

Ситніков О.В.

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

Лукінюк М.В.

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

Фтемов А.О.

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

СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВОДООЧИЩЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДУЛЬНОГО КОНТЕЙНЕРА СИСТЕМИ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ

У статті приведено основні положення по створенню системи керування та принцип програмування блоку регулятора для модульного контейнера системи зворотного осмосу, що встановлений на південному гірничо-збагачувальному комбінаті. В наш час переважна більшість природних джерел прісної води мають статус непридатних для вживання людиною в якості питної. Виходячи з того, що чиста вода для споживання становить головну потребу людини та, власне, відповідає за можливе існування, то проблема відсутності надійного водопостачання потребує нагальних та кваліфікованих рішень. Сучасні можливості представлені безліччю методик очищення води. В роботі представлено автоматизацію процесу очищення з використанням установки у вигляді модульного контейнера із системою зворотного осмосу, яка забезпечує якісний продукт у вигляді очищеної, пом'якшеної та демінералізованої питної води. Проведений аналіз стану виробництва, виявив, що практично на всіх виробництвах застосовано ПІД-регулятор, а принципи керування із використанням системи з МРС-регулятором не застосовується. У свою чергу, МРС-регулювання – тип регулятора, що функціонує за допомогою передбачення поведінки системи в тих чи інших умовах роботи – використовується в промисловості, коли потрібно застосувати штучний інтелект для передбачення різних ситуацій у перебігу технологічного процесу. В роботі об'єктом дослідження виступає модульний контейнер системи зворотного осмосу, що встановлена на низці вітчизняних та зарубіжних виробничих підприємств. Програмування логічного реле та синтез системи керування із реалізацію МРСрегулювання є основними задачами досліджень. Розглянуто модель мембрани зворотного осмосу типу CSM RE8040-BLF. Після отриманих результатів моделювання було прийнято рішення про застосування в дослідженнях МРСрегулятора. В проведених дослідженнях він використовувався задля точнішої та швидшої реакції системи на зміни під час перехідного процесу роботи. Синтез, програмування та налаштування регулятора проведено із використанням середовища MATLAB Simulink.

Ключові слова: система керування, мембрана, фільтрація, вимірювальний прилад, клас точності, програмування, програмне середовище.

Постановка проблеми. Під сучасну пору більшість природних джерел прісної води мають статус непридатними для вживання людиною в якості питної. Деякі з них навіть не можуть мати статусу для використання в технічних потребах. Оскільки чиста вода для споживання становить одну з найважливіших потреб людини, що напряму впливає на здоров'я та благополуччя життєвого циклу людини, то проблема відсутності надійного водопостачання потребує нагаль-

них та кваліфікованих рішень. Сучасні технології передбачають безліч методів очищення води [1]. Для вирішення питання очищення води передбачені санітарно-токсикологічні, органолептичні та фізико-хімічні показники безпечності та якості питної води. Очищення води є однією зі сфер діяльності людини, що відповідно вимагає максимальної автоматизації процесу. В процесі очищення найперспективнішим варіантом виступає установка у вигляді модульного кон-

тейнера із системою зворотного осмосу, яка забезпечує якісний продукт у вигляді очищеної, пом'якшеної та демінералізованої питної води. Головними чинниками, на які потрібно звертати увагу в системі зворотного осмосу, є концентрація домішок ув очищеній воді та продуктивність [2]. Остання визначається витратою пермеату на виході з установки. Для зниження концентрації домішок у пермеаті використовується декілька ступенів фільтрації, основою в яких виступають мембрани зворотного осмосу. Модульний контейнер зворотного осмосу є системою, об'єктами виступають зворотноосмотичні блоки. Відповідно ці блоки підлягають автоматизації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стан питання керування системою зворотного осмосу представлений на виробництві із використанням ПІД-регуляторів [3–4]. ПІД-регулятор (*PID-controller*) – це базовий регулятор для будь-якої промисловості. Він дозволяє керувати системою так, щоб вона мала змогу реагувати на будь-яке збурення та утримувати сигнал регульований параметр на відповідному рівні [5]. Виходячи з розглянутих матеріалів, виявлено, що не було розглянуто принципи керування із використанням системи з *MPC*-регулятором [6–7]. *MPC*-регулятор – тип регулятора, що функціонує за допомогою передбачення поведінки системи в тих чи інших умовах роботи та використовується в промисловості, коли потрібно застосову-

вати штучний інтелект для передбачення різних ситуацій перебігу технологічного процесу [8].

