

Відгук

офіційного опонента, професора кафедри інтелектуальних систем прийняття рішень Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького Міністерства освіти і науки України, доктора технічних наук Голуба Сергія Васильовича на дисертаційну роботу Буравченка Костянтина Олеговича «Автоматизована система керування водопостачанням з використанням кусочно-неперервних функцій у сигналі керування», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування.

1. Актуальність теми дисертації

В Україні в умовах кризи енергоресурсів важливо шукати напрями енергозбереження. Одним з важливих напрямків енергозбереження є впровадження сучасних систем керування технологічними процесами. При цьому однією з найбільш енергоємних галузей промисловості є водопостачання.

Реалізація новітніх методів керування з використанням мікропроцесорної обчислювальної технікою є актуальною задачею.

При чому крім енергозберігаючих методів керування важливо підтримувати задані показники технологічного процесу (тиску води, швидкості потоку, зменшення перенавантаження трубопроводів). Для оцінки якості систем керування водопостачанням вводять квадратичний функціонал якості, що відображає задані вимоги до системи водопостачання. Мінімізація даного функціоналу є актуальною науково-технічною задачею. Споживання води у системі водопостачання має стохастичний характер, що в свою чергу потребує адекватної реакції. У різних режимах роботи мінімізація функціоналу якості системи керування водопостачанням потребує різних підходів та стратегій до керування.

Таким чином, є актуальною наукова задача розробки систем автоматизованого керування водопостачанням, що мінімізують функціонал якості системи керування та враховують вплив параметрів трубопроводів, а також нерівномірність споживання води, вирішенню якої присвячена дисертаційна робота Буравченка К.О. «Автоматизована система керування

водопостачанням з використанням кусочно-неперервних функцій у сигналі керування». Об'єктом дослідження є процес водопостачання.

Таким чином, **тема дисертації є актуальною.**

Варто відзначити, що дослідження в дисертаційній роботі виконувались у рамках тематичних планів науково-дослідних робіт Кіровоградського національного технічного університету за темою: «Автоматизована система керування водопостачанням» (реєстраційний №0116U001903).

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації

2.1. У першому розділі автором проведено аналіз технологічного процесу водопостачання. Виконано огляд систем керування водопостачанням та розглянуто функції системи водопостачання. Показано, що система водопостачання є розподіленою системою і вимагає створення складної системи керування. Головним завданням системи водопостачання є забезпечення водою споживачів у заданому обсязі з мінімальними витратами енергії на керування та стабілізацією показників технологічного процесу. Стабілізація показників технологічного процесу водопостачання досягається за допомогою керування насосними станціями. Досить детально розглянуто засоби керування насосними станціями та проведено їх аналіз. Проведений аналіз систем водопостачання дозволив визначити два відмінні режими роботи: режим переходу з одного стану у інший та режим стабілізації стану показників технологічного процесу водопостачання; в свою чергу виявлено, що перехідний режим виникає за рахунок стохастичного споживання води та підключення великих споживачів води. Для забезпечення енергоефективного керування системою водопостачання необхідно мінімізувати квадратичний функціонал якості керування. У загальному випадку критерій якості керування водопостачанням задається за допомогою функціоналу, який математично відображає економічні та інженерні вимоги. У перехідному режимі необхідно забезпечити мінімальний час повернення в усталений

режим з мінімальним перегулюванням. В усталеному режимі необхідно підтримувати заданий тиск з мінімальними витратами енергії.

Аналіз систем керування водопостачанням показав, що існуючі регулятори мають постійну структуру та не можуть врахувати зміну функціоналу якості керування, що характеризує мету керування, з часом. А також дані регулятори не можуть досягти екстремуму функціоналу якості керування в принципі так як не використовують в сигналі керування розривні функції. Напрямки дослідження обрано автором на підставі аналізу задачі створення системи автоматизованого керування водопостачанням, що забезпечує подачу води з заданим тиском та об'ємом, мінімізує заданий функціонал якості керування та враховує і ліквідує недоліки існуючих регуляторів.

