

І. Цмоць, Т. Теслюк

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра автоматизованих систем управління

СТРУКТУРА ТА МОДЕЛІ РОБОТИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ МІКРОКЛІМАТОМ МІНІТЕПЛИЦІ

© Цмоць І., Теслюк Т., 2016

Розроблено схему інформаційної взаємодії мінітеплиці із оточенням. Запропоновано структуру системи управління мікрокліматом мінітеплиці основними компонентами якої є: мікроконтролер ATmega2560, мобільний пристрій зв'язку під управлінням ОС Android, модулі Ethernet, пам'яті, інтерфейсів периферії, датчиків та актуаторів. Розроблено основні алгоритми роботи клієнтської та серверної частин системи управління. Побудовано на основі теорії мереж Петрі моделі роботи та графи досяжності станів клієнтської, серверної частин і комунікації між ними. Досліджено роботу системи управління мікрокліматом мінітеплиці та показано, що система працює правильно та коректно, усі стани досяжні, а тупики відсутні.

Ключові слова: мікроклімат, мінітеплиця, модель, мережі Петрі, системний рівень проектування, стани системи.

In the article the scheme of information exchange between mini greenhouse and environment has been designed. The structure of the control climate system of mini greenhouse has been designed. The system structure include ATmega2560 microcontroller, mobile communications device running under Android OS, modules Ethernet, memory storage, peripheral interfaces, sensors and actuators. The main algorithms of work of customer and server parts of the system have been built. The models based on Petri nets are developed. These models are used for study the states of the system. Using the models graph of reachable states in which the system can exist was built. The results of analysis of the system work make it possible to state that system works properly and correctly and all the states are reachable and deal ends are absent.

Ключові слова: mini greenhouse, model, Petri nets, system level of design, states of system, Arduino microcontroller, OS Android.

Постановка проблеми

Для отримання рівномірно протягом року врожаю овочів використовують мінітеплиці. Врожай у таких теплицях значною мірою визначається мікрокліматом, який забезпечують за допомогою сучасних комп'ютерних систем управління. В сучасних системах управління не враховують такі параметри, як: температура на поверхні рослин; температурний вплив сонячного випромінювання, зовнішні фактори. В таких системах управління не враховують коливань параметрів теплиці, зміни структури взаємозв'язків між ними, не забезпечують ефективного керування температурно-вологісним режимом та енергоефективністю теплиць.

Для оцінювання енергоефективності теплиць використовують показник “енергоємність”, який характеризує рівень витрат паливно-енергетичних ресурсів на одиницю виробленого продукту. Основними проблемами невисокої енергоефективності теплиць є: надмірне споживання енергоресурсів через низьку енергоефективність технологій і обладнання та недосконалість схем

енергопостачання; неефективність структури споживання паливно-енергетичних ресурсів, зокрема через завищену частку споживання природного газу і недостатній обсяг використання енергії з альтернативних видів палива та відновлювальних джерел; низький рівень управління енергоефективністю і споживанням енергоресурсів.

Підвищити енергоефективність теплиць можна такими заходами, як: зменшення обсягу технологічних і невиробничих втрат енергоресурсів внаслідок модернізації схем енергопостачання, обладнання, впровадження сучасних енергоефективних технологій; оптимізації структури споживання паливно-енергетичних ресурсів, зокрема заміщення традиційних видів енергоресурсів іншими видами, в тому числі з відновлювальних джерел енергії та альтернативних видів палива; вдосконалення системи управління енергоефективністю і споживанням енергоресурсів.

Ефективно управляти мікрокліматом та енергоефективністю мінітеплиць можна, розробляючи та використовуючи інтелектуальні компоненти у системі управління. Основна проблема розроблення інтелектуальних компонентів систем управління мікрокліматом у мінітеплицях полягає у формуванні вимог, виборі методів опрацювання даних і засобів їх реалізації (програмні, апаратні чи програмно-апаратні).

Тому актуальною проблемою є проектування інтелектуальних компонентів та синтез на їх основі адаптивних комп'ютерних систем управління мікрокліматом та енергоефективністю мінітеплиць.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У роботах [1, 2] показано, що мікроклімат у теплицях залежить від таких параметрів: температури, вологості повітря та вмісту вуглекислого газу в теплиці; освітленості, зовнішньої температури та сили вітру. У цих роботах мало уваги приділено питанням автоматизації управління цими параметрами.

Питання, пов'язані з відбором інформації із датчиків (первинних перетворювачів), детально розглянуто у роботах [3, 4]. За допомогою датчиків формується первинна інформація, за результатами опрацювання якої формуються сигнали управління для виконавчих механізмів. У цих роботах мало уваги приділено питанням інтелектуалізації та попереднього опрацювання даних.