Постановка завдання. Об'єктом дослідження виступає модульний контейнер системи зворотного осмосу, що встановлена на низці вітчизняних виробничих та зарубіжних виробничих підприємств. Програмування логічного реле *Siemens LOGO* та синтез системи керування із реалізацією *MPC*-регулювання виступають основними задачами досліджень.

Виклад основного матеріалу. Розрахункову схему зворотноосмотичного блоку представлено на рис. 1.

На схемі представлено наступні складові:

N_v – кількість мембранотримачів;

N – кількість елементів (мембран);

S – площа елемента (мембрани);

$P_{if1}, \dots, P_{if6}$ – осмотичний тиск вхідної води для елемента 1–6;

$P_{ip1}, \dots, P_{ip6}$ – осмотичний тиск пермеату для елемента 1–6; у «-» не може бути пробілів

Sel – селективність мембрани;

dP_{fc} – перепад тиску системи по концентрату;

C_{fc} – концентрація потоку за концентратом;

C_f – концентрація потоку за вхідною водою;

P_p – тиск пермеату;

T – температура води;

Y_s – відновлення системи (гідравлічний ККД системи);

FF – фактор забруднення мембрани;

TCF – фактор температурної поправки;

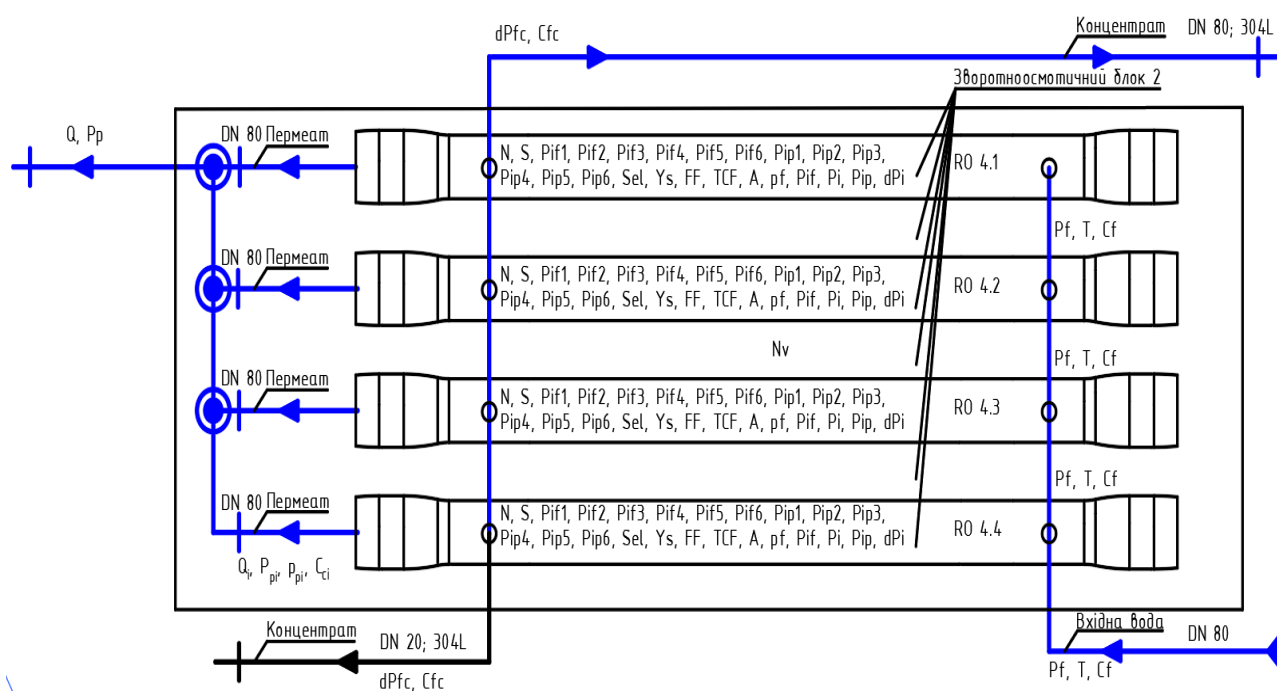


Рис. 1. Розрахункова схема зворотноосмотичного блоку

A – проникність мембрани;
 pf – концентраційна поляризація;
 P_{if} – осмотичний тиск системи за вхідною водою;

P_i – осмотичний тиск системи за концентратом;

P_{ip} – осмотичний тиск системи за пермеатом;

dP_i – осмотичний перепад тиску системи;

Q – витрата пермеату;

P_f – тиск вхідної води.