Все це дозволило автору викреслити задачу дослідження, на розв'язок якої і спрямована мета дисертаційної роботи, а також зробити постановку часткових завдань дослідження.

Основні недоліки та зауваження по розділу 1 дисертації викладені у п. 7.

2.2. У другому розділі розглянуто методику побудови системи водопостачання та методи зміни робочої точки системи водопостачання. Відомо, що система водопостачання завжди працює у робочій точці. Робоча точка – це загальна точка, яка належить характеристиці гідравлічної системи та характеристиці насосу. Доведено, що система водопостачання завжди прямує до робочої точки і робота з іншими параметрами, поза межами робочої точки, протягом тривалого часу може привести до небажаних наслідків. Вибір робочої точки системи водопостачання виконується на основі гідравлічних розрахунків згідно державних будівельних норм. Автором розглянуто, що для задоволення потреб абонентів підбирають насос, подача якого задовольняє інженерним вимогам. Максимальна подача насосу повинна бути не менша ніж пікове значення потреби користувачів.

Подача розраховується виходячи з конкретної системи, її типу, кількості користувачів, витрат на протипожежні заходи та ін. У дисертації виконано висновок, що однією з головних задач системи керування водопостачанням є стабілізація робочої точки, що дозволяє забезпечити максимальний коефіцієнт корисної дії складових насосних станцій та ефективно використовувати ресурси. Виявлено, що аналіз систем керування водопостачанням свердловин показав, що найбільш енергетично ефективним методом керування робочою точкою є керування одночасно напругою та частотою статора електричного двигуна за допомогою перетворювача частоти. Показано, що існуючі методи керування електричними двигунами дозволяють у широкому діапазоні змінювати швидкість обертів насоса, тим самим стабілізуючи задану робочу точку.

Так як визначено, що система водопостачання працює у двох відмінних режимах, то для забезпечення стійкої та ефективної роботи системи запропоновано використовувати регулятор зі змінною структурою та параметрами. Однією із задач синтезу регулятора водопостачання зі змінною структурою є вибір моментів перемикання між регулятором перехідного режиму та регулятором режиму стабілізації стану. Це завдання в запропонованій блок-схемі виконує блок перемикання регуляторів.

Показано, що для вирішення завдання побудови системи керування водопостачанням та забезпечення мінімізації функціоналу якості керування, що враховує вплив трубопроводу на динаміку процесу водопостачання та має змінну структуру та параметри регулятора необхідне проведення теоретичних та експериментальних досліджень.

Основні недоліки та зауваження по розділу 2 дисертації викладені у п. 7.

2.3. У третьому розділі присвячено теоретичним дослідженням методів та алгоритмам керування режимами роботи системи водопостачання. Враховуючи те, що для забезпечення мінімізації функціоналу якості керування системою водопостачання необхідно використати регулятор зі

змінною структурою та параметрами, запропоновано використати апарат теорії оптимального керування. Для забезпечення оптимальної роботи системи водопостачання з точки зору швидкодії у режимі переходу удосконалено метод максимуму Понтрягіна. Використання методу максимуму дає можливість накладати обмеження на величину сигналу керування для забезпечення роботи системи у реальних умовах, а також на координати об'єкту – тиск, швидкість потоку води, що тим самим дозволить зменшити навантаження на мережу трубопроводів та ліквідувати можливість гідравлічних ударів. Автором показано, що для мінімізації часу перехідного режиму необхідно застосовувати кусочно-неперервний сигнал керування. Головною проблемою, яка виникає при побудові оптимальної системи керування на основі принципу максимуму є вибір значення початкових умов сполученої системи рівнянь. У роботі наведено алгоритм знаходження оптимальної траєкторії руху системи водопостачання без використання сполученої системи рівнянь.

