

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

МАТВІЄНКО ОЛЬГА ІВАНІВНА

підпис

УДК 519.85: 628.1

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ
РОБОТИ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Дисертація виконана у Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Тевяшев Андрій Дмитрович,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
завідувач кафедри прикладної математики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Данилов Валерій Якович,
Навчально-науковий комплекс «Інститут прикладного
системного аналізу» НТУУ «Київський політехнічний
інститут», професор кафедри математичних методів
системного аналізу;

доктор технічних наук, професор
Удовенко Сергій Григорович,
Харківський національний економічний університет
ім. С. Кузнеця, завідувач кафедри інформатики та
комп'ютерної техніки.

Захист відбудеться «28» лютого 2017 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.02 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: Україна, 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

Автореферат розісланий «26» січня 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

підпис

Л. В. Колесник

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з актуальних проблем систем водопостачання є проблема непродуктивних втрат питної води в результаті аварій, розкрадань, недообліку, технологічних витрат на промивку водопровідних мереж, втрат води за рахунок дефектів трубопроводу, що не виявили та не усунули. Такі втрати води (витоки) для деяких міст України складають до 50% обсягу води, що подається, та ведуть до перевитрат електроенергії, реагентів, витрачених на підготовку питної води.

Ще одна актуальна проблема полягає в тому, що система водопостачання є однією з найбільш енергоємних у системі житлово-комунального господарства. Безперервне зростання тарифів на електроенергію і введення тризонного тарифу створили необхідні умови для розробки та впровадження ресурсо- й енергозберігаючих технологій управління системою водопостачання, оснований на результатах математичного моделювання та оптимізації режимів роботи систем водопостачання.

Задачі оптимізації режимів роботи систем водопостачання вирішувалися Ф. А. Шевелевим, М. М. Андріяшевим, А. Г. Євдокимовим, А. Д. Тевяшевим, В. А. Петросовим, М. С. Steinbach, В. Я. Хасилевим, А. П. Меренковим, М. М. Новицьким та іншими дослідниками. У роботах В. Я. Кареліна, О. В. Мінаєва, П. В. Лобачова, А. Д. Тевяшева, Б. С. Лезнова, Р. В. Чупіна, Е. С. Мелехова, I. Pulido-Calvo, A. Ruuskanen, M. C. Steinbach, J. Burgschweiger, V. Hart розглядаються проблеми ресурсо- та енергозбереження й оптимізації режимів роботи насосної станції. Однак, оптимізація систем водопостачання здійснювалася для однозонних тарифів на електроенергію на базі детермінованих математичних моделей, які не враховують стохастичний характер об'єкта управління та зовнішнього середовища й адекватно описують об'єкт управління для конкретних граничних умов і фіксованого моменту часу t .

При цьому отримані оптимальні розв'язки виявлялися вкрай нестійкими і при зміні граничних умов не тільки переставали бути оптимальними, а й могли вийти з області допустимих режимів. Такі розв'язки виявилися неприйнятними на практиці. Тому науково-технічним завданням дисертаційної роботи є розробка нових математичних моделей, які адекватно описують фактичні режими роботи системи водопостачання не тільки у конкретний момент часу, а на всьому інтервалі управління, їх використання для математичного моделювання та оптимізації фактичних режимів роботи систем водопостачання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі прикладної математики Харківського національного університету радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України відповідно до планів науково-дослідних робіт держбюджетної теми № 293 «Розробка методології та математичних моделей соціально-економічних

систем при реалізації концепції їх сталого розвитку» (№ ДР 0115U001522), у виконанні якої автор брав безпосередню участь на посаді наукового співробітника. Крім того, автор є відповідальним виконавцем господарського договору №16-3 «Оцінка потенціалу ресурсозбереження водоводів комплексу водопідготовки «Донець» відокремленого підрозділу комунального підприємства «Харківводоканал» (265/3-НР/16 № ДР 0116U007035).

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка і дослідження стохастичних моделей та обчислювальних методів оптимізації квазістаціонарних режимів роботи системи водопостачання.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- розробити стохастичну модель квазістаціонарних режимів роботи системи подачі та розподілу води (підсистеми системи водопостачання), яка враховує стохастичну невизначеність як об'єкта управління, так і навколишнього середовища, й адекватно описує процеси транспорту та розподілу води в системі водопостачання на заданому інтервалі часу;

- використати розроблену стохастичну модель квазістаціонарних режимів роботи системи подачі та розподілу води для математичної постановки задачі оптимізації режимів роботи водопровідної розподільчої мережі на заданому інтервалі часу у вигляді двох взаємопов'язаних задач: задачі мінімізації математичного сподівання сумарних надлишкових напорів у вузлах водопровідної мережі (зниження непродуктивних втрат питної води, пов'язаних із витокami, що не виявили та не усунули); задачі мінімізації математичного сподівання сумарних витрат електроенергії, витраченої усіма насосними агрегатами на всіх насосних станціях, що працюють у системі подачі та розподілу води;

- розробити метод розв'язання задачі мінімізації математичного сподівання сумарних надлишкових напорів у вузлах водопровідної мережі як для вектора управління, що включає стандартний набір режимних параметрів (напір і витрати на виходах насосних станцій), так і для розширеного вектора управління, що включає, крім режимних параметрів, параметри, що визначають оптимальну (зоновану) структуру системи подачі та розподілу води (задача зонування водопровідної мережі);

- розробити чисельні методи розв'язання задачі оптимізації квазістаціонарних режимів роботи водопровідної розподільчої мережі на основі модифікованого методу Нелдера-Міда, задачі зонування водопровідної мережі на основі модифікованого методу пошуку в ширину;

- використати розроблену стохастичну модель квазістаціонарних режимів роботи системи подачі та розподілу води для постановки задачі оптимального стохастичного управління режимами роботи магістрального водоводу при тризонному тарифі на електроенергію;

- розробити чисельний метод розв'язання задачі оптимального стохастичного управління режимами роботи магістрального водоводу при тризонному тарифі на електроенергію на основі модифікованого методу гілок і меж;

- здійснити програмну реалізацію розроблених математичних моделей і методів, провести математичне моделювання фактичних і отриманих оптимальних режимів роботи системи подачі та розподілу води, здійснити чисельний аналіз стійкості й економічної ефективності отриманих результатів.

Об'єкт дослідження – стохастичні процеси квазістаціонарних режимів роботи систем водопостачання.

Предмет дослідження – стохастичні моделі та обчислювальні методи оптимізації квазістаціонарних режимів роботи систем водопостачання.

Методи дослідження: У роботі використовувалися методи математичного моделювання нелінійних стохастичних систем для побудови стохастичної моделі квазістаціонарних режимів роботи систем подачі та розподілу води; оптимального стохастичного управління, теорії ймовірностей, математичної статистики і випадкових процесів для розв'язання задач оптимізації.

