

УДК 691.327.332

## АВТОМАТИЗАЦІЯ АВТОКЛАВУ ДЛЯ СУШКИ ГАЗОБЕТОННИХ БЛОКІВ

Лісовець С. М., Невмержицький І. В.

Київський національний університет технологій та дизайну

**Мета.** Створення засобів для підвищення якості виготовлення газобетонних блоків, яка досягається застосуванням цифрових законів керування і відповідних їм цифрових регуляторів.

**Методика.** Визначення дискретної передатної функції неперервного об'єкта керування з екстраполятором, визначення псевдонеперервної передатної функції на основі дискретної передатної функції, синтез псевдонеперервного регулятора на основі псевдонеперервної передатної функції, синтез цифрового регулятора на основі псевдонеперервного регулятора, підбір технічних засобів автоматизації.

**Результати.** Отримання алгоритму синтезу цифрових законів керування і відповідних їм цифрових регуляторів.

**Наукова новизна.** Встановлений вплив температури і тиску в автоклаві на деякі характеристики газобетонних блоків (наприклад, на межу міцності при стисканні).

**Практична значимість.** Виготовлення газобетонних блоків високої якості дозволяє суттєво покращити експлуатаційні характеристики будівель і споруд, де такі блоки використовуються.

**Ключові слова:** автоклав, газобетонний блок, екстраполятор, контур керування, цифровий регулятор

Ще на початку ХХ сторіччя в різних країнах неодноразово робилися спроби створити такий будівельний матеріал, який би одночасно мав добру звукову і теплову ізоляцію, був вогнестійким і легким, легко піддавався обробці, мав невелику об'ємну щільність. В результаті таких розробок були винайдені так звані комірчасті бетони: зокрема, газобетони [1-4]. Сучасне застосування газобетонів складно переоцінити. Використовуються вони в будівництві як індивідуальному, так і в багатоповерховому або промисловому. В сучасних будівлях внутрішні стіни практично завжди частково складаються з газобетонних блоків. Спрощено технологічний процес виготовлення комірчастих бетонів полягає в здійсненні чотирьох основних технологічних операцій: підготовці сировинних матеріалів, приготуванні комірчасто-бетонної суміші, формуванні комірчасто-бетонних виробів і тепловологістній обробці комірчасто-бетонних виробів [1, 2]. Тепловологістна обробка зазвичай здійснюється автоклавуванням при тиску (0,9...1,3) МПа і температурі (175...191) °С в середовищі насиченої (перегрітої) водяної пари, для чого використовуються автоклави прохідного або тупикового типу з типовими діаметрами 2,0, 2,6 або 3,6 м. Автоклавування в

середовищі насиченої (перегрітої) водяної пари, в свою чергу, полягає в здійсненні трьох технологічних операцій.

Перша операція починається з впуску в автоклав насиченої (перегрітої) водяної пари і завершується з вирівнюванням температури цієї пари і поверхні комірчасто-бетонних виробів (газобетонів). При цьому нагрів здійснюється як за рахунок теплопровідності, так і за рахунок теплоти, яка виділяється при конденсації пари, що проникає в комірчасто-бетонні вироби (газобетони) через їх пори.

Друга операція починається зразу ж після завершення першої і завершується з вирівнюванням температури по всьому об'єму комірчасто-бетонних виробів (газобетонів). Під час цієї операції фізико-хімічні процеси, які обумовлюють формування структури комірчасто-бетонних виробів (газобетонів) і швидке збільшення їх міцності, протікають найбільш інтенсивно.

Третя операція починається зразу ж після завершення другої і завершується зниженням тиску і температури в автоклаві до значень, які відповідають навколишньому середовищу. Ця операція протікає при значному пароутворенні.

Наприклад, типова зміна тиску в автоклаві при здійсненні всіх трьох технологічних операцій наведена на рис. 1 [1, 2].