Одним із основних компонентів систем управління є промислові мережі рівня датчиків і рівня контролерів [5]. Особливістю апаратно-програмних мереж контролерного рівня є забезпечення режиму реального часу, який накладає жорсткі вимоги до часу реакції на зміни даних, які надходять від датчиків, і часу формування управлінських сигналів. Для цього рівня зв'язку характерні такі особливості: циклічне (періодичне) читання даних із датчиків і видача сигналів управління; прив'язка циклу мережі до циклу контролера; можливість гарячого підключення засобів. У цій роботі мало уваги приділено питанням попереднього опрацювання та збереження даних.

У роботах [6, 7] показано, що сучасні системи управління розвиваються в напрямку зменшення розмірів, маси та енергозатрат, підвищення надійності, нарощення функціональності та інтелектуалізації. В таких умовах з'являються нові системи управління, які ґрунтуються на нових інтелектуальних інформаційних технологіях і сучасній елементній базі [8–15].

З аналізу публікацій випливає, що підвищити ефективність управління мікрокліматом у мінітеплиці можна за комплексним підходом, який охоплює сучасну елементну базу, методи інтелектуального та попереднього опрацювання даних.

Метою роботи є розроблення схеми інформаційної взаємодії мінітеплиці із оточенням структури, системи управління мікрокліматом у мінітеплиці, алгоритмів і моделей роботи клієнтської та серверної частин цієї системи з використанням мереж Петрі.

Основна частина

Розроблення схеми інформаційної взаємодії мінітеплиці із оточенням. Мікроклімат у мінітеплиці залежить від зовнішніх (вологість повітря, зовнішня температура, сила вітру, сонячне

освітлення), експлуатаційних (маса повітря, маса ґрунту) і конструкторських (теплопровідність ґрунту та огорожі) факторів впливу, які необхідно враховувати при його формуванні. Схему взаємодії факторів впливу, мінітеплиці та системи управління мікрокліматом мінітеплиці наведено на рис.1, де $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7$ та P_8 – відповідно температура ґрунту, температура повітря, температура рослинного покриву, вологість повітря, вологість ґрунту, вміст двоокису вуглецю, вміст кисню та освітленість; $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6$ та Y_7 – відповідно сигнали управління освітленням, провітрюванням, температурним режимом повітряного середовища, обігрівом ґрунту, приготуванням розчинів, поливом розчином та водяним режимом; K_1 та K_2 – відповідно теплоємність ґрунту та теплоємність рослин; E_1 та E_2 – відповідно маса ґрунту та повітря.