Наукова новизна отриманих результатів. При вирішенні поставлених задач у дисертаційній роботі були отримані такі нові наукові результати:

- вперше розроблена математична модель квазістаціонарних режимів роботи системи подачі та розподілу води, що враховує стохастичний характер об'єкта управління і навколишнього середовища й адекватно описує процеси транспорту та розподілу води в системі водопостачання на заданому інтервалі часу;

- вперше розроблено математичну модель задачі оптимального стохастичного управління режимами роботи магістрального водоводу з імовірнісними та екстремальними обмеженнями на фазові змінні, розв'язання якої дозволяє отримати мінімум математичного сподівання вартості витрат на електроенергію при тризонному тарифі на інтервалі управління;

- вперше розроблений наближений метод розв'язання задачі оптимального стохастичного управління режимами роботи магістрального водоводу, оснований на побудові її детермінованого еквіваленту та використанні методу гілок і меж;

- отримав подальший розвиток метод оптимального стохастичного управління розвитком систем подачі та розподілу води шляхом зонування водопровідних розподільчих мереж для міст із складним рельєфом місцевості і різною поверховістю забудови;

- отримала подальший розвиток математична модель задачі оптимізації режимів роботи насосної станції на заданому інтервалі часу, розв'язання якої забезпечує мінімум математичного сподівання затрат електроенергії та стійкість розв'язку до прогнозованого рівня стохастичних збурень.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена в

дисертаційній роботі стохастична модель квазістаціонарних режимів роботи систем подачі та розподілу води дозволила врахувати стохастичний характер об'єкта управління й оточуючого середовища, адекватно описує фактичні режими роботи системи водопостачання на заданому інтервалі часу, може використовуватися як базова модель для постановки та розв'язання задач оптимального стохастичного управління розвитком і функціонуванням систем подачі та розподілу води. У дисертаційній роботі розроблені наближені методи розв'язання цих задач.

Як показали дослідження, в результаті зонування і використання регуляторів тиску для тестового прикладу сума квадратів надлишкових напорів у вузлах водопровідної мережі для обраної зони зменшилася на 73%. У результаті розв'язання задачі оптимізації режимів роботи насосної станції споживання електроенергії насосною станцією скоротилося на 11%. Економічний ефект при переході від існуючої системи управління режимами роботи в системах подачі та розподілу води до системи оптимального стохастичного управління з використанням тризонного тарифу на електроенергію для одного з найбільших магістральних водоводів України склав близько 6,5%, що складає 715 472 грн. в місяць економії. Для цього магістрального водоводу були розроблені кілька варіантів модернізації його обладнання та структури. Один із найбільш перспективних варіантів модернізації дозволяє заощадити 1 453 610 грн. за тиждень, 5 814 440 грн. за місяць.

Результати дисертаційних досліджень. Розроблені математичні моделі та методи програмно реалізовані в середовищі C# у вигляді «Інформаційно-аналітичної системи моделювання та оптимізації режимів роботи систем водопостачання», що включає такі програмні модулі: графічний редактор технологічних схем систем водопостачання; розрахункові модулі моделювання та оптимізації квазістаціонарних режимів роботи систем водопостачання. Результати дисертаційної роботи включені:

– до навчального процесу в Харківському національному університеті радіоелектроніки в курсовому та дипломному проектуванні, в дисциплінах «Оптимальне стохастичне керування системами енергетики» та «Стохастичне програмування» при проведенні лабораторних робіт і практичних занять;

– у держбюджетну науково-дослідну роботу на тему № 293 «Розробка методології та математичних моделей соціально-економічних систем при реалізації концепції їх сталого розвитку» (№ ДР 0115U001522);

– у госпдоговірну науково-дослідну роботу «Оцінка потенціалу ресурсозбереження водоводів комплексу водопідготовки «Донець» окремого підрозділу комунального підприємства «Харківводоканал» (договір № 16-3), (265/3-НР/16 № ДР 0116U007035).

Особистий внесок здобувача. Матеріали, які складають основу дисертаційної роботи, опубліковані в наукових працях [1 – 17]. Усі аналітичні

обчислення та численні експерименти виконані автором особисто. Здобувач брав безпосередню участь у аналізі та інтерпретації отриманих результатів, формулюванні основних наукових висновків, написанні статей.

У роботах, опублікованих у співавторстві, автору дисертаційної роботи належить: [1] – розробка математичної моделі квазістаціонарних режимів роботи водопровідної розподільчої мережі; [2] – розробка математичної моделі квазістаціонарних режимів роботи насосної станції; подальший розвиток математичної моделі задачі оптимізації режимів роботи насосної станції, розв'язання якої забезпечує мінімум математичного сподівання затрат електроенергії та стійкість розв'язку до прогнозованого рівня стохастичних збурень; [3] – оцінка ефективності методу розв'язання задачі оптимізації режимів роботи насосної станції; [4] – подальший розвиток методу оптимального стохастичного управління розвитком систем подачі та розподілу води шляхом зонування водопровідних розподільчих мереж; оцінка його ефективності; [5] – розробка математичної моделі квазістаціонарних режимів роботи магістрального водоводу; [6] – розробка математичної моделі задачі оптимального стохастичного управління режимами роботи каналізаційної насосної станції, розробка методу її розв'язання; [7] – розробка наближеного методу розв'язання задачі оптимального стохастичного управління режимами роботи магістрального водоводу, основаного на побудові її детермінованого еквіваленту та використанні методу гілок і меж; [8] – оцінка ефективності методу розв'язання задачі оптимального стохастичного управління режимами роботи магістрального водоводу.

Апробація результатів дисертації. Основні результати проведених досліджень доповідалися й обговорювалися на наступних конференціях і семінарах: IV міжнародна науково-технічна конференція «Вода. Екологія. Суспільство» (Харків, ХНУМГ ім. Бекетова, 2014 р.); 3-тя міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні системи та технології» (Харків, ХНУРЕ, 2014 р.); 4-я міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні системи та технології» (Харків, ХНУРЕ, 2015 р.); 18-й міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті» (Харків, ХНУРЕ, 2014 р.); VI Всеукраїнський науково-практичний семінар «Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур» (Харків, ХНУБА, 2014 р.); XII конференція з фізики високих енергій, ядерної фізики і прискорювачів (Харків, ННЦ ХФТІ, 2014 р.); GISforum (Харків, ХНУ ім. Каразіна, 2015 р.); 5-а міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні системи та технології» (Коблево, ХНУРЕ, 2016 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 17-ти наукових публікаціях, в їх числі: 8 статей, 5 з яких опубліковані у фахових виданнях України [1-3, 7, 8], 3 опубліковані в іноземних виданнях [4-6], 9 тез доповідей на наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу,

чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 6 додатків. Загальний обсяг роботи становить 209 сторінки, з них: додатки на 50 сторінках; перелік скорочень на 1 сторінці; список використаних джерел на 20 сторінках, який включає 156 найменувань. Дисертація містить 26 рисунків і 9 таблиць (та 30 рисунків і 28 таблиць у додатках).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито основний зміст та загальний стан проблеми та окремих задач оптимізації роботи систем водопостачання, обґрунтовано актуальність теми дослідження, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами і темами, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження, розкрито наукову новизну та практичне значення отриманих у дисертаційній роботі результатів.