Для практичних задач побудови систем керування водопостачанням розроблений математичний апарат принципу максимуму є не зовсім прийнятним так як викликає ряд складностей при побудові системи керування у реальному часі на мікроконтролері. Складність обчислень вимагає шукати інші способи побудови оптимального сигналу керування. Автором запропоновано реалізувати автомат, який би в залежності від вектору координат системи водопостачання, а також на основі функції Гамільтона визначав оптимальний момент перемикання сигналу керування. Проведені дослідження показують, що у реальних умовах інформація про тиск у системі водопостачання та динаміка його зміни дозволяє побудувати функцію Гамільтона та на її основі забезпечити оптимальний за швидкістю план роботи у перехідному режимі не виконуючи складних чисельних обчислень, а отримувати зміну з знаку керування $u(t)$ автоматично.

Задачу мінімізації функціоналу якості в усталеному режимі системи водопостачання вирішено на засадах теорії оптимальної стабілізації та аналітичного конструювання регуляторів.

Основні недоліки та зауваження по розділу 3 дисертації викладені у п. 7.

2.4. Четвертий розділ присвячено експериментальним дослідженням, моделюванню та реалізації системи керування водопостачанням. Підтверджено доцільність використання регулятора зі змінною структурою та параметрами. Показано, що використання розривних функцій у сигналі керування дозволяє досягти екстремуму функціоналу якості на відміну від використання тільки неперервних. Хоча класичні методи побудови регуляторів дозволяють досягти заданого перехідного процесу, але при цьому збільшується і час керування. Аналіз функціоналу якості показує, що застосування оптимального регулятора має значні переваги перед існуючими методами керування водопостачанням. Створено математичну модель системи водопостачання з регулятором зі змінною структурою та параметрами, яка використовує тільки неперервні функції у сигналі керування. Для доведення доцільності використання кусочно-неперервного сигналу керування створено математичну модель системи водопостачання зі змінною структурою та параметрами регулятора. В такій системі регулятор перехідного режиму забезпечує мінімальний час переходу у режим стабілізації стану, при мінімальній величині перерегулювання. Регулятор усталеного режиму спрямований на стабілізацію тиску у трубопроводі та мінімальні витрати енергії на керування.

Основні недоліки та зауваження по розділу 4 дисертації викладені у п. 7.

2.5. У п'ятому розділі проведено узагальнення результатів теоретичних та практичних досліджень. На основі результатів створено програмно-апаратний комплекс на базі сучасних засобів мікропроцесорної, що включає в себе засоби збору інформації про стан системи водопостачання, модулі передачі даних, програмне забезпечення для обробки, зберігання та візуалізації даних у реальному часі. Це обумовлено тим, що практична реалізація системи керування водопостачанням не можлива без адекватної інформації в реальному часі про тиск у контрольних точках споживання стану двигунів, напруги мережі та ін. В результаті

проведених теоретичних та експериментальних досліджень створено регулятор зі змінною структурою та параметрами, який забезпечує мінімізацію функціоналу енерговитрат у перехідному та в усталеному режимі системи водопостачання. Для реалізації такого регулятора запропоновано програмно-апаратний комплекс. Комплекс входить у склад системи керування водопостачанням та виконує наступні функції:

- збір інформації з перетворювача тиску;
- розрахунок сигналу керування по заданому закону керування;
- видачу керуючого сигналу задачі для частотного перетворювача.

Для проведення експериментальних досліджень процесу водопостачання використано імітаційний стенд, що являє собою натурну зменшену модель системи водопостачання. Таким чином за допомогою імітаційного стенду та створеного пристрою керування доведено можливість реалізації алгоритму мінімізації функціоналу енерговитрат керування у системі водопостачання.