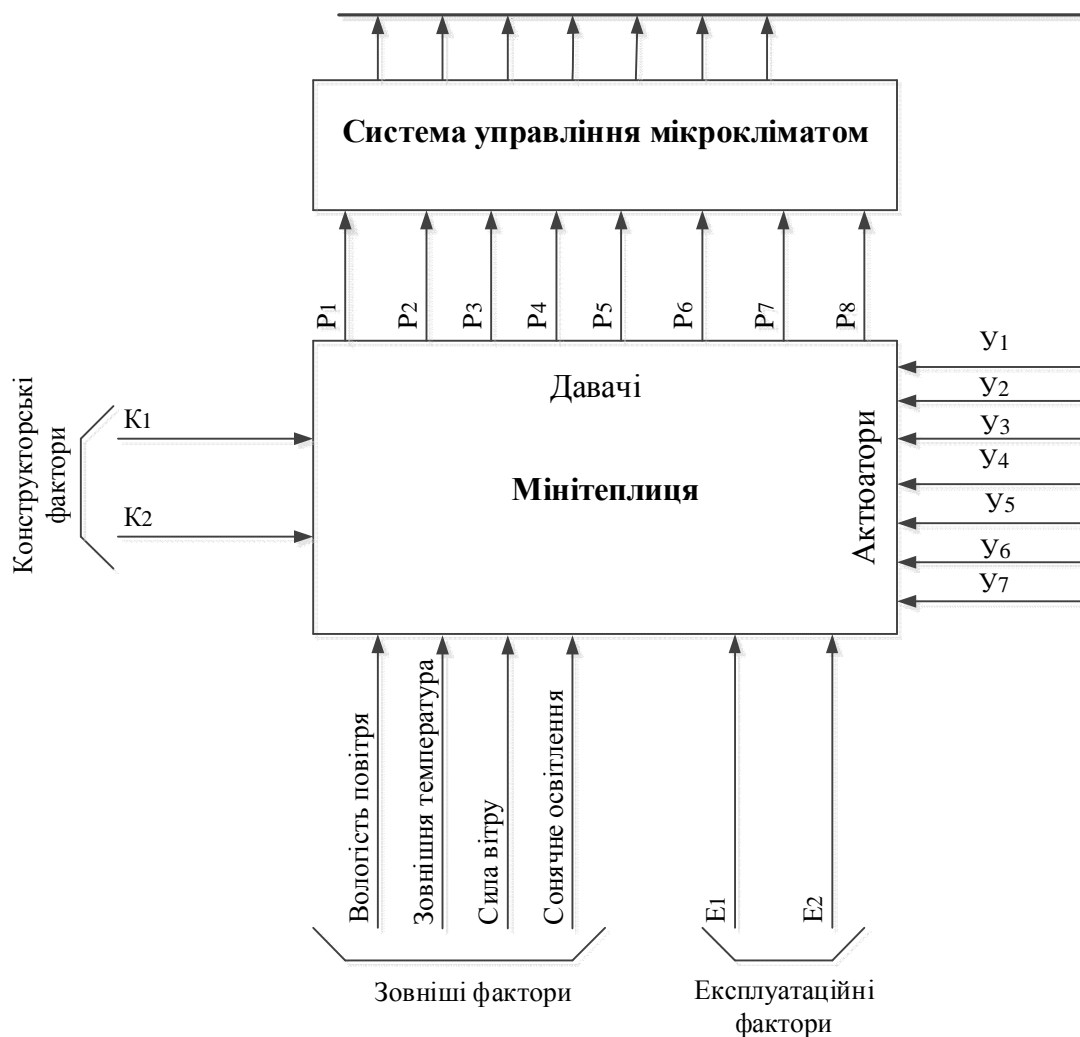


Рис. 1. Схема інформаційної взаємодії мінітеплиці із оточенням

Формування мікроклімату в мінітеплиці залежить від комплексу параметрів: температури, вологості повітря та вмісту кисню в мінітеплиці; зовнішньої температури, швидкості повітря; освітлення, вмісту вуглекислого газу в зоні, де знаходяться рослини. Для регулювання вмісту кисню та вуглекислого газу в мінітеплиці використовують систему вентиляції, в якій передбачають механічну систему відкриття і закриття верхніх і бічних вікон за допомогою приводів.

Ефективну роботу мінітеплиці забезпечує система краплинного поливу, яка передбачає виготовлення живлячої суміші і подачі її в проміжну ємність. Подача підживлення регулюється автоматично та здійснюється в певні проміжки часу під кореневу систему кожної рослини. Сигнали управління підсистемою підживлення та дощування формуються на основі опрацювання даних із давачів температури і вологості. Тривалість циклу поливу від 0 до 15 с та від 1 до 15 хв.

Зволожують повітря в мінітеплиці, розпиляючи воду через форсунки, а поливають ґрунт через систему зрошення за допомогою насосів-дозаторів. Тепловий режим мінітеплиці підтримують за допомогою систем обігрівання і вентиляції. Найперспективнішим обігрівом мінітеплиць сьогодні є електричний. При електричному обігріві використовують нагрівальні елементи, які генерують тепло індивідуально. Управляють нагрівальними елементами за допомогою терморегуляторів, завдяки чому підсистема обігріву забезпечує високу динамічність і високу точність підтримання температури в заданому діапазоні. У мінітеплицях для обігріву ґрунту використовують електричні кабелі та мати, потужність яких може бути 75–100 Вт/м. Із обігріванням мінітеплиць тісно пов'язані проблеми енергозбереження, яким сьогодні приділяють багато уваги.

Розроблення структури системи управління мікрокліматом мінітеплиці. В основу проектування сучасних систем управління мікрокліматом мінітеплиці покладено системну інтеграцію, яка ґрунтується на системному підході, який охоплює всі рівні інтеграції процесів управління мінітеплицею з врахуванням вимог та ефективності їх застосування. Розробляти системи управління мікрокліматом мінітеплиці доцільно на основі комплексного підходу, який охоплює комунікаційні та інформаційно-управляючі технології та системи, сучасну елементну базу, програмне забезпечення з використанням ОС Android, засоби підтримки прийняття рішень і ґрунтується на таких принципах: системності, змінного складу обладнання, відкритості, модульності та використання комплексу базових проектних рішень.

Управляють мікрокліматом у мінітеплиці за допомогою системи управління, основними компонентами якої є: мікроконтролерна система, мобільний пристрій зв'язку під управлінням ОС Android, множина датчиків і актюаторів (рис. 2).

