищення якості керування теплообмінними процесами зазвичай пов'язані з упровадженням додаткового регульовального обладнання, зокрема частотно-керованих електроприводів вентиляторів апаратів повітряного охолодження або складних багатоконтурних систем автоматичного регулювання. Однак реалізація таких рішень на діючих установках часто потребує значних капітальних вкладень, тривалих зупинок виробництва та модернізації електросилового господарства, що в умовах обмежених інвестиційних ресурсів є малореалістичним.

У зв'язку з цим актуальним науково-технічним завданням є пошук альтернативних рішень, спрямованих на підвищення стабільності та ефективності роботи агрегатів синтезу метанолу шляхом оптимального використання вже наявного технологічного та автоматизаційного обладнання. Особливий

інтерес у цьому контексті становлять алгоритмічні та програмні методи керування, які дозволяють реалізувати принципи компенсації збурень і наблизити якість дискретного керування до рівня аналогових систем без суттєвих матеріальних витрат.

Основна частина

Метою даної роботи є дослідження впливу режимів роботи вузла охолодження і конденсації газопродуктової суміші на стабільність циклу синтезу метанолу та обґрунтування доцільності застосування дискретної системи керування, орієнтованої на вхідні параметри процесу. У роботі поставлено завдання проаналізувати механізми виникнення збурень у циркуляційному контурі, оцінити обмеження традиційних методів регулювання та запропонувати підхід, який дозволяє підвищити надійність і керованість процесу без встановлення додаткового дорогого обладнання.

Процес синтезу метанолу належить до класу безперервних багатопараметричних хіміко-технологічних процесів, які характеризуються високою чутливістю до змін температури, тиску та складу сировини. Реакція синтезу метанолу з оксидів вуглецю та водню є екзотермічною, тому ефективне відведення тепла є критично важливим для забезпечення стабільної роботи реактора, збереження активності каталізатора та досягнення заданих показників селективності і виходу цільового продукту.

Після реактора синтезу парогазова суміш з підвищеною температурою надходить у систему рекуперації тепла, а далі – у вузол охолодження і конденсації, де відбувається подальше зниження температури та конденсація метанолу. Саме на цій стадії формується температурний і гідравлічний режим циркуляційного контуру, який визначає умови роботи сепараційного обладнання та циркуляційного компресора. Будь-які відхилення в роботі вузла охолодження і конденсації безпосередньо впливають на перепади тиску в системі, витрату циркуляційного газу та співвідношення між свіжим і рециркуляційним потоками.

Технологічною особливістю розглянутого процесу є використання апаратів повітряного охолодження, які працюють у змінних кліматичних умовах і мають суттєву залежність ефективності теплообміну від температури та швидкості повітря навколишнього середовища. У зимовий період надмірне охолодження може призводити до різкого зниження температури газопродуктової суміші та збільшення

гідравлічного опору, тоді як у літній період часто виникає дефіцит холодопродуктивності, що ускладнює підтримання заданого температурного режиму.

На практиці регулювання роботи апаратів повітряного охолодження на багатьох діючих установках здійснюється шляхом дискретного вмикання або вимикання вентиляторів окремих теплообмінників. Такий підхід є простим з точки зору реалізації, однак він супроводжується значними недоліками. Зокрема, ступінчаста зміна кількості працюючих апаратів викликає різкі температурні стрибки газопродуктового потоку, які з часовим запізненням поширюються на інші вузли агрегату. Це призводить до неузгодженої роботи компресора, зміни витрати синтез-газу та виникнення тривалих перехідних процесів.

Суттєвою проблемою є також нерівномірність ефективності теплообміну в послідовно з'єднаних апаратах повітряного охолодження. Перші за ходом газу теплообмінники працюють з більшим температурним напором і, відповідно, мають вищу холодопродуктивність, тоді як останні апарати забезпечують значно менший вклад у загальний тепловий баланс. Ігнорування цієї особливості при керуванні призводить до нераціонального використання встановленої теплообмінної поверхні та ускладнює досягнення плавного регулювання температури.

Додатковим чинником, що ускладнює керування процесом, є змінність витрати та складу синтез-газу, яка обумовлена роботою суміжних технологічних ланок. Зміна концентрацій оксидів вуглецю і водню впливає на тепловий ефект реакції та температуру газу на виході з реактора, що, у свою чергу, створює збурення для вузла охолодження і конденсації. При традиційному керуванні за температурою на виході вузла ці збурення компенсуються із запізненням, коли негативний вплив уже поширився на циркуляційний контур.