У **першому розділі** дисертаційної роботи наведено системний аналіз проблеми ресурсо- та енергозбереження в одній із найбільш складних підсистем системи водопостачання – системі подачі та розподілу води. Показано, що одним з основних напрямків вирішення цієї проблеми є розробка та впровадження методів математичного моделювання та оптимізації фактичних режимів роботи систем водопостачання. Наведена постановка задач дослідження.

Основні результати цього розділу опубліковані в роботах [1, 10-12].

Другий розділ дисертаційної роботи присвячений розробці стохастичної моделі квазістаціонарних режимів роботи системи подачі та розподілу води, яка більш адекватно, в порівнянні з усіма раніше розробленими моделями, описує фактичні режими роботи системи подачі та розподілу води на заданому інтервалі часу $[0, T]$.

У дисертаційній роботі використовується поняття квазістаціонарного режиму роботи системи подачі та розподілу води як кінцевої послідовності взаємопов'язаних стаціонарних режимів, параметри яких змінюються стрибками скінченне число разів на заданому інтервалі часу $[0, T]$. Для побудови стохастичної моделі квазістаціонарних режимів роботи системи подачі та розподілу води весь інтервал управління розбивається на K підінтервалів $[k, k + 1]$ ($k=0, 1, \dots, 23$).

Для представлення структури системи подачі та розподілу води у вигляді орієнтованого графа $G(V, E)$, де V – множина вершин, E – множина дуг ($e = \text{Card}(E)$, $v = \text{Card}(V)$), реальна система подачі та розподілу води додається нульовою вершиною і фіктивними хордами, що з'єднують нульову вершину з усіма входами та виходами системи.

Наведено стохастичні моделі всіх технологічних елементів системи подачі та розподілу води (насосних агрегатів, ділянок трубопроводу, резервуарів чистої води, регулюючих засувки), та загальна стохастична модель квазістаціонарних

режимів роботи системи подачі та розподілу води із скільки завгодно складною топологічною структурою водопровідної розподільчої мережі. Принциповою особливістю цієї моделі є те, що граничні умови задаються у вигляді математичних сподівань та дисперсій незалежних змінних, а результати розрахунків також представлені у вигляді математичних сподівань та дисперсій залежних змінних. На базі розробленої моделі сформульовані та розв'язані задачі моделювання та оптимізації режимів роботи систем подачі та розподілу води. Для моделювання та оптимізації квазістаціонарних режимів роботи магістрального водоводу на заданому підінтервалі часу $[k, k+1]$ ця модель приймає вигляд:

$$M_{\omega} \left(h_r(q_r(\omega, k)) + \sum_{i \in L} b_{1ri} h_{NAi}(q_i(\omega, k)) + \sum_{i \in R} b_{1ri} h_{RZi}(q_i(\omega, k)) + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} h_i(q_i(\omega, k)) \right) = 0, \quad (r = v, \dots, v + \eta_2 - 1), \quad (1)$$

$$M_{\omega} \left(h_r^c(q_r(\omega, k)) - H_1(\omega, k) + \sum_{i \in L} b_{1ri} h_{NAi}(q_i(\omega, k)) + \sum_{i \in R} b_{1ri} h_{RZi}(q_i(\omega, k)) + \sum_{i \in M_1} (b_{1ri} h_i(q_i(\omega, k)) + h_i^s) \right) = 0, \quad (r = v + \eta_2, \dots, v + \eta_2 + \xi_1 - 1), \quad (2)$$

$$M_{\omega} \left(h_r(q_r(\omega, k)) + h_r^s - H_z(\omega, k) + H_1(\omega, k) + \sum_{i \in L} b_{1ri} h_{NAi}(q_i(\omega, k)) + \sum_{i \in R} b_{1ri} h_{RZi}(q_i(\omega, k)) + \sum_{i \in M_1} (b_{1ri} h_i(q_i(\omega, k)) + h_i^s) \right) = 0, \quad (r = v + \eta_2 + \xi_1, \dots, e; \quad z = 1, \dots, Z), \quad (3)$$

$$M_{\omega} \left(\sum_{r=v}^{v+\eta_2-1} b_{1ri} q_r(\omega, k) + \sum_{r=v+\eta_2}^e b_{1ri} q_r(\omega, k) - q_i(\omega, k) \right) = 0, \quad (i = 1, \dots, v-1), \quad (4)$$

$$P(q_i(\omega, k) > 0) \geq \alpha, \quad \alpha \cong 1, \quad i \in L. \quad (5)$$

$$P(H_z^{\min} \leq H_z(\omega, k)) \geq \beta_1, \quad \beta_1 \cong 1, \quad (z = 1, \dots, Z), \quad (6)$$

$$P(H_z(\omega, k) \leq H_z^{\max}) \geq \beta_2, \quad \beta_2 \cong 1, \quad (z = 1, \dots, Z), \quad (7)$$

$$P(h_r^c(q_r(\omega, k)) \geq h_r^+) \geq \gamma, \quad \gamma \cong 1, \quad (r = v + \eta_2, \dots, v + \eta_2 + \xi_1 - 1). \quad (8)$$

$$h_i(q_i(\omega, k)) = \text{sgn } q_i(\omega, k) S_i(\omega) q_i^2(\omega, k), \quad i \in M, \quad (9)$$

$$h_{NAi}(q_i(\omega, k)) = a_{0i}(\omega) \left(\frac{n_{1i}}{n_{0i}} \right)^2 + a_{1i}(\omega) q_i(\omega, k) \frac{n_{1i}}{n_{0i}} + a_{2i}(\omega) q_i^2(\omega, k), \quad i \in L, \quad (10)$$

$$\eta_{NAi}(q_i(\omega, k)) = 1 - \frac{1 - d_{0i}(\omega) - d_{1i}(\omega) q_i(\omega, k) - d_{2i}(\omega) q_i^2(\omega, k)}{(n_{0i} / n_{1i})^{0,36}}, \quad i \in L, \quad (11)$$

$$N_{NAi}(q_i(\omega, k)) = c_{0i}(\omega) \left(\frac{n_{1i}}{n_{0i}} \right)^3 + c_{1i}(\omega) \left(\frac{n_{1i}}{n_{0i}} \right)^2 q_i(\omega, k) + c_{2i}(\omega) \left(\frac{n_{1i}}{n_{0i}} \right) q_i^2(\omega, k), \quad i \in L, \quad (12)$$

$$N_{NAi}(q_i(\omega, k)) = \frac{9,81 \cdot h_{NAi}(q_i(\omega, k)) \cdot q_i(\omega, k)}{0,9 \cdot \eta_{NAi}(q_i(\omega, k))}, \quad i \in L, \quad (13)$$

$$h_{RZi}(q_i(\omega, k)) = \frac{q_i(\omega, k) C_i(\omega)}{E_i^2}, \quad i \in R, \quad (14)$$

$$H_z(\omega, k) = H_z(\omega, k-1) + c_z(q_{zvh}(\omega, k) - q_{zvih}(\omega, k)), \quad (z = 1, \dots, Z), \quad (15)$$