Таким чином, Буравченком К.О. запропоновано автоматизовану систему керування водопостачанням з використанням кусочно-неперервних функцій у сигналі керування, мета якої полягає у підвищенні якості роботи системи водопостачання за допомогою впровадження системи керування зі змінною структурою, що використовує кусочно-неперервний сигнал керування, момент перемикання якого визначається на основі відхилення значення функції Гамільтона від максимуму. З чого випливає висновок про розв'язок поставленої наукової задачі дисертаційної роботи та досягнення мети досліджень.

3. Достовірність отриманих результатів

Достовірність результатів, які отримав автор дисертаційної роботи, підтверджується збіжністю отриманих результатів експериментальних досліджень з теоретичними даними за виведеними аналітичними співвідношеннями. Достовірність обґрунтовується несуперечністю отриманих результатів основним положенням теорії оптимального керування, теорії автоматичного керування, теорії диференціальних рівнянь, імітаційного моделювання, а також їх ясним фізичним трактуванням і

збіжністю з основними положеннями і результатами існуючих досліджень, наведеним у літературі та відомих наукових працях в області проектування та впровадження автоматизованих систем керування водопостачанням. Коректність і достовірність теоретичних та практичних результатів дисертаційної роботи також підтверджується розробкою і тестуванням автоматизованої системи керування водопостачанням в містах Мала Виска, Узин та Поліському районі.

4. Новизна отриманих результатів

На мій погляд, у дисертаційній роботі «Автоматизована система керування водопостачанням з використанням кусочно-неперервних функцій у сигналі керування» Буравченком К.О. отримано нові науково обґрунтовані результати. Зокрема:

4.1. Вперше створено систему керування водопостачанням, яка передбачає зміну структури і параметрів регулятора і забезпечує підвищення якості керування.

4.2. Вперше запропоновано умову зміни структури і параметрів регулятора у системі водопостачання, яка ґрунтується на залежності тиску у трубопроводі від споживання води і забезпечує підтримку тиску води на заданому рівні.

4.3. Отримав подальший розвиток метод знаходження оптимальних режимів функціонування системи водопостачання на основі використання кусочно-неперервного сигналу керування і визначення моменту перемикання за допомогою значення відхилення функції Гамільтона від максимуму.

4.4. Отримав подальший розвиток метод розрахунку коефіцієнта підсилення системи керування в усталеному режимі системи водопостачання, що забезпечує мінімізацію функціоналу якості системи керування.

5. Завершеність, стиль викладення, публікації

5.1. Аналіз сукупності наукових результатів і положень, характеристики яких наведено в пп. 2-4, дозволяє зробити висновок про їх наукову новизну і підтверджує вагомий особистий внесок Буравченка К.О. у науку, в першу чергу в розвиток галузі автоматизації процесів керування. У дисертаційній роботі отримано теоретичне узагальнення і нове рішення важливого науково-

технічного завдання, що полягає у підвищенні якості роботи системи водопостачання за допомогою впровадження системи керування зі змінною структурою, що використовує кусочно-неперервний сигнал керування, момент перемикання якого визначається на основі відхилення значення функції Гамільтона від максимуму.

5.2. Дисертація є завершеною науковою роботою, виконаною і оформленою згідно вимог "Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника".

5.3. Дисертаційна робота написана зрозуміло і грамотно, на високому стилістичному рівні, науково-технічна термінологія використовується коректно, стиль викладення результатів теоретичних і практичних досліджень, нових наукових положень і висновків забезпечує доступність їх сприйняття та використання, структура роботи логічна.

5.4. Основні результати досліджень опубліковані досить повно: подано у 12 опублікованих працях, з яких 5 статей у провідних фахових виданнях України та закордонних періодичних виданнях, 6 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій та 1 стаття, що не є фаховою, з них 6 статей включені до наукометричних баз. Аналіз публікацій результатів дисертаційного дослідження, які винесені на захист, підтверджує повноту їх опублікування, в тому числі у виданнях, які входять до бібліографічних та міжнародних наукометричних баз.

5.5. Структура і зміст автореферату повністю відповідають тексту дисертації.