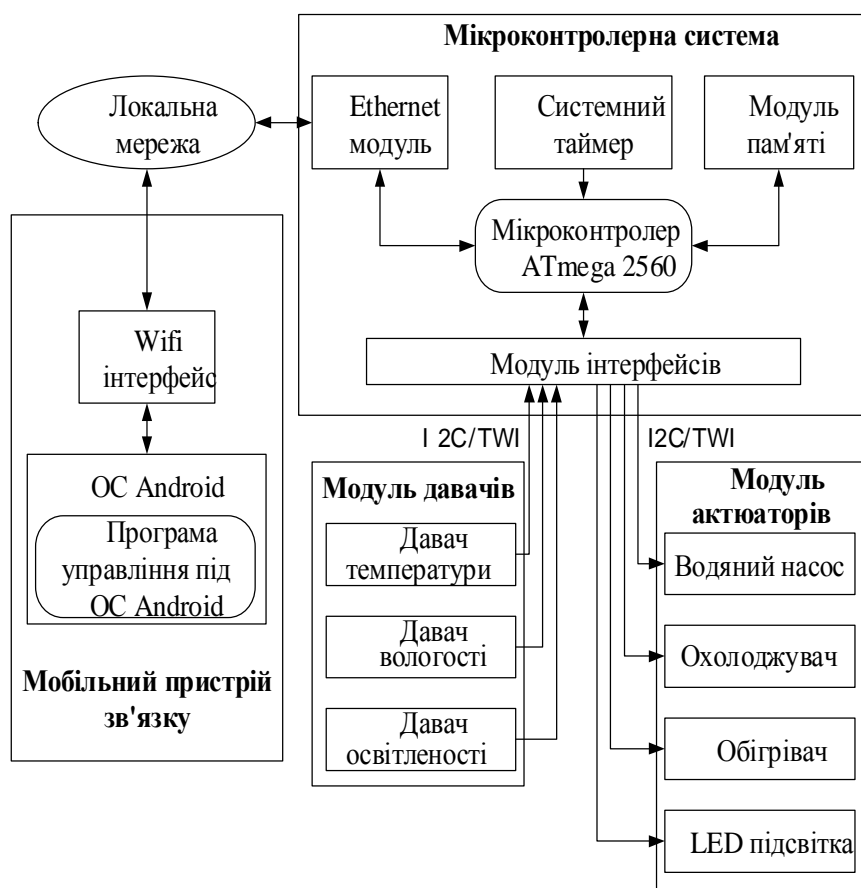


Рис. 2. Структура системи управління мікрокліматом мінітеплиці

Мікроконтролерна система складається із мікроконтролера Arduino на базі ATmega2560, Ethernet модуля, модуля пам'яті та модуля інтерфейсів.

Мікроконтролер з'єднаний із усіма модулями системи в єдину систему. Він відповідає за автономне управління мікрокліматом мінітеплиці. З цією метою мікроконтролер зчитує через модуль інтерфесів показники давачів та згідно із внутрішньою програмою керує актюаторами. Внутрішня програма аналізує межі необхідних параметрів мікроклімату та формує керівні сигнали. У разі наявності зв'язку із мобільним пристроєм управління мікроконтролер перевіряє, чи наявні зміни у параметрах управління мікротеплицею та перезаписує конфігураційний файл.

Модуль Ethernet базується на Wiznet W5100 контролері. Модуль відповідає за комунікацію через локальну мережу. Модуль здатний приймати і надсилати різноманітні пакети даних. Його використовують для організації локального сервера та комунікації із мобільним пристроєм через локальну мережу.

Модуль пам'яті відповідає за збереження та завантаження конфігураційних файлів. Цей модуль необхідний для відновлення стану системи у разі різноманітних збоїв. Дані зберігаються на SD-картці.

Системний таймер відповідає за відлік локального часу. Це необхідно для визначення часу доби та відслідковування додаткових параметрів управління системою.

Модуль інтерфейсів відповідає за організацію аналогових та цифрових виходів за допомогою I2C/TWI інтерфейсів. Ці інтерфейси використовують для комунікації із давачами та управлінням актюаторами.

Мобільний пристрій зв'язку під управлінням ОС Android містить **Wi-fi** інтерфейс, який використовують для створення двостороннього з'єднання між Ethernet модулем та мобільним пристроєм.

На пристрій встановлено програму для управління мікрокліматом мінітеплиці для перевірки та налаштування параметрів її роботи. Програма здатна отримувати дані від мікроконтролера, відображати їх на екрані мобільного пристрою та надсилати команди через **Wi-fi** інтерфейс.

Програма є гнучкою і здатна працювати з різною структурою мінітеплиці. Це все завдяки тому, що програма на початку роботи зчитує конфігурацію мінітеплиці і залежно від отриманої інформації коригує свою роботу.

Модуль давачів використовують для аналізу параметрів мікроклімату теплиці. Модуль інтерфейсів періодично описує дані від давачів. Модуль давачів складається з давача температури та вологості DHT11, давача освітленості, який ґрунтується на фоторезисторі.