де $q_i(\omega, k)$ – витрати води на i -й ділянці трубопроводу на k -ому інтервалі часу; $h_i(q_i(\omega, k))$ – падіння напору на i -й ділянці трубопроводу на k -ому інтервалі часу; $h_{NAi}(q_i(\omega, k))$ – напір, що розвиває i -й насосний агрегат на k -ому інтервалі часу; $h_r^c(q_r(\omega, k))$ – вільний напір у r -ому вузлі магістрального водоводу на k -ому інтервалі часу; h_r^+ – мінімально допустимий напір у r -ому вузлі магістрального водоводу ($r = v + \eta_2, \dots, v + \eta_2 + \xi_1 - 1$); $S_i(\omega)$ – оцінка гідравлічного опору i -ї ділянки трубопроводу ($i \in M$); $h_{RZi}(q_i(\omega, k))$ – падіння напору на i -й регулюючій засувці на k -ому інтервалі часу; $\eta_{NAi}(q_i(\omega, k))$ – ККД i -го насосного агрегату на k -ому інтервалі часу; $a_{0i}(\omega), a_{1i}(\omega), a_{2i}(\omega), d_{0i}(\omega), d_{1i}(\omega), d_{2i}(\omega)$ – оцінки параметрів i -го насосного агрегату; $C_i(\omega)$ – оцінки параметрів i -ї регулюючої засувки; E_i – ступінь відкриття i -ї регулюючої засувки ($E \in (0, 1]$); h_i^s – геодезична відмітка i -ї ділянки трубопроводу; b_{1ri} – елемент цикломатичної матриці; $N_{NAi}(q_i(\omega, k))$ – потужність i -го насосного агрегату на k -ому інтервалі часу; $H_z(\omega, k)$ – рівень води в z -ому резервуарі чистої води на k -ому інтервалі часу; $H_1(\omega, k)$ – рівень води в резервуарі чистої води, що відповідає гілці дерева номер 1 на k -ому інтервалі часу; H_z^{\min}, H_z^{\max} – задані границі зміни рівня води в z -ому резервуарі чистої води; $q_{zvh}(\omega, k), q_{zvih}(\omega, k)$ – об'ємна подача води в z -ий резервуар та об'ємний відбір води із z -го резервуара на k -ому інтервалі часу; c_z – нормуючий множник для z -го резервуара; L – множина дуг графа магістрального водоводу, що відповідають ділянкам із насосними агрегатами; M – множина дуг графа магістрального водоводу $G(V, E)$, що відповідають пасивним ділянкам; M_1 – множина гілок дерева графа магістрального водоводу; R – множина дуг графа магістрального водоводу, що відповідають ділянкам із регулюючими засувками; Z – множина хорд графа магістрального водоводу, що є виходами із резервуарів; η_2 – кількість хорд реальних ділянок; ξ_1 – кількість виходів із заданими вузловими витратами; $\xi_2 = e - (v + \eta_2 + \xi_1)$ – кількість хорд, що відповідають входам до магістрального водоводу; $M\{\cdot\}_\omega$ – математичне сподівання випадкової величини; $\omega \in \Omega$, (Ω, B, P) – декартовий добуток

імовірнісних просторів $(\Omega_i, B_i, P_i), i=1,2,\dots,n$ ($\Omega = \Omega_1 \times \Omega_2 \times \dots \times \Omega_n$, $B = B_1 \times B_2 \times \dots \times B_n$, $P = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_n$, де Ω_i – простір елементарних подій; B_i – σ -алгебри подій із Ω_i ; P_i – імовірнісні міри на B_i).

Стохастична модель (1) – (8) містить $\eta_2 + \xi_2$ рівнянь та $e - \xi_1 + 1$ невідомих. Для виконання необхідної умови розв'язання системи рівнянь вона доповнюється граничними умовами. У цьому випадку граничні умови виконують роль незалежних змінних. Передбачається, що всі незалежні змінні мають нормальний закон розподілу із відомими статистичними характеристиками – математичними сподіваннями та дисперсіями.

Для забезпечення лінійної незалежності незалежних змінних граничні умови задаються таким чином, щоб на входах та виходах магістрального водоводу були задані математичні сподівання та дисперсії напорів або витрат води. При цьому на одному із входів або виходів магістрального водоводу має бути задано граничну умову у вигляді математичного сподівання та дисперсії напору. Таке визначення граничних умов дозволяє здійснити розрахунок залежних змінних стохастичної моделі квазістаціонарного режиму роботи магістрального водоводу в залежності від незалежних змінних. Для розв'язання системи рівнянь математичної моделі (1) – (8) будується її детермінований еквівалент шляхом заміни випадкових величин їх математичними сподіваннями. Розв'язання системи нелінійних алгебраїчних рівнянь детермінованого еквіваленту здійснюється методом Ньютона та дозволяє визначити математичні сподівання залежних змінних. Розрахунок дисперсій залежних змінних у залежності від дисперсій незалежних змінних здійснюється шляхом статистичної лінеаризації неявно заданих функцій детермінованого еквівалента математичної моделі (1) – (8).

Основні результати цього розділу опубліковані у роботах [1, 2, 5, 16, 17].

В **третьому розділі** наводяться критерії оцінки якості та ефективності функціонування водопровідних розподільчих мереж. Критерієм якості функціонування водопровідної розподільчої мережі вважається ймовірність виникнення дефіциту води в i -му вузлі водопровідної мережі. Критеріями ефективності функціонування водопровідної мережі вважаються: мінімум математичного сподівання суми надлишкових напорів у вузлах водопровідної мережі; мінімум математичного сподівання сумарних витрат електроенергії усіма працюючими насосними агрегатами; мінімум математичного сподівання сумарних фінансових витрат на електроенергію, яка споживається усіма працюючими насосними агрегатами. Наведено математичну постановку та метод розв'язання двокритеріальної задачі оптимізації квазістаціонарних режимів роботи водопровідних розподільчих мереж.