6. Практична значимість

6.1 Визначено з умов стійкості вплив параметрів трубопроводів на процес керування системою водопостачання, сформовано вимоги до проектування.

6.2 Розроблена математична модель системи водопостачання зі змінною структурою регулятора, а також з використанням розривних функцій у сигналі керування у перехідному режимі і змінного коефіцієнту підсилення в усталеному режимі.

6.3 Запропоновано систему керування зі змінною структурою регулятора для системи водопостачання, що реалізує автоматичне перемикання регуляторів на основі вимірювання значення тиску на вході у трубопровід.

6.4 Розроблено програмне забезпечення автоматизованої системи керування з використанням розривних функцій у сигналі керування для забезпечення мінімального часу керування від поточного значення тиску до заданого.

6.5 Впроваджено результати наукових досліджень у науково-дослідна робота “Автоматизована система керування водопостачанням з артезіанських свердловин” (№ ДР №0116U001903) - підтверджено звітом з НДР, дисертант Буравченко К.О. – виконавець НДР, керівник НДР – проф. Сидоренко В.В.; впроваджено систему керування водопостачанням з природних джерел на КП УМР “Узинводоканал” (акт від 07.06.2016 р.); впроваджено систему керування процесом водопостачання з артезіанських свердловин на КП “Поліське управління водного господарства” (акт від 10.09.2016 р.); впроваджено систему керування водопостачанням з природних джерел на ТОВ “Протеїн-продакшн” (акт від 08.09.2015 р.).

Методи, запропоновані в роботі, є універсальними і їх використання можливе і в аналогічних системах.

7. Недоліки та зауваження

7.1. Недоліки та зауваження до розділу 1 дисертації

1. Не досить обґрунтовано обрано контрольну точку тиску (стор. 15-16). Бажано було б більш детально розглянути принципу вибору контрольної точки тиску у додатках.

2. У дисертації розглянуто системи керування, які використовуються у сучасних системах водопостачання об'єктів сільського та міського призначення (стор. 18-23). Тому в об'єкті дослідження бажано було б зазначити, що процес водопостачання призначення з артезіанських свердловин розглядається для сільських та міських об'єктів.

3. Розглянуто систему керування фірми Grundfoss (стор. 29-30) і далі у дисертації немає посилання на неї.

4. У дисертації наведено функціонал якості (стор. 33), який дозволяє оцінити роботу системи водопостачання. Бажано було б навести інші критерії оцінки системи керування водопостачанням крім введеного функціоналу.

5. У дисертації подано посилання на літературу, в якій розглянуто вплив факторів які впливають на стійкість системи водопостачання. Вважаю, що їх результати бажано подати у аналізі більш повно або відобразити в додатках.

7.2. Недоліки та зауваження до розділу 2 дисертації

1. На рисунку 2.1 наведено позначення R^I , R^{II} , які далі по тексту не розшифровуються. Варто було б розшифрувати дані позначення у підписі рисунку.

2. У дисертаційній роботі розглянуто частотно-регульовані насосні агрегати (стор. 42-44). Хоча не всі системи водопостачання обладнані такими

приводами. Доцільно для порівняння було б більш детально розглянути каскадне керування групою насосів, що дасть можливість оцінити та порівняти два типи регулювання тиском.

3. У роботі наведено структурну схему замкнутої системи керування (рис. 2.4), яка в подальших дослідженнях не використовується. Можливо варто більш детально пояснити, чому було прийнято рішення перейти від розгляду системи керування у часовій області методами теорії автоматичного регулювання у розгляд у фазовому просторі методами теорії оптимального керування уже в другому розділі.

4. Для дослідження стійкості системи керування водопостачанням використано частотний критерій стійкості Михайлова, але у роботі досить коротко показано вплив параметрів трубопроводу на стійкість. Можливо необхідно було більше уваги приділити дослідженню стійкості таких систем з різними конфігураціями трубопроводів.