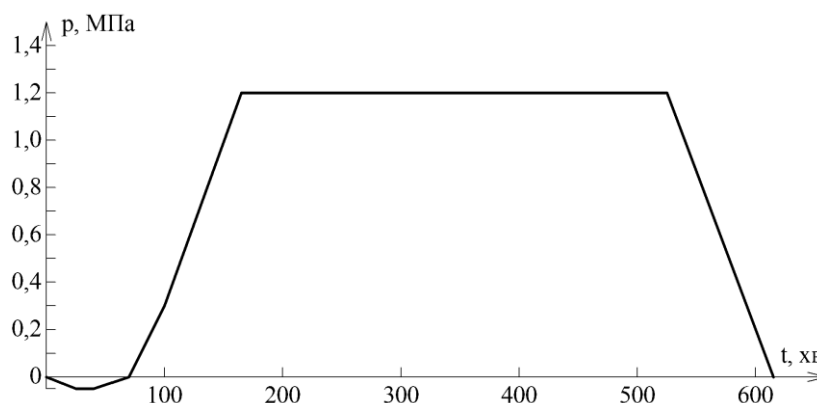


Рис. 1. Типова зміна тиску в автоклаві

### ***Постановка завдання***

Як теоретичні, так і практичні дослідження показують, що температура і тиск в автоклаві суттєво впливають на деякі характеристики газобетонних блоків (наприклад, на межу міцності при стисканні). Підтримання температури і тиску з високою точністю відповідно до часової програми, яка визначається технологічними вимогами до бетонів автоклавного твердіння, є актуальною задачею.

*Результати досліджень*

Для підтримання тиску і температури в автоклаві пропонується застосування трьох основних контурів, два з яких є контурами керування (температурою і тиском насиченої (перегрітої) пари в автоклаві), а один – контуром вимірювання (температури газобетонних блоків) в автоклаві. Наприклад, типова структурна схема контуру підтримання температури в автоклаві наведена на рис. 2, а тиску в автоклаві – на рис. 3.