Таким чином, основна проблематика процесу полягає у відсутності узгодженого та адаптивного керування вузлом охолодження і конденсації, здатного своєчасно реагувати на зміну вхідних параметрів і забезпечувати стабільність температурного та гідравлічного режимів. Це обумовлює необхідність розробки нових підходів до керування, які враховують специфіку роботи апаратів повітряного охолодження, нерівномірність їх ефективності та вплив зовнішніх і внутрішніх збурень на цикл синтезу метанолу.

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється інтегрованому керуванню теплообмінними процесами у хімічних реакторних системах. Роботи останніх років [1-2] демонструють ефективність використання моделей процесу та прогнозного керування (Model Predictive Control, MPC) для стабілізації температурних режимів у виробництві метанолу та інших продуктів синтез-газової хімії. Дослідження [3-4] підтверджує доцільність застосування керування за збуренням (feedforward control) у поєднанні з класичними зворотними зв'язками, що дозволяє зменшити амплітуду перехідних процесів.

Окремий напрям сучасних публікацій [5-6] присвячений оптимізації роботи апаратів повітряного охолодження з урахуванням змінних кліматичних умов та енергоспоживання. Запропоновано алгоритми дискретного та гібридного керування [7], які забезпечують наближення якості регулювання до аналогових систем без значних капітальних витрат. Також активно розвиваються підходи до цифровізації [8-9] та впровадження програмних регуляторів на базі промислових контролерів, що підвищує гнучкість та адаптивність систем автоматизації діючих установок.

У роботі запропоновано реалізувати дискретну систему керування вузлом охолодження і конденсації з орієнтацією на параметри газопродуктової суміші на вході вузла. Алгоритм керування забезпечує поетапне вмикання або вимикання апаратів повітряного охолодження з урахуванням їх індивідуальної ефективності та поточних зовнішніх умов. Це дозволяє мінімізувати сумарний температурний стрибок та забезпечити більш плавний характер регулювання.

Процес синтезу метанолу реалізується в реакторі, заповненому низькотемпературним мідь-цинк-алюмінієвим каталізатором, при робочому тиску до 5,3 МПа. Парогазова продуктова суміш, що виходить з реактора з температурою до 300 °C, надходить у трубний простір рекупераційного теплообмінника, де за рахунок теплообміну з холоднішим газосировинним потоком, що подається в реактор, її температура знижується приблизно до 150 °C.

На наступному етапі охолоджена парогазова суміш направляється у вузол охолодження та конденсації, в якому здійснюється подальше відведення тепла і конденсація метанолу при температурі не вище 60 °C. Після цього газометанольна суміш надходить у сепаратор, де

відбувається фазове розділення. Сконденсований метанол відводиться у збірник метанолу-сирцю, а газова фаза спрямовується на всмоктування циркуляційного компресора, який забезпечує подачу суміші циркуляційного та свіжого сировинного газу в реактор синтезу. Частина газу з сепаратора відводиться на установку вилучення метанолу з продувних газів; при цьому зростання витрати продувного газу за незмінної продуктивності за метанолом свідчить про зниження активності або деградацію каталізатора.

Вузол охолодження і конденсації виконаний на базі восьми апаратів повітряного охолодження типу «холодильник-конденсатор». Конструктивно апарати згруповані у дві паралельні гілки, кожна з яких містить чотири послідовно з'єднані теплообмінники. Регулювання температурного режиму конденсації парів метанолу здійснюється шляхом зміни кількості задіяних апаратів повітряного охолодження. З метою запобігання температурному перекосу між паралельними потоками газопродуктової суміші вмикання апаратів, як правило, здійснюється попарно. За низьких температур навколишнього повітря частина вентиляторів переводиться в резервний режим, тоді як у літній період для підвищення інтенсивності теплообміну застосовується система зрошення теплообмінних поверхонь оборотною водою. Керування вентиляторів та системою зрошення здійснюється оперативним персоналом як з місцевих постів, так і дистанційно з пульта керування, розташованого в операторній.

Практика експлуатації показує, що ручне керування вузлом охолодження і конденсації призводить до неузгодженої роботи апаратів повітряного охолодження і є однією з основних причин нестабільності режиму циклу синтезу метанолу. Аналіз експлуатаційних даних підприємства свідчить, що зміна складу або витрати синтез-газу супроводжується зміною теплового режиму реактора, що, у свою чергу, призводить до коливань температури газу на виході з реактора та на вході і виході вузла охолодження і конденсації.