Модуль актюаторів відповідає за керування різноманітними актюаторами. З цією метою модуль інтерфейсів надсилає керуючі сигнали для утримання параметрів мікроклімату в нормі, згідно з якими вмикаються актюатори.

Розроблення алгоритмів серверної та клієнтської частини системи управління мікрокліматом мінітеплиці. Основною частиною мікроконтролерної системи Arduino є мікроконтролер ATmega2560. Для комунікації із мобільним пристроєм зв'язку на базі мікроконтролера розгортається сервер, який здатний опрацювати запити згідно із протоколом комунікації. Оскільки мікроконтролер може одночасно виконувати тільки одне завдання, то необхідно розробити алгоритм, який дає можливість переключатись між керуванням теплицею та комунікацією з клієнтом.

З цією метою розроблено алгоритм роботи сервера, який складається з таких основних кроків:

Крок 1. Запуск системи на виконання, що передбачає увімкнення живлення для мікроконтролера із його периферійними пристроями;

Крок 2. Ініціалізація системи; складається з ініціалізації давачів, перевірки актюаторів, модулів комунікації, модуля пам'яті, системного таймеру тощо;

Крок 3. Зчитування системної конфігурації, що полягає в зчитуванні інструкції із конфігураційного файла та роботі системи згідно із конфігураційним файлом;

Крок 4. Перевірка на отримання запиту, яка дає можливість з'ясувати, чи необхідно приступити до аналізу і опрацювання запиту, чи продовжувати керувати мінітеплицею; опрацювання запиту полягає в розбитті та аналізі запиту згідно із протоколом комунікації; збереження конфігурації системи відбувається у разі надходження запиту із зміною налаштувань системи. У цьому випадку перезаписується конфігураційний файл системи.

Крок 5. Під час зчитування даних від давачів відбувається послідовне опитування кожного із давачів системи та збереження поточного стану системи. В процесі перевірки стану актюаторів аналізують дані від давачів та формують стратегію роботи кожного актюатора. На основі цієї стратегії відбувається включення/виключення кожного із актюаторів.

Крок 6. Під час перевірки таймерів відбувається перевірка поточного часу системи, порівняння часу таймера та поточного часу. У разі, коли поточний час знаходиться в межах роботи таймера, відбувається переналаштування роботи актюаторів згідно із заданим сценарієм роботи.

Згідно із основною структурою системи, клієнт не повинний мати постійний зв'язок із сервером. Саме тому значна частина логіки роботи системи переноситься на сервер, а на клієнті знаходиться тільки логіка для налаштування та контролю. Алгоритм роботи клієнта містить такі важливі етапи:

Крок 1. Користувач запускає програму на мобільному пристрої. Початкова ініціалізація клієнта та генерація інтерфейсу користувача.

Крок 2. Додаток встановлює з'єднання із сервером. Генерування тестових запитів до сервера та перевірка успішності їхнього виконання.

Крок 3. У разі, якщо з'єднання не встановлено, то виводиться повідомлення про помилку, можливі варіанти вирішення проблеми. Через деякий час з'єднання перевіряється повторно та у разі успішного налаштування з'єднання відбувається перехід на крок 4.

Крок 4. Формується та надсилається запит на дані, стан мінітеплиці.

Крок 5. Якщо даних про стан системи не отримано, то виконується крок 3. Якщо дані отримано, то програма переходить на крок 6.

Крок 6. Відповідь, отримана від сервера, опрацьовується та формується список даних про стан давачів, актюаторів та таймерів.

Крок 7. На основі отриманих від сервера даних відображаються дані про стан давачів, актюаторів та таймерів.

Крок 8. Програма очікує на зміни у налаштуваннях від користувача. У разі внесення необхідних правок у налаштування системи та підтвердження змін відбувається перехід на наступний крок.

Крок 9. Усі зміни в системі необхідно синхронізувати одна за однією. З цією метою послідовно формуються та надсилаються запити для зміни параметрів роботи давачів, актюаторів чи таймерів, залежно від змін.

Крок 10. У разі певних проблем із надсиланням даних необхідно перейти на крок 3 та очікувати налаштування з'єднання. Якщо всі дані успішно синхронізовано, то сервер надсилає дані про поточну роботу системи та її стан. Після цього відбувається перехід на крок 6.

Для постійної перевірки з'єднання, збереження та відображення поточних даних, Android програма запускає сервіс, який періодично збирає дані про стан системи. Цей сервіс працює в окремому потоці та є за межами роботи основного алгоритму системи.

Розроблення моделей роботи серверної та клієнтської частин з використанням мереж Петрі. Для перевірки можливостей системи та узгодження послідовності дій використовують різноманітні моделі. Для дослідження системи управління мікрокліматом мінітеплиці використано моделі, які ґрунтуються на теорії мереж Петрі [13, 14]. Одними із основних елементів системи є клієнт, сервер та сам процес комунікації між компонентами. З цією метою побудовано 3 моделі та отримано графи досяжності станів, які дають змогу дослідити динаміку роботи системи управління мікрокліматом мінітеплиці.