Цільова функція задачі має вид:

$$M_{\omega} \left(\lambda \sum_{j=1}^m \frac{9,81 \cdot h_{NAj}(q_j(\omega, k)) \cdot q_j(\omega, k)}{0,9 \cdot \eta_{NAj}(q_j(\omega, k))} + (1 - \lambda) \sum_{j=v+\eta_2}^{v+\eta_2+\xi_1-1} (h_j^c(\omega, k) - h_j^+)^2 \right) \rightarrow \min_{q_{NSi} (i \in N), S_{NS}, E_{ij}},$$

$$\lambda \in [0, 1], \quad (16)$$

де S_{NS} – структура насосної станції; N – кількість насосних станцій; m – кількість працюючих насосних агрегатів.

Область обмежень визначається системою рівнянь та нерівностей (1) – (15).

Врахування специфічних особливостей систем водопостачання дозволило розв'язок задачі шукати у два етапи: на першому етапі розв'язується задача мінімізації сумарних надлишкових напорів у вузлах водопровідної мережі при $\lambda=0$ (задача ресурсозбереження), результати якої (значення математичних сподівань і дисперсій напорів та витрат на виходах насосних станцій) є вхідними даними для задачі другого етапу: при $\lambda=1$ розв'язується задача оптимізації режимів роботи насосних станцій (задача енергозбереження). Розв'язання задач здійснюється шляхом побудови їх детермінованого еквівалента, який розв'язується з використання модифікованого методу нульового порядку Нелдера-Міда.

Розроблено метод розв'язання задачі мінімізації математичного сподівання сумарних надлишкових напорів у вузлах водопровідної мережі як для вектора управління, що включає стандартний набір режимних параметрів (напір і витрати на виходах насосних станцій), так і для розширеного вектора управління, що включає, крім режимних параметрів, параметри, що визначають оптимальну (зоновану) структуру системи подачі та розподілу води (задача зонування водопровідної мережі).

На змістовному рівні задача зонування водопровідної мережі полягає в наступному: ті вузли водопровідної мережі, в яких надлишкові напори істотно перевищують задане граничне значення, необхідно згрупувати у зв'язані ділянки (зони), які повинні мати не менше двох входів (для забезпечення заданого рівня надійності та живучості водопровідної мережі), і передбачити встановлення регуляторів тиску на кожному з цих входів, а також оцінити параметри кожного регулятора. Якщо у виділену зону потрапляють висотні будівлі, то для кожної необхідно передбачити встановлення станції підкачки та визначити її параметри.

З формальної точки зору розв'язання задачі зонування водопровідної мережі зводиться до розв'язання ряду взаємопов'язаних задач:

- оптимального розподілу навантаження між насосними станціями для режиму максимального водоспоживання на інтервалі управління;
- виділення зон водопровідної мережі, у тому числі тих, що містять багатоповерхівки;
- визначення параметрів регуляторів тиску, які встановлюються на входах виділених зон;

– визначення параметрів станцій підкачок для багатоповерхівок у виділених зонах.

Математична постановка задачі оптимального зонування водопровідних розподільчих мереж у дисертаційній роботі представлена у вигляді:

$$M_{\omega} \sum_{i=1}^{v-1} (h_i^c(\omega) - h_i^+)^2 \rightarrow \min_{G_i \in G}, \quad (17)$$

$$\Omega: M_{\omega} \left(\operatorname{sgn} q_r(\omega) S_r(q_i(\omega)) q_r^2(\omega) + \sum_{i=1}^{v-1} b_{1ri} \operatorname{sgn} q_i(\omega) S_i(q_i(\omega)) q_i^2(\omega) \right) = 0, \\ (r = v, \dots, v + \eta_2 - 1), \quad (18)$$

$$M_{\omega} \left(h_r^c(\omega) - h_{NS1}(\omega) + \sum_{i=1}^{v-1} b_{1ri} (\operatorname{sgn} q_i(\omega) S_i(q_i(\omega)) q_i^2(\omega) + h_i^s) \right) = 0, \\ (r = v + \eta_2, \dots, v + \eta_2 + \xi_1 - 1), \quad (19)$$

$$M_{\omega} \left(\operatorname{sgn} q_r(\omega) S_r(q_i(\omega)) q_r^2(\omega) + h_r^s - h_{NSn}(\omega) + h_{NS1}(\omega) + \right. \\ \left. + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} (\operatorname{sgn} q_i(\omega) S_i(q_i(\omega)) q_i^2(\omega) + h_i^s) \right) = 0, \quad (r = v + \eta_2 + \xi_1, \dots, e; \quad n = 1, \dots, N), \quad (20)$$

$$M(q_i(\omega)) = M_{\omega} \left(\sum_{r=v}^{v+\eta_2-1} b_{1ri} q_r(\omega) + \sum_{r=v+\eta_2}^e b_{1ri} q_r(\omega) \right), \quad (i = 1, \dots, v-1). \quad (21)$$

$$P(h_i^c(\omega) \geq h_i^+) \geq \alpha, \quad (\alpha \cong 1), \quad (i = v + \eta_2, \dots, e), \quad (22)$$

де G_i – підграф (i -та зона) графу G водопровідної мережі; $h_{NSn}(\omega)$ – напір на виході n -ої насосної станції.

Для розв'язання системи рівнянь (18) – (22) вона доповнюється граничними умовами виду:

$$q_r(\omega) \sim N(\bar{q}_r, \sigma_{q_r}^2), \quad r = (v + \eta_2, \dots, e). \quad (23)$$

Основні результати цього розділу опубліковані у роботах [2-4, 9, 13].

Четвертий розділ присвячений оптимізації режимів роботи магістрального водоводу. Наводиться математична постановка та метод розв'язання задачі оптимального стохастичного управління режимами роботи магістрального водоводу.

На відміну від системи подачі та розподілу води специфічними властивостями магістрального водоводу є наявність у них резервуарів чистої води досить великого обсягу, в яких динамічні процеси зміни рівнів води

протікають повільно та на порядки відрізняються від динамічних процесів зміни напорів у вузлах водопровідної мережі.

Врахування цих особливостей привело до необхідності розглядати магістральний водовід як об'єкт управління, динамічні властивості якого визначаються динамічними властивостями взаємодії скінченної системи технологічних елементів (резервуарів чистої води) із процесами, що протікають повільно. Із технологічних умов рівні води в резервуарах можуть змінюватися строго в границях заданого діапазону, виключаючи такі події як випорожнення резервуару та його перелив. У дисертаційній роботі фазовими змінними об'єкта управління є рівні води в резервуарах чистої води.