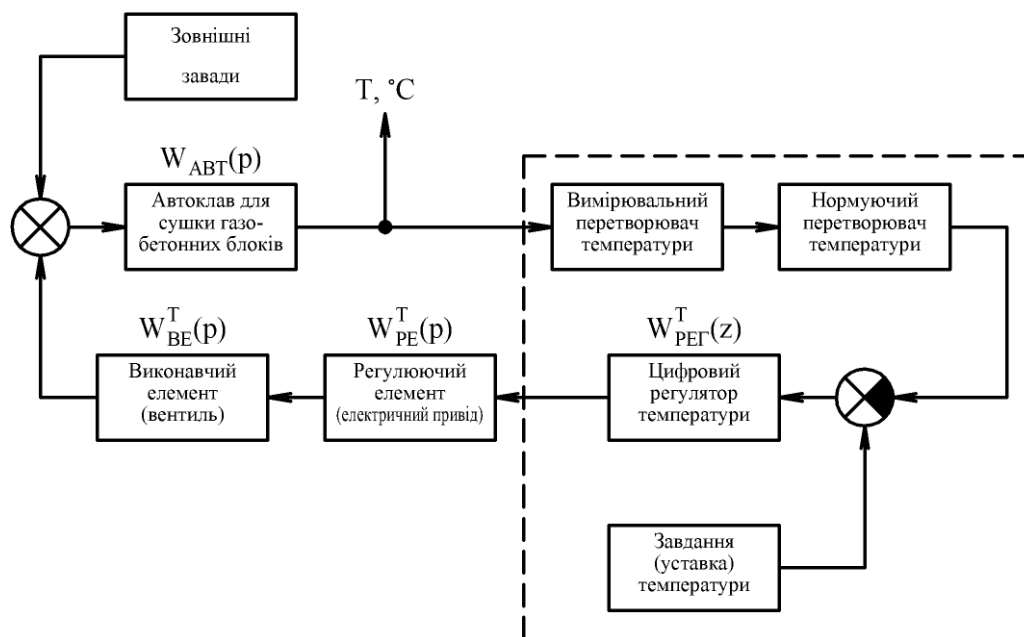


Рис. 2. Типова структурна схема контуру підтримання температури в автоклаві

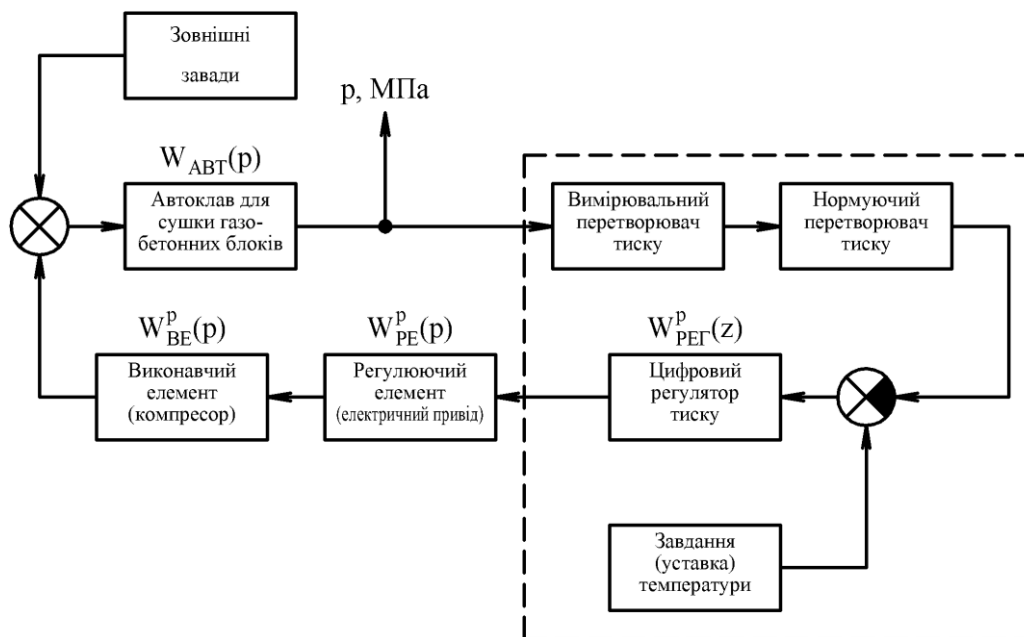


Рис. 3. Типова структурна схема контуру підтримання тиску в автоклаві

Зазвичай цифрові закони керування реалізуються за допомогою засобів обчислювальної техніки: наприклад, мікропроцесорів/мікроконтролерів, програмованих логічних контролерів (ПЛК) і так далі.

З одного боку, інерційність вимірювальних перетворювачів температури і тиску (частки секунди – секунди) у порівнянні з інерційністю автоклава (хвилини – десятки хвилин) є дуже невеликою, і нею можна знехтувати. Крім того, вимірювальні перетворювачі разом з нормуючими перетворювачами часто утворюють (наприклад, в більшості ПЛК) вимірювальні канали, які не потребують додаткової обробки в вигляді фільтрування, підсилення, лінеаризації і так далі. Отже, умовно можна вважати, що вимірювальні і нормуючі перетворювачі входять до складу цифрових регуляторів.

З іншого боку, інерційність регулюючих і виконавчих елементів (частки секунди – секунди) у порівнянні з інерційністю автоклава теж є дуже невеликою, і нею теж можна знехтувати. Таким чином, регулюючі елементи разом з виконавчими елементами можна представити в вигляді підсилювальних ланок. Отже, теж умовно можна вважати, що регулюючі і виконавчі елементи входять до складу цифрових регуляторів.

Крім того, треба пам'ятати, що об'єкти керування практично завжди є неперервними.

Таким чином, загальну структуру цифрових контурів підтримання як температури, так і тиску в автоклаві можна представити так, як наведено на рис. 4.