Зафіксувавши відхилення температури після апаратів повітряного охолодження, оператор у ручному режимі приймає рішення щодо вмикання або вимикання вентиляторів однієї чи кількох пар теплообмінників залежно від напряму зміни температури. Такі дії викликають різкі зміни температури газопродуктового

потoku, що супроводжується зміною гідравлічного опору вузла та перепаду тиску між виходом реактора і всмоктуванням циркуляційного компресора. У результаті змінюється витрата синтез-газу, що призводить до подальшої дестабілізації роботи всього циклу синтезу.

Вмикання вентиляторів апаратів повітряного охолодження зазвичай спричиняє зниження температури газопродуктової суміші та зростання перепаду тиску у вузлі охолодження і конденсації, що веде до збільшення навантаження на компресор і зростання витрати синтез-газу. Вимикання вентиляторів, навпаки, призводить до підвищення температури і зменшення витрати газу. При цьому характерною особливістю процесу є значна тривалість перехідних режимів, які можуть тривати кілька годин.

Традиційним способом підвищення якості регулювання температури після апаратів повітряного охолодження є застосування частотно-керованих електроприводів вентиляторів. У розглянутій схемі це передбачало б установлення додаткових перетворювачів частоти для регулювання продуктивності однієї з пар апаратів з подальшим ступінчастим підключенням або відключенням інших теплообмінників. Проте такий підхід пов'язаний із значними капітальними витратами на придбання та впровадження додаткового обладнання, що є економічно недоцільним для більшості діючих підприємств. Крім того, керування за температурою на виході вузла не дозволяє запобігти поширенню збурень, оскільки регулююча дія реалізується із запізненням.

У сучасних умовах особливо актуальним є пошук рішень, спрямованих на підвищення ефективності виробництва за рахунок оптимального використання наявного обладнання. Для вузла охолодження і конденсації таким рішенням є перехід до керування за температурою парогазової суміші на вході вузла з використанням дискретної системи регулювання. Реалізація такого підходу можлива у вигляді алгоритму, що виконується на промисловому контролері або комп'ютері та використовує наявні засоби вимірювання і керування.

Спрощена функціональна схема запропонованого технічного рішення наведена на рисунку.

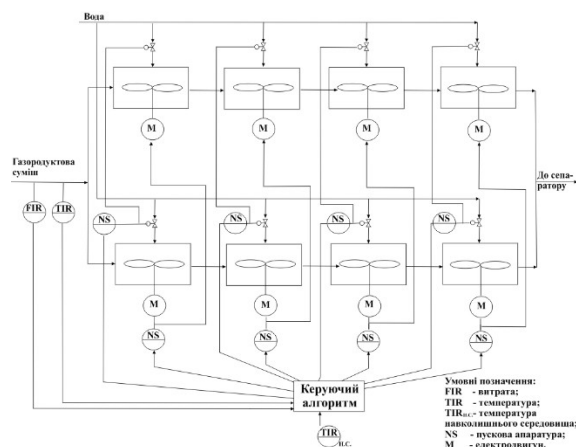


Рис. Схема автоматизації вузла охолодження і конденсації із застосуванням дискретної системи регулювання на базі керуючого алгоритму

Алгоритм керування забезпечує поетапне вмикання або вимикання апаратів повітряного охолодження з урахуванням температури і витрати газопродуктової суміші, а за необхідності – підключення системи зрошення. Ключовим завданням при цьому є вибір таких комбінацій апаратів, які мінімізують температурні стрибки на виході вузла. Оскільки ефективність теплообміну в послідовно з'єднаних апаратах зменшується за ходом газу, алгоритм повинен враховувати різну холодопродуктивність кожного теплообмінника, а також вплив температури навколишнього повітря.

Висновки. Запропонований підхід до керування вузлом охолодження і конденсації дозволяє підвищити стабільність циклу синтезу метанолу без використання додаткового дорогого обладнання. Реалізація дискретного алгоритмічного керування на базі існуючих технічних засобів сприяє зменшенню збурюючих впливів, покращенню енергетичних та економічних показників виробництва і може бути рекомендована для впровадження на діючих агрегатах синтезу метанолу.

Литература

1. Towler G., Sinnott R. Chemical Engineering Design. – Elsevier, 2022.
2. Seborg D.E., Edgar T.F., Mellichamp D.A., Doyle F.J. Process Dynamics and Control. Wiley, 2023.
3. Luyben W.L. Design and Control of the Methanol Synthesis Process. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020.
4. Skogestad S. Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. Wiley, 2021.