Модель роботи серверної частини системи управління мікрокліматом мінітеплиці містить ланцюжок вершин та імовірнісних переходів між ними. Основним завданням моделі є перевірка внутрішньої логіки роботи системи. Однією із особливостей цієї моделі є те, що система не має явного закінчення. У разі зупинки програми, помилок чи інших незапланованих ситуацій основна програма системи перезапускається і виконується за циклом. Також внутрішня програма системи передбачає цикл команд, які виконуються повторно без умови зупинки. Саме тому цю модель, яка відображає внутрішні особливості реалізації системи, наведено на рис. 3.

Для аналізу роботи клієнта побудовано модель (рис. 5), основним завданням якої є перевірка логіки зміни конфігурації та налаштувань. Модель враховує особливості комунікації із сервером та вплив користувача на клієнт в системі управління мікрокліматом мінітеплиці.

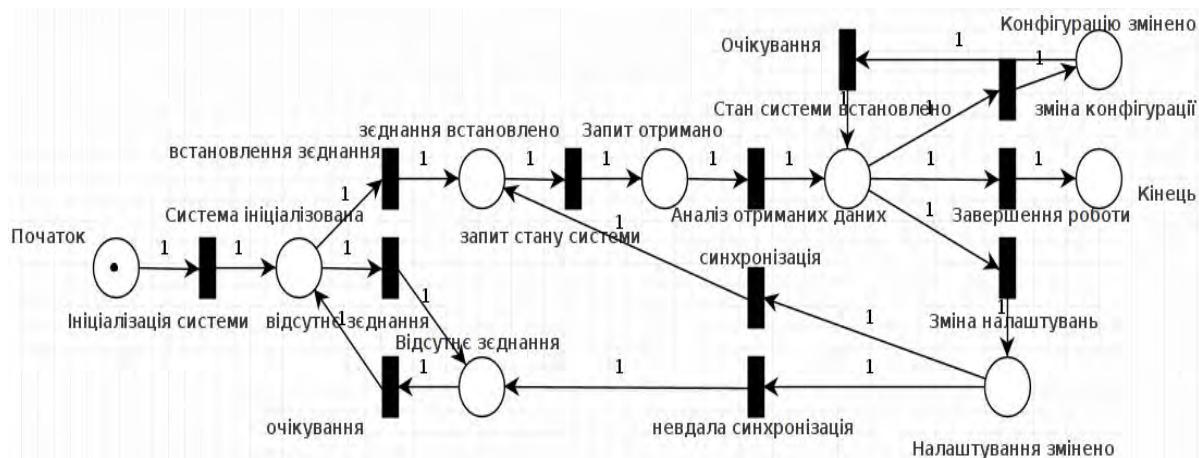


Рис. 5. Модель роботи клієнтської частини системи управління мікрокліматом мінітеплиці

Умовно модель роботи клієнта системи управління мікрокліматом мінітеплиці (рис. 5) можна поділити на такі важливі компоненти: ініціалізація та перезапуск системи, яка передбачає ініціалізацію змінних, портів для підключення датчиків та актуаторів; зчитування конфігурації системи, яка збережена в модулі пам'яті, або використання поточних налаштувань системи; запуск локального сервера для комунікації із клієнтом; у разі проблем із запуском сервера необхідно працювати в автономному режимі; аналіз та управління теплицею, що передбачає періодичне опитування даних від датчиків, перевірку внутрішніх умов роботи системи та управління актуаторами; аналіз та виконання запитів, що передбачає аналіз отриманих даних, виконання заданих команд та формування відповідей на запит; ініціалізація та завершення роботи клієнта; встановлення з'єднання, яке враховує переініціалізацію з'єднання та опрацювання помилок; зчитування даних про систему та відповідне відображення отриманих даних; зміна налаштувань користувачем та синхронізація налаштувань від клієнта із налаштуваннями на сервері.

На основі моделі (рис. 5) розроблено граф досяжності станів (рис. 6) для клієнтської частини системи управління мікрокліматом мінітеплиці. Модель виконує основний цикл відображення стану системи та зміни налаштувань. У разі якихось помилок із з'єднанням відбувається переналаштування з'єднання та налагоджується подальша робота системи. Якщо користувач забажав завершити роботу, система зупиняється і переходить у кінцевий стан. Граф досяжності станів клієнтської частини системи управління мікрокліматом мінітеплиці (рис. 6) є скінченним без тупиків, а усі стани є досяжними.