В роботі представлено модель мембрани зворотного осмосу типу *CSM RE8040-BLF*, розрахунки проведено за формулами виробника мембран *CSM*, а фактор температурної поправки за формулою компанії *Dupont*. Оскільки математичні моделі містять у собі необхідні константи, що працюють правильно лише для вимірювальних одиниць тиску у барах і загальноприйнята практика показує, що більшість розрахунків для систем зворотного осмосу ведуться в таких одиницях, їх виконано саме у такий спосіб. Фактор температурної поправки для температури $\leq 25^\circ\text{C}$ прийнято 0,48. Реалізація моделі виконана в програмному середовищі *MATLAB* [9–10]. Модель використана для синтезу системи керування.

На виробництві для системи зворотного осмосу найчастіше використовуються одноконтурні системи керування з ПІД-регулятором. Широкого використання набули регулятори, що використовуються в програмованому логічному контролері з лінійки *Siemens Simatic S7*. Серед вимірювальних приладів можна віднести серію МТР-138 від вітчизняної компанії «Мікрол». В роботі проведено налаштування регулятора за допомогою програмування функцій *Matlab Simulink* у блоці *PID-controller*. Згідно з налаштуваннями програмного середовища можна зробити висновок про параметри налаштування контролера.

Після отримання результатів було прийнято рішення про застосування в дослідженнях *MPC*-регулятора. *MPC*-регулятор – тип новітнього регулятора, що функціонує за допомогою передбачення поведінки системи в тих чи інших умовах роботи. Часто такий тип регулятора застосовують у автомобільній промисловості, коли потрібно використовувати штучний інтелект для передбачення різних ситуацій на дорозі – від правильного керування авто до передбачення дорожньо-транспортної пригоди. В роботі він буде використовуватися задля точнішої та швидшої реакції системи на зміни під час перехідного процесу роботи. Вони виготовляються такими компаніями, як *Siemens* та *Schneider Electric*.

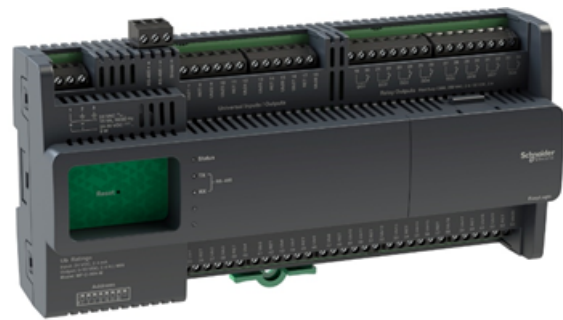


Рис. 2. *MPC*-регулятор *EasyLogic Schneider Electric*

Слід зазначити, що зазначений пристрій використовується у ПЛК від компанії *Siemens*, таких як *SIMATIC S7-1500*, а також його застосовують у компанії *Tesla*. *MPC*-регулятор для правильного регулювання користується лінійними моделями установки та збурень. Після визначення даних моделі він прогнозує вихідні сигнали та розв'язує задачу оптимальності квадратичного програмування. Працює регулятор таким чином, що сигнал поділяється на певну кількість кроків у часі та під час регулювання обирає на кожному кроці потрібне оптимальне значення, на яке необхідно вийти залежно від поведінки системи у відповідному періоді часу.

До параметрів *MPC*-регулятора входять: час дискретизації, горизонт прогнозування та керування, номінальні значення, масштабні коефіцієнти, ваги.

Синтез, програмування та налаштування проведено у середовищі *MATLAB Simulink*.

Проведено визначення структури регулятора за допомогою *MPC Structure* та проведено первинне налаштування.

Проведено налаштування системи. Оскільки система працює в пікових своїх значеннях (24 бари) з допуском зміни на 1 бар, то значного перерегулювання в системі не допускається. Тому для стабільності системи визначено горизонт прогнозу як 20, а горизонт керування – 5.