Врахування специфічних особливостей магістрального водовода як об'єкта управління та тризонного тарифу на електроенергію привели до необхідності постановки задачі оптимізації режимів роботи магістрального водовода у вигляді задачі оптимального стохастичного управління нелінійною динамічною системою з екстремальними та ймовірнісними обмеженнями на фазові змінні виду:

$$M_{\omega} \sum_{k=1}^{24} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} N_{ij}(q_i(\omega, k)) \cdot r(k) \rightarrow \min_{u(k) \in \Omega}, \quad (24)$$

де $r(k)$ – значення тарифу на електроенергію на k -ому підінтервалі часу; $u(k)$ – вектор управління, що визначає кількість працюючих насосних агрегатів, положення регулюючих засувки.

Область обмежень Ω визначається стохастичною моделлю квазістаціонарних режимів роботи магістрального водоводу (1)–(15) та екстремальними обмеженнями на фазові змінні для фіксованих моментів часу $k=6$ та $k=23$:

$$M_{\omega} \{H_{zk}(\omega)\} \rightarrow \max_{q_{zvhk} \in \Omega}, \quad (k=6), \quad (25)$$

$$M_{\omega} \{H_{zk}(\omega)\} \rightarrow \min_{q_{zvhk} \in \Omega}, \quad (k=23). \quad (26)$$

Для розв'язання задачі (24), (1)–(15), (25)–(26) при $k=24$ повинні бути додатково відомі прогнози витрат у вигляді умовних математичних сподівань, обчислених у момент часу $k=24$, з упередженням $l=1, 2, \dots, 23$ всіх попутних споживачів $q_{ik}(l)$, що отримують воду із магістрального водоводу, та кінцевих споживачів $q_{jk}(l)$, що отримують воду із резервуара на виході магістрального водоводу; рівні води в кожному z -ому резервуарі чистої води – H_{z24} .

На даний час не існує загальних методів розв'язання задачі (24), (1) – (15), (25) – (26). У дисертаційній роботі для її розв'язання розроблений наближений метод, оснований на побудові її детермінованого еквіваленту, для розв'язання якого використовується метод динамічного програмування гілок і меж.

Оцінка ефективності розроблених у дисертаційній роботі математичної моделі та методу оптимального стохастичного управління режимами роботи магістрального водоводу здійснювалась для одного із найбільших магістральних водоводів України, еквівалентна структура якого подана на рисунку 1.

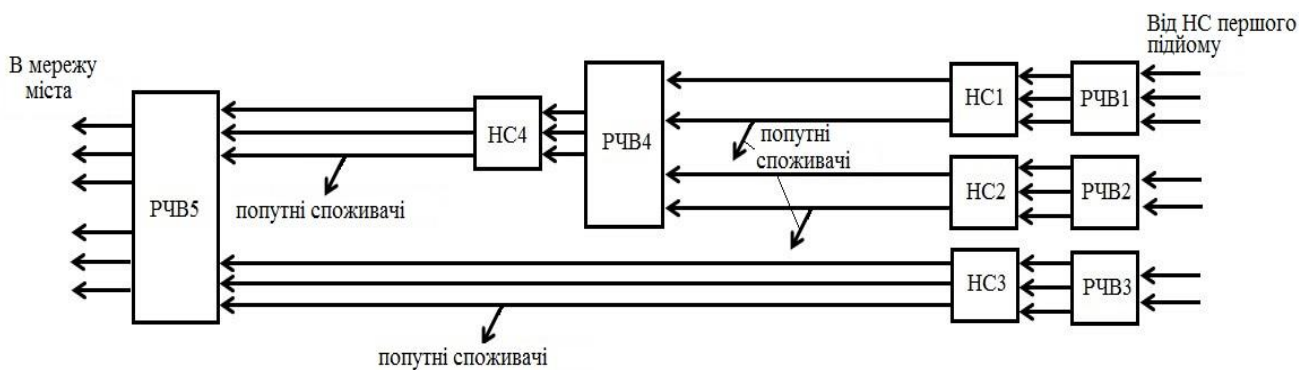


Рисунок 1 – Структура магістрального водоводу
(НС – насосна станція, РЧВ – резервуар чистої води)

Тариф і вартість 1 кВт/год електроенергії S визначається за тризонним тарифом (табл. 1).

Таблиця 1 – Тариф за електроенергію по годинах

Години	6.00–8.00	8.00–10.00	10.00–18.00	18.00–22.00	22.00–23.00	23.00–6.00
Тариф	1,02	1,8	1,02	1,8	1,02	0,35
S , грн.	1,6	2,82	1,6	2,82	1,6	0,39

У дисертаційній роботі отримані оцінки потенціалу ресурсо- та енергозбереження шляхом порівняння фактичних параметрів режимів роботи магістрального водоводу при використанні існуючої системи оперативно-диспетчерського управління (ф) з розрахунковими значеннями цих же параметрів, отриманих при використанні системи оптимального стохастичного управління (с) на інтервалі часу сім діб, а також для восьми варіантів модернізації технологічного обладнання (таблиця 2) та структури магістрального водоводу (рисунки 2) при використанні системи оптимального стохастичного управління.

Таблиця 2 – Варіанти модернізації технологічного обладнання магістрального водоводу (НА – насосний агрегат)

Варіанти	Суть модернізації
1	Заміна двигуна на НС1
2	Обрізка коліс НА на НС1
3	Обрізка коліс НА на НС2
4	Заміна двигуна на НС1, обрізка коліс НА на НС2
5	Обрізка коліс НА на НС1, НС2
6	Обрізка коліс НА на НС1, НС2, регульований привод на НС3, два регульованих приводи на НС4
7	Зміна структури магістрального водоводу, обрізка коліс НА на НС1, НС2, НС3, НС4
8	Зміна структури магістрального водоводу, обрізка коліс НА на НС1, НС2, НС3, два регульованих приводи на НС4