Одним із найважливіших елементів роботи системи управління мікрокліматом мінітеплиці є комунікація між клієнтом і сервером. Для аналізу процесів комунікації між клієнтом і сервером побудовано модель (рис. 7), яка відображає схематично ланцюжок подій, передбачає опрацювання помилок та відповідає роботі за наявності проблем із комунікацією.

Розроблена модель складається із трьох основних частин: опрацювання та формування запитів на стороні клієнта, опрацювання помилок у процесі комунікації; передавання даних в обох напрямках; опрацювання та формування відповіді на сервері. Ця частина передбачає виконання запитів та зміни в налаштуваннях сервера.

На основі отриманої моделі (рис. 7) побудовано граф досяжності (рис. 8) для комунікації між клієнтом та сервером у системі управління мікрокліматом мінітеплиці.

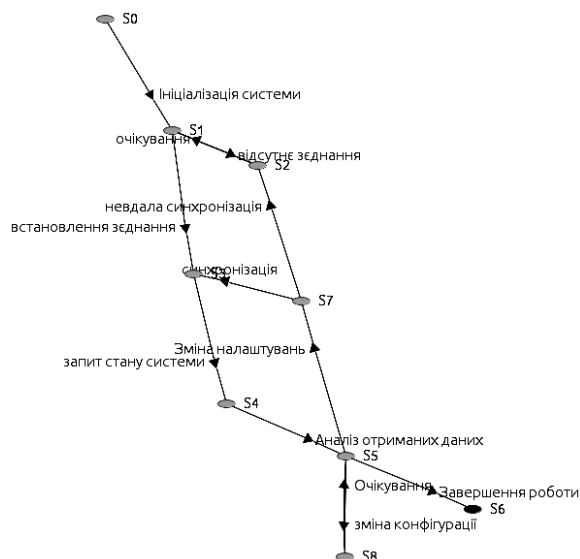


Рис. 6. Граф досяжності для моделі клієнтської частини системи управління мікрокліматом мінітеплиці

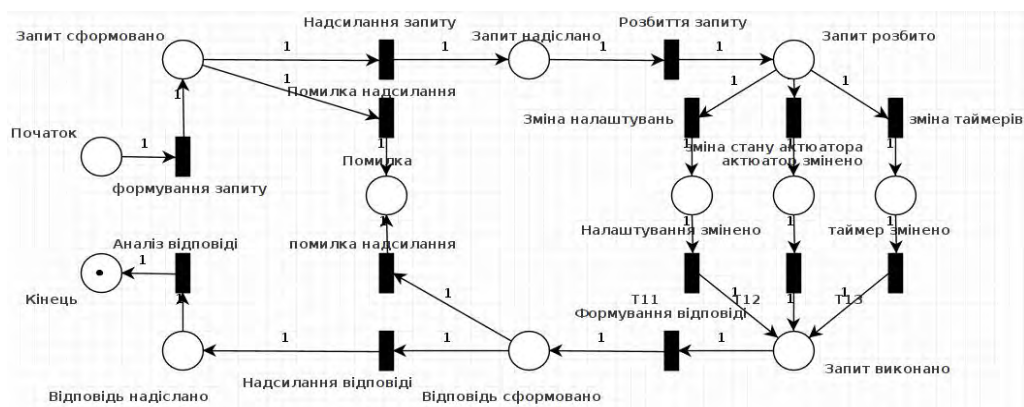


Рис. 7. Модель комунікації між клієнтом та сервером системи управління мікрокліматом мінітеплиці

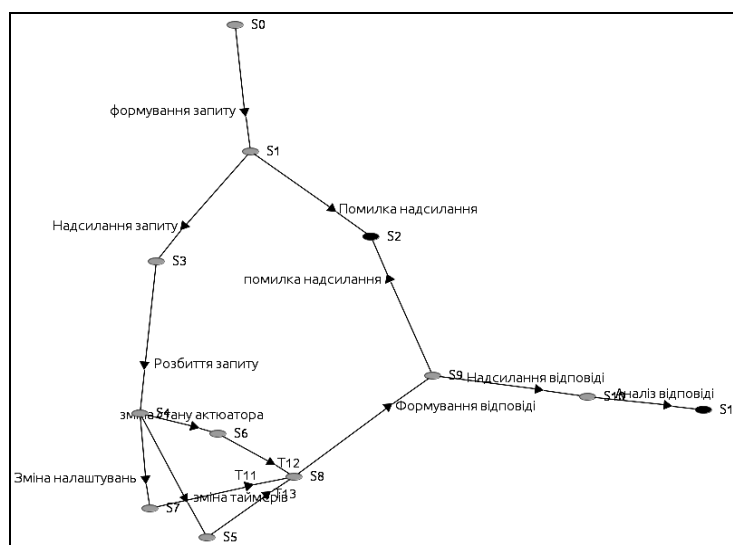


Рис. 8. Граф досяжності для комунікації між клієнтом та сервером для системи управління мікрокліматом мінітеплиці

Граф досяжності для комунікації між клієнтом та сервером для системи управління мікрокліматом мінітеплиці має два кінцеві стани. Перехід у перший кінцевий стан передбачає успішну комунікацію між клієнтом і сервером. Перехід у другий стан означає, що відбулася помилка у комунікації та запити не є виконані. Граф досяжності є скінченним без тупиків та усі стани є досяжними, модель працює коректно.