5. Wang L., Zhang J. Advanced Control of Heat Exchanger Networks under Disturbances. – Journal of Process Control, 2019.
6. Seraya, O.V., Demin, D.A. Linear regression analysis of a small sample of fuzzy input data (2012) Journal of Automation and Information Sciences, 44 (7), pp. 34-48.
7. Study of the influence of the cooling and condensation unit of the gas product mixture on the operation of the methanol synthesis cycle / [S. O. Vitkovskyi, O. B. Tselishchev, M. H. Loria, P. Y. Eliseev] // Bulletin of the East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl. 2010. No. 7 (154) Ch 2. P. 95-99.
8. Optimal control of the cooling and condensation unit of the gas product mixture in the production of methanol synthesis / [M. H. Loria, O. V. Porkuyan, O. B. Tselishchev, P. Y. Eliseev] // Bulletin of the East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl. 2019. No. 2(250) P. 54-59.
9. Loria M.G. Finding ways to ensure the maximum efficiency of the methanol synthesis column / M.G. Loria // Bulletin of the Donbas State Metallurgical Academy. 2019. No. 2. P. 43-50.

References

1. Towler G., Sinnott R. Chemical Engineering Design. – Elsevier, 2022.
2. Seborg D.E., Edgar T.F., Mellichamp D.A., Doyle F.J. Process Dynamics and Control. Wiley, 2023.
3. Luyben W.L. Design and Control of the Methanol Synthesis Process. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020.
4. Skogestad S. Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. Wiley, 2021.
5. Wang L., Zhang J. Advanced Control of Heat Exchanger Networks under Disturbances. – Journal of Process Control, 2019.
6. Seraya, O.V., Demin, D.A. Linear regression analysis of a small sample of fuzzy input data (2012) Journal of Automation and Information Sciences, 44 (7), pp. 34-48.
7. Study of the influence of the cooling and condensation unit of the gas product mixture on the operation of the methanol synthesis cycle / [S. O. Vitkovskyi, O. B. Tselishchev, M. H. Loria, P. Y. Eliseev] // Bulletin of the East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl. 2010. No. 7 (154) Ch 2. P. 95-99.
8. Optimal control of the cooling and condensation unit of the gas product mixture in the production of methanol synthesis / [M. H. Loria, O. V. Porkuyan, O. B. Tselishchev, P. Y. Eliseev] // Bulletin of the East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl. 2019. No. 2(250). P. 54-59.
9. Loria M.G. Finding ways to ensure the maximum efficiency of the methanol synthesis column / M.G. Loria // Bulletin of the Donbas State Metallurgical Academy. 2019. No. 2. P. 43-50.

Duryshch O. A. Stabilisation of the methanol synthesis cycle based on algorithmic control of the cooling and condensation unit.

The paper investigates the influence of the operating modes of the gas-product mixture cooling and condensation unit on the stability and economic efficiency of the methanol synthesis cycle. It is shown that uncoordinated control of air cooling devices, which is mainly implemented in manual mode, leads to significant temperature and hydraulic disturbances in the synthesis circulation circuit. This, in turn, causes fluctuations in synthesis gas consumption, changes in pressure drops at the compressor, and a decrease in the overall stability of the unit. Existing approaches to regulating heat exchange processes, in particular the use of frequency converters to control air cooling unit fans, have been analysed, and their limited effectiveness and high cost for existing production facilities have been substantiated. An alternative approach to the automation of the cooling and condensation unit is proposed, based on the principle of compensation for disturbances in the input parameters of the process. The essence of the approach lies in the use of a discrete control system with algorithmic selection of the optimal combination of operating air cooling devices, taking into account the temperature of the gas-product mixture at the unit inlet, its flow rate and the ambient

temperature. This approach minimises temperature jumps at the unit outlet, reduces pressure drops and ensures a smoother transition in the methanol synthesis cycle. The advantage of the proposed solution is that it can be implemented without installing additional expensive equipment, using only existing automation and control systems. The results obtained can be used to improve the reliability and energy efficiency of existing methanol synthesis units.

The implementation of the proposed approach creates the conditions for the further integration of intelligent control methods and digital twins of technological processes, which is in line with current trends in the development of the chemical industry and the Industry 4.0 concept.

Keywords: *methanol synthesis, air cooling devices, condensation, automation, discrete control, disturbance compensation.*

Дуришев Олександр Андрійович — аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля,

Стаття подана 08.11.2025.