7.3. Недоліки та зауваження до розділу 3 дисертації

1. У дисертаційній роботі можливо було б більш детально розшифрувати що є вектором вихідних координат X , що є вектором керування U (стор. 68) для реальної системи водопостачання.

2. На сторінці 68 використовується поняття “оптимальний перехідний процес по швидкодії”, хоча із тексту дисертації напевно краще застосувати термін “перехідний режим”. Так як мінімізація часу керування виконується не тільки для перехідного процесу, а і всього перехідного режиму.

3. У роботі виконано посилання на роботи, яких запропоновано ітераційний алгоритм пошуку початкових умов для сполученої системи Ψ_0 запропонованих Нейштадтом та Ітаном, які можливо було б краще описати більш детально.

4. Перевірку системи керування водопостачанням в усталеному режимі на керованість та спостережність доцільно було б описати більш детально у пункті 3.6.

7.4. Недоліки та зауваження до розділу 4 дисертації

1. Із тексту дисертації не зрозуміло за яким принципом обрані початкові умови при моделюванні системи керування водопостачанням (стор. 105-107).

2. У дисертаційній роботі варто було б більш детально розкрити яким чином було обрано коефіцієнти матриці Q та R із функціоналу якості (1.3) для запобігання гідравлічного удару у перехідному режимі.

3. На рисунку 4.15 варто було відобразити згідно задач дисертаційної роботи, що використано регулятор зі змінною структурою, також зауважити використання кусочно-неперервного сигналу керування.

7.5. Недоліки та зауваження до розділу 5 дисертації

1. Показано використання GSM мережі для віддаленого збору інформації з датчиків (стор. 114), хоча, напевно, варто було б забезпечити можливість використання більш сучасної мережі 3G .

2. У роботі запропоновано систему захисту даних від несанкціонованого доступу шляхом шифрування з використанням протоколу SSH. Але не вказано достатньо літературних джерел, де проведено аналіз необхідності захисту такої інформації.

3. Структурна схема 5.8 не достатньо повно архітектуру розробленого пристрою керування, що реалізує практичне значення одержаних результатів. Можливо варто було б навести технічну специфікацію даного пристрою, умови роботи, вартість компонентів.

У тексті дисертаційної роботи наявна незначна кількість пунктуаційних, синтаксичних помилок, а також технічних помилок при наборі тексту.

Втім, вказані недоліки та зауваження **не впливають** на загальний позитивний висновок про дисертаційну роботу.

8. Загальні висновки

8.1. Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою, яка містить теоретичне узагальнення та нове рішення актуального науково-технічного завдання, важливого для розвитку методів і технологій проектування систем керування водопостачанням.

8.2. Буравченко Костянтин Олегович отримав нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності складають структуру системи керування водопостачанням, яка забезпечує підвищення якості роботи системи водопостачанням за допомогою впровадження системи керування зі змінною структурою, що використовує кусочно-неперервні функції, а також на основі екстремуму функції Гамільтона обирає момент перемикання сигналу керування.

8.3. Зміст дисертації та отримані результати дослідження цілком відповідають паспорту спеціальності 05.13.07 – автоматизація процесів керування.

8.4. Дисертаційна робота Буравченка К.О. «Автоматизована система керування водопостачанням з використанням кусочно-неперервних функцій у сигналі керування» має певну наукову новизну і практичну значимість в області автоматизації процесів керування, відповідає вимогам до кандидатських дисертацій, встановлених «Порядком присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», а її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування.

Офіційний опонент,
професор кафедри інтелектуальних систем
прийняття рішень Черкаського
національного університету імені Богдана
Хмельницького, доктор технічних наук,
професор



С.В. Голуб

Підпис професора кафедри інтелектуальних
систем прийняття рішень, доктора
технічних наук, професора Голуба Сергія
Васильовича засвідчую:

Вчений секретар Черкаського
національного університету імені Богдана
Хмельницького, кандидат економічних
наук, доцент




Н.О. Андрусяк