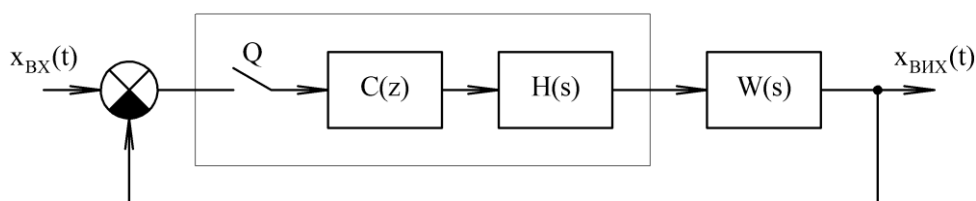


Рис. 4. Загальна структура цифрових контурів підтримання температури і тиску в автоклаві

Тут  $Q$  – ключ (імпульсний елемент),  $W(s)$  – передатна функція об'єкта керування (неперервна),  $C(z)$  – передатна функція цифрового регулятора (дискретна),  $H(s)$  – передатна функція екстраполятора (неперервна).

В цифрових контурах керування зазвичай використовуються екстраполятори або нульового, або першого порядку [5, 6]. Екстраполятори нульового порядку мають передатну функцію виду

$$H(s) = \frac{1 - e^{-\tau s}}{s}, \quad (1)$$

а першого порядку – передатну функцію виду

$$H(s) = \left( \frac{1 - e^{-\tau s}}{s} \right)^2 \left( \frac{\tau s + 1}{\tau} \right). \quad (2)$$

де  $\tau$  – час (період) дискретизації.

Для синтезу цифрового закону керування було застосовано один з варіантів так званого «переобладнання» неперервного регулятора. Найбільшу точність таке «переобладнання» могло забезпечити за умови максимально можливої «близькості» часових і частотних характеристик неперервного і цифрового регуляторів [5, 6]. Синтез здійснювався за декілька етапів.

На першому етапі (при заданому  $\tau$ ) отримувалася дискретна передатна функція об'єкта керування в вигляді

$$W(z) = Z\{W(s)H(s)\}. \quad (3)$$

При використанні для опису автоклаву, наприклад, передатної функції в вигляді аперіодичної ланки першого порядку

$$W(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (4)$$

і фіксатора нульового порядку (див. формулу (1)) дискретна передатна функція об'єкта керування матиме наступний вигляд:

$$W(z) = \frac{K \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{T}} \right)}{z - e^{-\frac{\tau}{T}}}. \quad (5)$$

На другому етапі здійснювалося білінійне w-перетворення шляхом наступної заміни:

$$z \leftarrow \frac{1 + \frac{\tau w}{2}}{1 - \frac{\tau w}{2}}. \quad (6)$$

Таким чином можна було отримати псевдонеперервну передатну функцію  $W(w)$ .

Також, наприклад, для дискретної передатної функції

$$W(z) = \frac{\alpha}{z - \beta} \quad (7)$$

псевдодискретна передатна функція об'єкта керування матиме наступний вигляд:

$$W(w) = \frac{-\alpha\tau w + 2\alpha}{(1+\beta)\tau w + 2(1-\beta)}. \quad (8)$$

На третьому етапі здійснювався розрахунок параметрів налагодження псевдодискретного ПІ-регулятора з передатною функцією  $C(w)$  методами, які є типовими для неперервних систем. Зокрема, було розраховано параметри налагодження, виходячи одночасно із запасів стійкості по амплітуді ((6...20) дБ) і по фазі ((30...60) °).

На четвертому етапі до передатної функції було застосоване перетворення шляхом наступної заміни:

$$w \leftarrow \frac{3}{\tau} \frac{z^2 - 1}{z^2 + 4z + 1}. \quad (9)$$

яка відповідає методу інтегрування Сімпсона [5, 6]. Таке перетворення є більш точним, ніж відоме перетворення Тастіна

$$w \leftarrow \frac{2}{\tau} \frac{z - 1}{z + 1}. \quad (10)$$

Таким чином, було синтезовано цифровий регулятор, порядок якого був вищий за порядок неперервного ПІ-регулятора.