В роботі значення параметра *Weight* відповідає за підняття графіка до потрібного значення. Зазвичай воно відповідає номінальному значенню системи для вхідного каналу. *Rate weight* потрібен для вирівнювання сигналу до такого значення, яке буде оптимальним для нашої системи. Перерегулювання не потрібне, через що система починає виходити на необхідне значення повільніше, але стабільніше. *Weight* у вихідного сигналу необхідний для прискорення системи, але з присутнім перерегулюванням, через що потрібно зберігати баланс між вхідними та вихідними вагами.

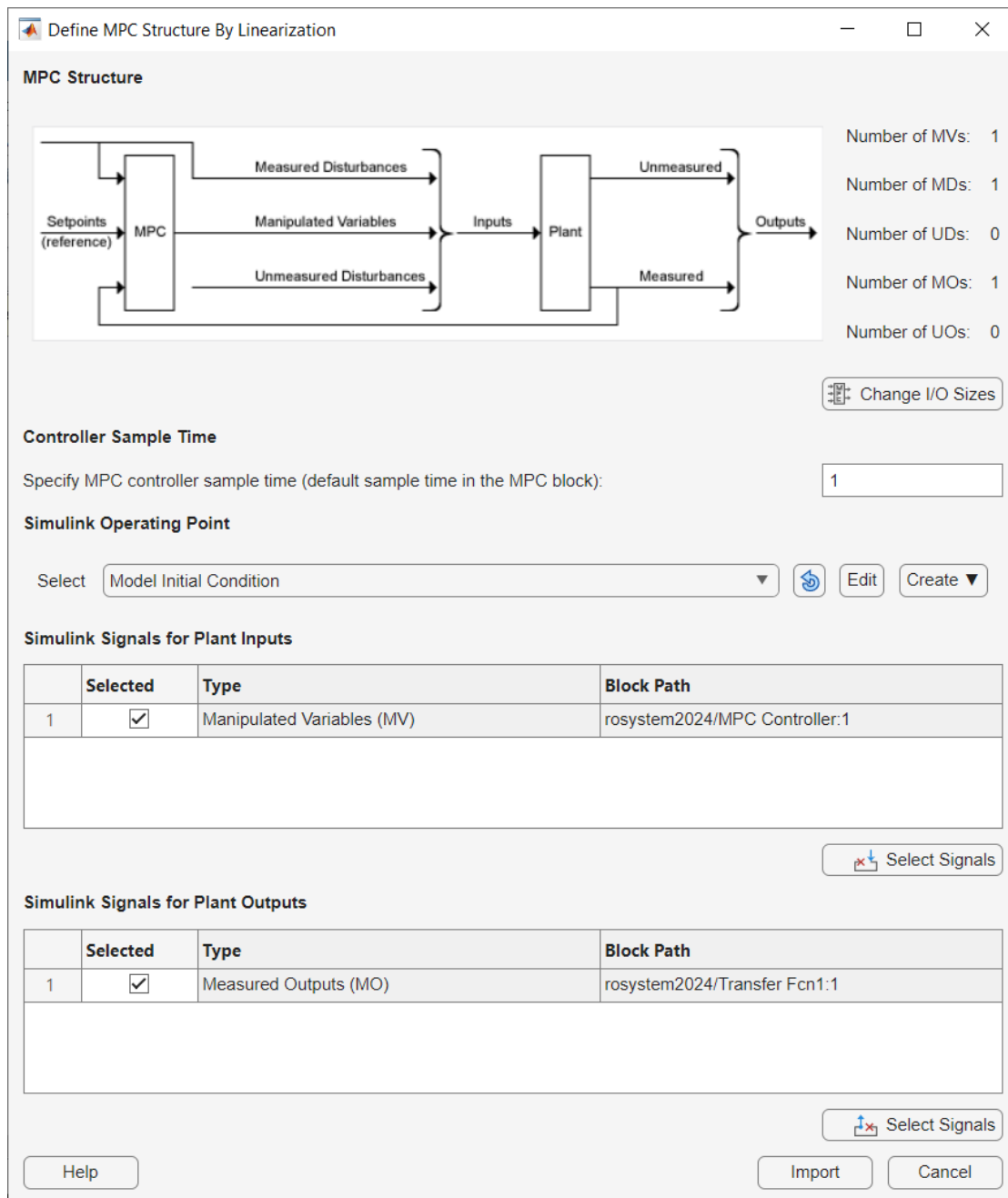
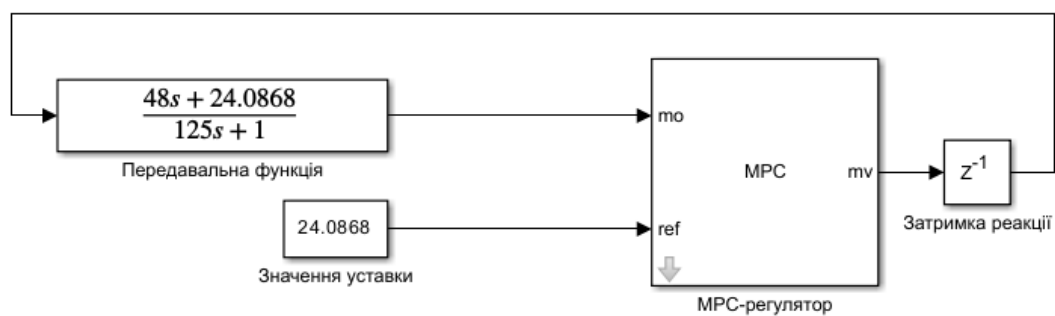
Рис. 3. Первинне налаштування MPC-регулятора в *MATLAB Simulink*