Висновки

1. Розроблено структуру системи управління мікрокліматом у мінітеплиці, яка має змінний склад обладнання, що забезпечує швидку адаптацію до вимог управління для конкретної мінітеплиці.

2. Запропоновано розробляти компоненти і синтезувати структуру системи управління мікрокліматом мінітеплиці здійснювати за комплексним підходом, який охоплює комунікаційні та інформаційно-управляючі системи та технології, сучасну елементну базу, програмне забезпечення з використанням ОС Android, засоби підтримки прийняття рішень і ґрунтується на таких принципах: системності, змінного складу обладнання, відкритості, модульності та використання комплексу базових проектних рішень.

3. Розроблено на основі мереж Петрі моделі роботи клієнтської та серверної частин та комутації між ними, які забезпечують дослідження динаміки роботи системи управління мікрокліматом у мінітеплиці. На основі мереж побудовано графи досяжності, які є скінченними без тупиків та усі стани є досяжними. Це означає, що моделі працюють коректно і можливий перехід на наступні етапи розроблення системи управління мікрокліматом у мінітеплиці.

1. Бондарева О. Б. *Устройство теплиц и парников: Конструкции устройств обогрева, вентиляции и полива в индивидуальных теплицах.* – М.: АСТ, 2006. – 96 с. 2. Добров В. В. *Парники и теплицы.* – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 256 с. 3. *Вимірювальні перетворювачі (сенсори).* – Підручник / Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець, В. О. Яцук, В. М. Ванько, Ю. В. Яцук. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2015. – 584 с. 4. Карвинен Теро, Карвинен Киммо, Валтокари Вилле. *Делаем сенсоры: проекты сенсорных устройств на базе Arduino и Raspberry Pi.* Пер. с англ. – М.: ООО “И. Д. Вильямс”, 2015. – 432 с. 5. Пупена О. М., Ельперін І. В., Луцька Н. М., Ладанюк А. П. *Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах: навч. посібник.* – К.: Ліра-К, 2011. – 552 с. 6. http://www.vashdom.ru/articles/research_2.htm. 7. <http://www.vira.ru/exp/reviews/umdom.html>. 8. *Інтелектуальні компоненти інтегрованих автоматизованих систем управління: монографія* / М. О. Медиковський, Р. О. Ткаченко, І. Г. Цмоць, Ю. В. Цимбал, А. В. Дорошенко, О. В. Скорохода. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 280 с. 9. Speetjens S. L. *Towards an adaptive model for greenhouse control* / S. L. Speetjens, J. D. Stigter, G. Van Straten // *Computers and Electronics in Agriculture.* – 2009, Vol. 67 (1–2). – P. 1–8. 10. Teslyuk T., Denysyuk P., Kernyskyi A., Teslyuk V. *Automated Control System for Arduino and Android Based Intelligent Greenhouse* // *Proceeding of the XIth International Conference “Perspective Technologies and Methods in MEMS Design”, MEMSTECH’2015, 2– 6 September 2015, Polyana, Lviv, Ukraine.* 2015. – P. 7–10. 11. Rodriguez F., Berenguel M., Arahal M. R. *Feedforward controllers for greenhouse climate control based on physical models* // *Proceedings of the European Control Conference ECC, 2001.* – P. 2158–2163. 12. Takakura T. *Simulation of biological and Environmental Processes* / T. Takakura, J. E. Son. – 2004, K- yushu University Press. – 139 p. 13. Teslyuk V. M., Beregovskiy V. V., Pukach A. I. *Development of smart house system model based on colored Petri nets* // *Proceedings of International Seminar / Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory, DIPED’2013, Lviv, Ukraine, September 2013, P. 205–208.* 14. Diaz M. *Petri Nets: Fundamental Models, Verification and Applications* / M. Diaz. – 2010, John Wiley & Sons. – 768 p. 15. Teslyuk V., Denysyuk P., Al Shawabkeh H. A. Y., Kernyskyi A. *Developing the information model of the reachability graph* // *Proc. of the 15-th International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory, DIPED’2010, Tbilisi, Sept. 27–30, 2010, P. 210–214.*