При виконанні синтезу цифрового регулятора час (період) дискретизації  $\tau$  обирався таким, що дорівнював (1...2) с. Такий час, наприклад, є типовим при виконанні опитування вхідних аналогових сигналів програмованими логічними контролерами (ПЛК) або іншим аналогічним обладнанням.

Моделювання цифрових контурів підтримання температури і тиску в автоклаві в пакеті Simulink математичного пакета MatLab 2019a здійснювалася відповідно до загальної моделі (див. рис. 5) [7, 8].

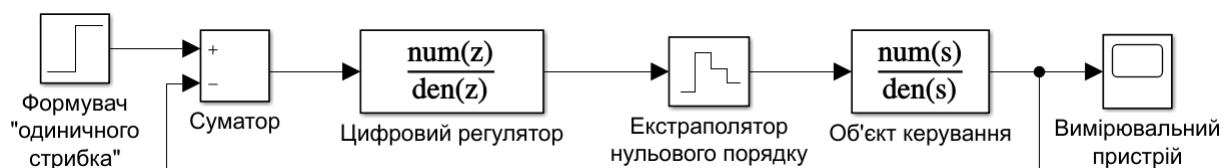


Рис. 5. Загальна модель цифрових контурів підтримання температури і тиску в пакеті Simulink математичного пакета MatLab 2019a

Таке моделювання показало, що цифрові регулятори забезпечують параметри перехідних процесів в контурах підтримання температури і тиску в автоклаві принаймні не гірші, ніж відповідні ним неперервні ПІ- або ПІД-регулятори.

Цифрові регулятори реалізовувалися за допомогою ПЛК виробництва ТОВ «ВО ОВЕН».

### **Висновки**

Застосування цифрового регулювання в контурах підтримання температури і тиску в автоклаві дозволяє підвищити точність керування за рахунок того, що можна реалізувати не тільки класичний ПІ- або ПІД-закон керування, але і більш складний закон (принципово за будь-яким потрібним алгоритмом). Крім того, перевагами цифрового керування є практично відсутній дрейф (тепловий, часовий тощо) параметрів, що є характерним для аналогових елементів неперервних регуляторів.

### **Список використаних джерел**

1. Галкин С. Л. и др. Применение ячеистобетонных изделий: Теория и практика / С. Л. Галкин. – Мн.: Стринко, 2006. – 448 с.
2. Кривицкий М. Я. Ячеистый бетон (технология, свойства и конструкции) / М. Я. Кривицкий, Н. И. Левин, В. В. Макаричев. – М.: Стройиздат, 1972. – 137 с.
3. Дворкин Л. Й. Теоретичні основи будівельного матеріалознавства / Л. Й. Дворкин. – Київ: НМК ВО, 1992. – 154 с.
4. Леонович С. Н. Основы физики твёрдого тела / С. Н. Леонович, С. И. Петренко. – Мн.: Технопринт, 2002. – 270 с.
5. Изерман Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман. – М.: Мир, 1984. – 541 с.
6. Поляков К. Ю. Основы теории цифровых систем управления: Учеб. пособие / К. Ю. Поляков. – СПб.: СПбГМТУ, 2006. – 161 с.
7. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB: Учебный курс / Ю. Лазарев. –

### **References**

1. Galkin, S. (2006). *Primenenie yacheistobetonnykh izdeliy: Teoriya i praktika* [Application of cellular concrete products: Theory and practice]. Mn.: Strinko [in Russian].
2. Krivitsky, M.J., Levin, N. I., & Makarichev, V.V. (1972). *Yacheisty beton (tekhnologiya, svoystva i konstruksii)* [Cellular concrete (technology, properties and designs)]. M.: Sroyizdat [in Russian].
3. Dvorkin, L.I. (1992). *Teoretychni osnovy budivelnoho materialoznavstva* [Theoretical fundamentals of construction materials science.]. K.: NMK VO [in Ukraine].
4. Leonovich, S.N., & Petrenko, S.I. (2002). *Osnovy fiziki tverdogo tela* [Foundations of Solid Body Physics]. Mn.: Technoprint [in Russian].
5. Izerman, R. (1984). *Tsifrovye sistemy upravleniya* [Digital control systems]. M.: Mir [in Russian].
6. Polyakov, K.Yu. (2006). *Osnovy teorii tsifrovyykh sistem upravleniya. Ucheb. Posobie* [Basics of digital management systems theory: Training manual]. SPb.: SPbGMTU [in Russian].
7. Lazarev, Yu. (2005). *Modelirovanie protsessov*

- СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2005. – 512 с.
8. Дьяконов В. П. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. – СПб.: Питер, 2001. – 448 с.
- i sistem v MATLAB: Uchebnyy kurs [Process and system modeling in MATLAB: Training course].* SPb.: Piter; K.: Izdatelskaya gruppa BHV [in Russian]
8. Dyakonov, V.P., & Kruglov, V.V. (2001). *MATLAB. Analiz, iden-tifikatsiya i modelirovanie sistem. Spe-tzialnyy spravochnik [MATLAB. Analysis, identification and modeling of systems. Special handbook].* SPb.: Piter [in Russian].

**Lisovets Serhii**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3643-046X>

[ser.lis.290171@gmail.com](mailto:ser.lis.290171@gmail.com)

Kyiv National University of  
Technologies and Design

**Nevmerzhytskyi Ivan**

[lvanya99@gmail.com](mailto:lvanya99@gmail.com)

Kyiv National University of  
Technologies and Design

**Автоматизация автоклава для сушки газобетонных блоков**

**Лисовец С. Н., Невмержицкий И. В.**

Киевский национальный университет технологий и дизайна

**Цель.** Создание средств для повышения качества изготовления газобетонных блоков, которое достигается применением цифровых законов управления и соответствующих им цифровых регуляторов.

**Методика.** Определение дискретной передаточной функции непрерывного объекта управления с экстраполятором, определение псевдонепрерывной передаточной функции на основе дискретной передаточной функции, синтез псевдонепрерывного регулятора на основе псевдонепрерывной передаточной функции, синтез цифрового регулятора на основе псевдонепрерывного регулятора, подбор технических средств автоматизации.

**Результаты.** Получение алгоритма синтеза цифровых законов управления и соответствующих им цифровых регуляторов.

**Научная новизна.** Установлено влияние температуры и давления в автоклаве на некоторые характеристики газобетонных блоков (например, на предел прочности при сжатии).

**Практическая значимость.** Изготовление газобетонных блоков высокого качества позволяет существенно улучшить эксплуатационные характеристики зданий и сооружений, где такие блоки используются.

**Ключевые слова:** автоклав, газобетонный блок, экстраполятор, контур управления, цифровой регулятор

**Automation of autoclave for drying of gas-concrete blocks**

**Lisovets S. N., Nevmerzhytskyi I. V.**

Kyiv national university of technologies and design

**Purpose.** Creation of means for improvement of quality of production of aerated concrete units, which is achieved by application of digital control laws and corresponding



*digital regulators.*

**Methodology.** *Determination of discrete transfer function of continuous control object with extrapolator, determination of pseudo-continuous transfer function based on discrete transfer function, synthesis of pseudo-continuous regulator based on pseudo-continuous transfer function, synthesis of digital regulator based on pseudo-continuous regulator, selection of automation hardware.*

**Findings.** *Obtaining the algorithm of synthesis of digital control laws and their corresponding digital regulators.*

**Originality.** *The effect of temperature and pressure in the autoclave on some characteristics of the aerated concrete blocks (e.g. compression strength) has been established.*

**Practical value.** *The manufacture of high-quality gas-concrete units makes it possible to significantly improve the performance of buildings and structures where such units are used.*

**Keywords:** *autoclave, gas-concrete unit, extrapolator, control loop, digital regulator*