Рис. 4. Система з MPC-регулятором

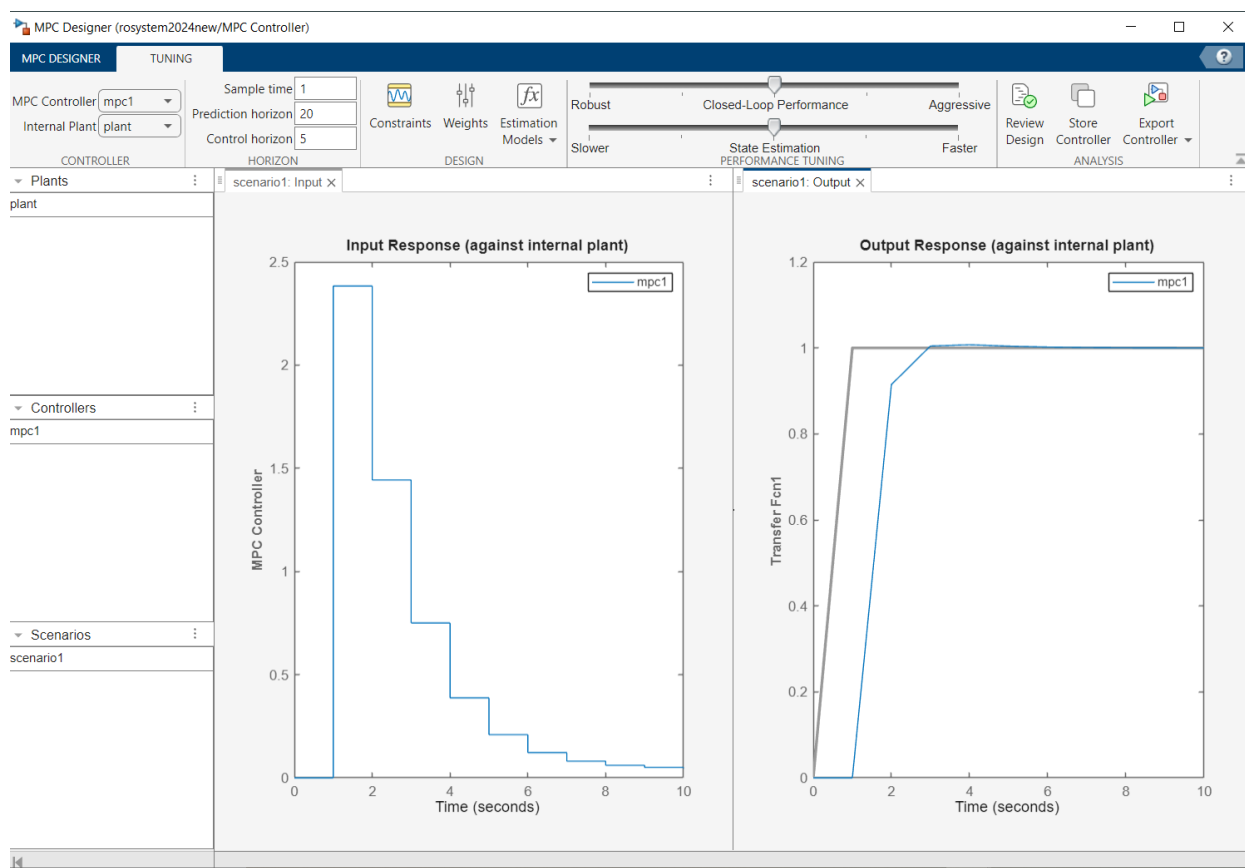


Рис. 5. Налаштування системи та її реакція

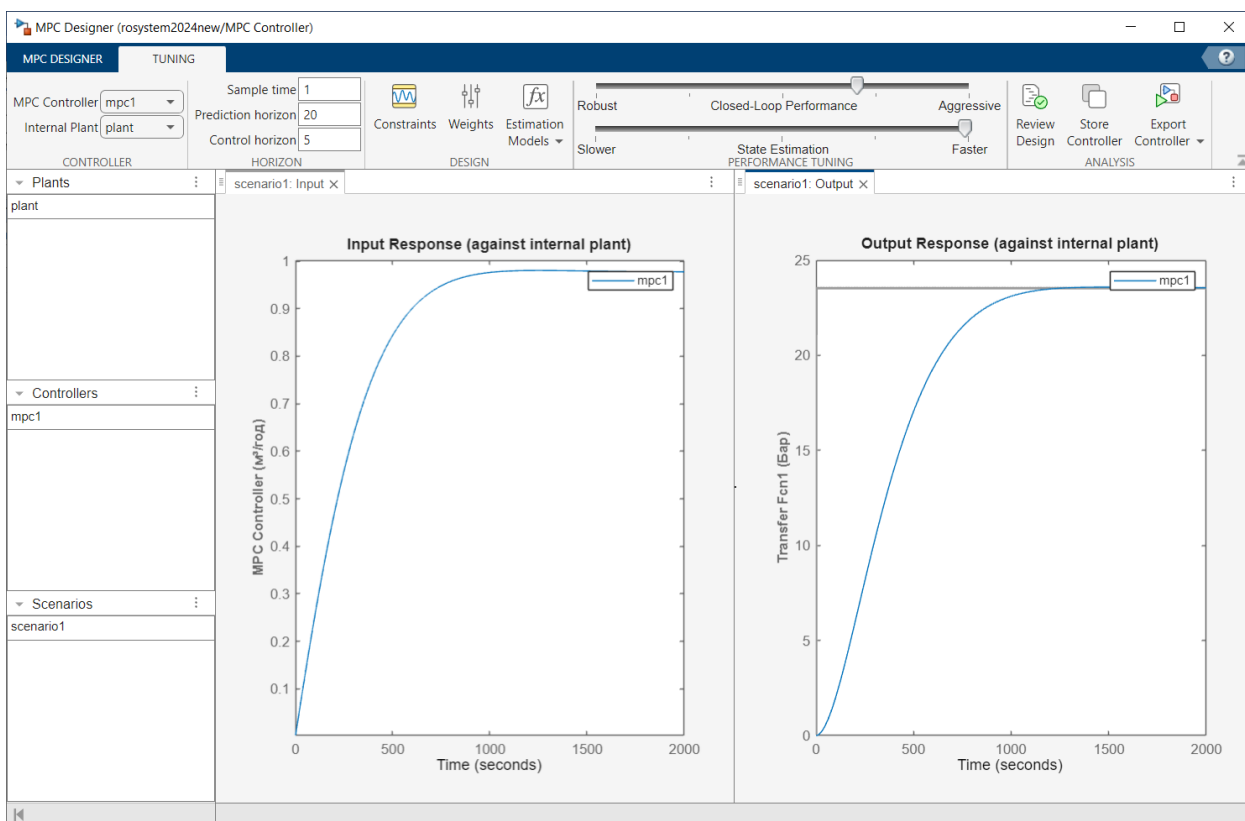


Рис. 6. Перехідна характеристика системи з MPC-регулятором

Висновки. Було досліджено модульний контейнер системи зворотного осмосу, розроблений компанією «Нерекс» з імплементацією новітніх технологій програмованого логічного реле *Siemens LOGO*. Синтезовано систему керування із реалізацію MPC-регулювання.