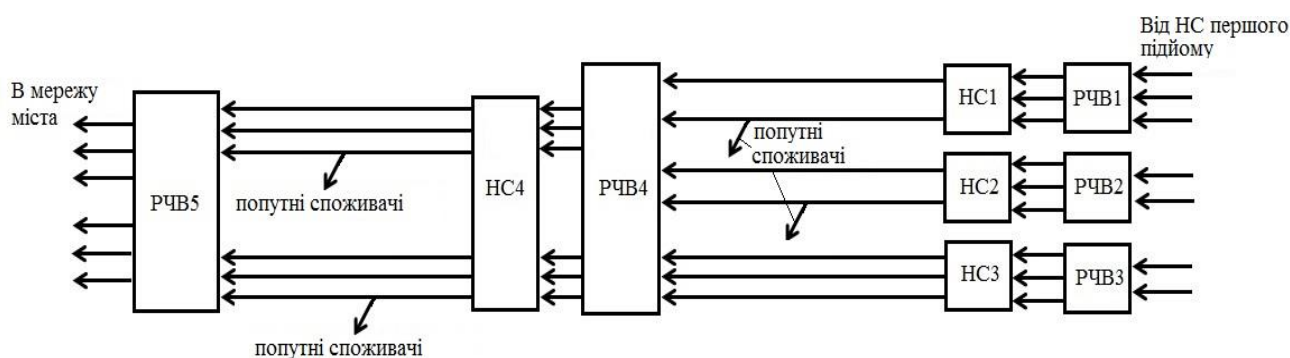


Рисунок 2 – Змінена структура магістрального водоводу

У роботі проведена оцінка економічного ефекту в результаті переходу від існуючої системи управління режимами роботи магістрального водоводу до системи оптимального стохастичного управління з використанням тризонного тарифу на електроенергію для одного з найбільших магістральних водоводів України, яка склала близько 6,5%, що відповідає економії 715 472 грн. на місяць. Для цього магістрального водоводу були розроблені кілька варіантів модернізації його обладнання та структури. Один із найбільш перспективних варіантів модернізації дозволяє заощадити 1 453 610 грн. за тиждень або 5 814 440 грн. за місяць.

На рис. 3, рис. 4 наведені оцінки потенціалу ресурсо- та енергозбереження й економії фінансів на інтервалі часу 7 днів для існуючої системи управління (ф), для системи оптимального стохастичного управління (с) та восьми різних варіантів модернізації.

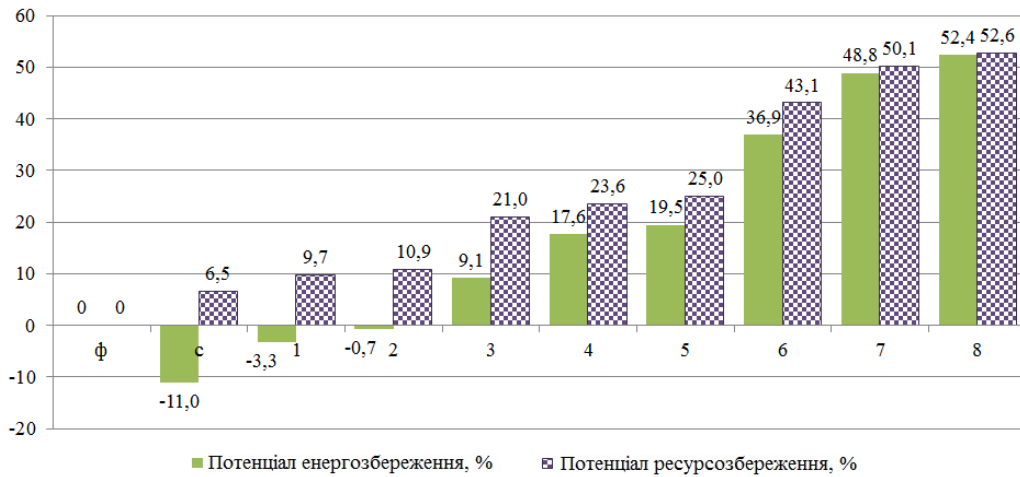


Рисунок 3 – Оцінки математичного сподівання потенціалу ресурсо- та енергозбереження за 7 діб



Рисунок 4 – Графік економії фінансових витрат на електроенергію за 7 діб

Основні результати цього розділу опубліковані у роботах [5-8, 14, 15].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова задача математичного моделювання та оптимізації режимів роботи систем водопостачання. Проведені дослідження спрямовані на розробку нових ресурсо- та енергозберігаючих й екологічно безпечних технологій управління режимами роботи систем водопостачання і дозволили отримати нові результати.

1. Розроблена математична модель квазістаціонарних режимів роботи систем подачі та розподілу води, що враховує стохастичний характер об'єкта управління та навколишнього середовища й адекватно описує процеси транспорту та розподілу води в системі водопостачання.

2. На базі стохастичної моделі квазістаціонарних режимів роботи систем подачі та розподілу води приведена математична постановка і метод розв'язання задачі оптимізації квазістаціонарних режимів роботи водопровідних розподільчих мереж, яка включає в себе дві задачі: задачу оптимального розподілу навантаження між насосними станціями і задачу оптимізації квазістаціонарних режимів роботи насосної станції.

3. Удосконалений метод оптимального стохастичного управління режимами роботи насосної станції за рахунок оптимального вибору складу працюючих насосних агрегатів, що мінімізує їх негативний взаємний вплив.

4. Отримав подальший розвиток метод оптимального стохастичного управління розвитком систем подачі та розподілу води шляхом зонування водопровідних розподільчих мереж для районів із різною поверховістю забудови, заснований на використанні стохастичної моделі квазістаціонарних режимів роботи систем подачі та розподілу води і модифікованого методу пошуку в ширину.

5. Розроблена математичну модель задачі оптимального стохастичного управління режимами роботи магістрального водоводу з імовірнісними та екстремальними обмеженнями на фазові змінні, розв'язання якої дозволяє отримати мінімум математичного сподівання вартості витрат на електроенергію при тризонному тарифі на інтервалі управління.

6. Аналіз ефективності розроблених методів моделювання й оптимізації режимів роботи систем подачі та розподілу води показав, що:

- в результаті зонування і встановлення регуляторів тиску та станцій підкачки можна знизити математичне сподівання сумарного надлишкового напору у водопровідних мережах до 48%, у виділеній зоні на 73,42%;
- потенціал енергозбереження насосної станції досягає 11%;
- потенціал ресурсозбереження магістрального водоводу при переході від традиційної системи оперативно-диспетчерського управління до системи оптимального стохастичного управління склав 6,5%.

7. Імітаційне моделювання на реальних даних підтвердило працездатність, економічну ефективність та можливість практичної реалізації розроблених методів.

8. Виконано практичне впровадження розроблених методів у навчальний процес та в науково-дослідну роботу, що підтверджено відповідними актами.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Тевяшев А. Д. Стохастическая модель и метод зонирования водопроводных сетей / А. Д. Тевяшев, О. И. Матвиенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 1(67). – С. 17-24.

2. Тевяшев А. Д. Об одной стратегии оперативного планирования режимов работы насосной станции / А. Д. Тевяшев, О. И. Матвиенко // Восточно-

Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 3. – С. 4-9.

3. Тевяшев А. Д. Оценка потенциала энерго- и ресурсосбережения в системах централизованного водоснабжения / А. Д. Тевяшев, О. И. Матвиенко, Г. В. Никитенко // Науковий вісник будівництва. – 2014. – № 3(77). – С. 144-150.

4. Tevyashev A. About one Approach to Solve the Problem of Management of the Development and Operation of Centralized Water-Supply Systems / A. Tevyashev, O. Matviienko // Econtechmod. An International Quarterly Journal. – 2014. – Vol. 3, Issue 3. – P. 61-76.