Список літератури:

1. Про затвердження Державних санітарних норм і правил «Показники безпечності та окремі показники якості питної води в умовах воєнного стану та надзвичайних ситуаціях іншого характеру» : Наказ МОЗ України від 22.04.2022 № 683. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0564-22#Text> (дата звернення: 07.05.2025).
2. DuPont de Nemours, Inc. FilmTec™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual, 2023. 211 p.
3. M. S. Islam, A. Sultana, A. H. M. Saadat, M. S. Islam, M. Shammi, M. K. Uddin Desalination Technologies for Developing Countries: A Review URL: <https://www.banglajol.info/index.php/JSR/article/view/33179> (дата звернення: 08.05.2025).
4. Jasper van Asselt C.S. Membrane Technology. Sustainable seawater reverse osmosis (SWRO) system design for rural areas of developing countries Engineering & Technology (ET), Enschede: Master Sustainable Energy Technology (SET), June 10, 2021. 27 p.
5. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування : підручник / Рецензент: І. В. Волков, В. І. Сенько, Ю. А. Скрипник. Київ : «Либідь», 2007. 656 с.
6. Lilian Malaeb, George M. Ayoub Reverse osmosis technology for water treatment: State of the art review URL: <https://surl.li/fdnwti> (дата звернення: 08.05.2025).
7. Ruth Habte Hailemariam, Yun Chul Woo, Mekdimu Mezemir Damtie, Bong Chul Kim, Kwang-Duck Park, June-Seok Choi. Reverse osmosis membrane fabrication and modification technologies and future trends: A review. URL: <https://surl.li/xe9rcv> (дата звернення: 08.05.2025).
8. MPC Signal Types. MathWorks – Maker of MATLAB and Simulink – MATLAB & Simulink. URL: <https://surl.li/qcgbig> (дата звернення: 7.05.2025).
9. Tune Weights. MathWorks – Maker of MATLAB and Simulink – MATLAB & Simulink. URL: <https://www.mathworks.com/help/mpc/ug/tuning-weights.html> (дата звернення: 5.05.2025).
10. Фтемов А. О., Ситніков О. В. Синтез системи керування з MPC-регулятором для конденсації продуктів синтезу. // «AKIT-2024», Київ, 2024. С.71–73

Sytynikov A.V., Lukiniuk M.V., Ftemov A.O. SYNTHESIS OF A WATER TREATMENT CONTROL SYSTEM USING A MODULAR CONTAINER OF A REVERSE OSMOSIS SYSTEM

The article presents the basic provisions for creating a control system and the principle of programming the regulator unit for a modular container of the reverse osmosis system installed at the southern mining and processing plant. Nowadays, the vast majority of natural sources of fresh water have the status of being unsuitable for human consumption as drinking water. Based on the fact that clean water for consumption is the main human need, which is responsible for the very existence, the problem of the lack of reliable water supply requires urgent and qualified solutions. Modern capabilities are represented by a variety of water purification methods. The paper presents the automation of the purification process using a unit in the form of a modular container with a reverse osmosis system, which provides a high-quality product in the form of purified, softened and demineralized drinking water. An analysis of the state of production was conducted, it was found that a PID controller is used in almost all production facilities, and the principles of control using a system with an MPC controller are not applied. In turn, MPC-regulation is a type of regulator that functions by predicting the behavior of the system under certain operating conditions, used in industry when it is necessary to use artificial intelligence to predict various situations of the technological process. In the work, the object of research is a modular container of the reverse osmosis system, which is installed at a number of domestic and foreign manufacturing enterprises. Programming of a logic relay and synthesis of a control system with the implementation of MPC-regulation are the main tasks of the research. The model of the reverse osmosis membrane type CSM RE8040-BLF was considered. After the obtained modeling results, a decision was made to use the MPC-regulator in the research. In the conducted research, it was used for a more accurate and faster response of the system to changes during the transient process of work. The synthesis, programming and tuning of the regulator were carried out using the MATLAB Simulink environment.

Key words: control system, membrane, filtration, measurement, accuracy class, programming, software environment.