5. Tevyashev A. About One Problem of Optimal Stochastic Control of the Modes of Operation of Water Mains / A. Tevyashev, O. Matviienko // Econtechmod. An International Quarterly Journal. – 2015. – Vol. 4, Issue 3. – P. 3-12.

6. Tevyashev A. Optimal Stochastic Control of the Modes of Operation of the Sewage Pumping Station / A. Tevyashev, G. Nikitenko, O. Matviienko // Econtechmod. An International Quarterly Journal. – 2015. – Vol. 4, Issue 3. – P. 47-55.

7. Тевяшев А. Д. Математическая модель и метод оптимального стохастического управления режимами работы магистрального водовода / А. Д. Тевяшев, О. И. Матвиенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 6/4(78). – С. 45-53.

8. Тевяшев А. Д. Оценка потенциала ресурсо- и энергосбережения при управлении развитием и функционированием магистрального водовода / А. Д. Тевяшев, О. И. Матвиенко. // Підводні технології. Промислова та цивільна інженерія. – 2016. – № 4. – С. 27-38.

9. Тевяшев А. Д. Стохастическая модель и метод оперативного планирования режимов работы насосных станций / А. Д. Тевяшев, О. И. Матвиенко, Г. В. Никитенко // Вода. Экология. Общество: тезисы докладов. IV международная научно-техническая конференция. – Х.: ХНУГХ им. Бекетова, 2014. – С. 61-64.

10. Тевяшев А. Д. Алгоритмические методы повышения надёжности функционирования систем централизованного водоснабжения / А. Д. Тевяшев, О. И. Матвиенко. // Информационные системы и технологии: тезисы докладов. 3-я международная научно-техническая конференция, 15-21 сентября 2014 г. – Х.: ТОВ «Друкарня Мадрид», 2014. – С. 142-143.

11. Матвиенко О. И. Стохастический подход к зонированию водопроводных сетей / О. И. Матвиенко // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 18-й международный молодежный форум: сб. материалов форума. Т. 7. – Харьков: ХНУРЭ, 2014. – С. 122-123.

12. Тевяшев А. Д. Об одной стратегии управления развитием и функционированием систем централизованного водоснабжения / А. Д. Тевяшев, О. И. Матвиенко, Г. В. Никитенко // Методы повышения ресурса городских инженерных инфраструктур: VI Всеукраинский научно-практический семинар, 15-16 октября 2014 г.: сб. науч. тр. – Х.: ХНУСА, 2014. – С. 78-80.

13. Матвиенко О. И. Зонирование в системах подачи и распределения воды / О. И. Матвиенко // XII конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 17-21 марта 2014 г.: тезисы докладов. – Х.: ННЦ ХФТИ, 2014. – С. 49-50.

14. Тевяшев А. Д. Об одном классе задач оптимального стохастического управления с вероятностными ограничениями на фазовые переменные / А. Д. Тевяшев, О. И. Матвиенко // Информационные системы и технологии: тезисы докладов. 4-я международная научно-техническая конференция, 21-27 сентября 2015 г. – Х.: НТМТ, 2015. – С. 140-142.

15. Тевяшев А. Д. Математическая модель и метод оптимального стохастического управления режимами работы канализационной насосной станции / А. Д. Тевяшев, Г. В. Никитенко, О. И. Матвиенко // Информационные системы и технологии: тезисы докладов. 4-я международная научно-техническая конференция, 21-27 сентября 2015 г. – Х.: НТМТ, 2015. – С. 143-145.

16. Матвиенко О. И. Математическое моделирование режимов работы водоводов / О. И. Матвиенко, А. А. Ястребов // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 19-й международный молодежный форум: сб. материалов форума. Т. 7. – Харьков: ХНУРЭ, 2015 – С. 78-79.

17. Матвиенко О. И. Математическое моделирование режимов работы насосной станции / О. И. Матвиенко, Ю. А. Ястребова // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 19-й международный молодежный форум: сб. материалов форума. Т. 7. – Харьков: ХНУРЭ, 2015. – С. 80-81.

АНОТАЦІЯ

Матвієнко О. І. Математичне моделювання та оптимізація режимів роботи систем водопостачання. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. Харківський національний університет радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України, Харків, 2017.

Дисертаційна робота присвячена розробці нових математичних моделей і методів математичного моделювання та оптимізації режимів роботи систем водопостачання, використання яких дозволило розробити і впровадити нові ресурсо- та енергозберігаючі технології управління розвитком і функціонуванням систем подачі та розподілу води.

У результаті виконання дисертаційного дослідження отримані такі наукові результати: вперше розроблено математичну модель квазістаціонарних режимів роботи системи подачі та розподілу води, що враховує стохастичний характер об'єкта управління та навколишнього середовища й адекватно описує процеси транспорту та розподілу води в системах водопостачання; на базі цієї моделі

вперше сформульовано та розв'язано задачу оптимізації квазістаціонарних режимів роботи водопровідних розподільчих мереж, що включає в себе задачу оптимального розподілу навантаження між насосними станціями, задачу оптимізації роботи квазістаціонарних режимів роботи насосної станції та задачу зонування; розроблено задачу оптимального стохастичного управління з дискретним часом магістральним водоводом, що відрізняється від відомих введенням додаткових екстремальних і ймовірнісних обмежень на фазові змінні; проведено оцінку ефективності розроблених моделей та методів.

Ключові слова: ресурс- та енергозбереження, оптимальне стохастичне управління, магістральний водовід, насосна станція, зонування, квазістаціонарний режим, стохастична модель.

АННОТАЦІЯ

Матвиенко О. И. Математическое моделирование и оптимизация режимов работы систем водоснабжения. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. Харьковский национальный университет радиоэлектроники Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2017.

Диссертационная работа посвящена разработке новых математических моделей и методов моделирования и оптимизации режимов работы систем водоснабжения, использование которых позволило разработать и внедрить новые ресурс- и энергосберегающие технологии управления развитием и функционированием систем подачи и распределения воды.

Задачи оптимизации режимов работы систем водоснабжения решались многими исследователями, однако, оптимизация систем водоснабжения осуществлялась для однозонных тарифов на электроэнергию на базе детерминированных математических моделей, не учитывающих стохастический характер объекта управления и внешней среды и адекватно описывающих объект управления для конкретных граничных условий и фиксированного момента времени t .

При этом получаемые оптимальные решения оказывались крайне неустойчивыми и при изменении граничных условий не только переставали быть оптимальными, но и могли выйти из области допустимых режимов. Такие решения оказались неприемлемы на практике. Поэтому возникла необходимость разработки новых математических моделей, которые адекватно описывают фактические режимы работы системы водоснабжения не только в конкретный момент времени, а на всём интервале управления, их использования для математического моделирования и оптимизации фактических режимов работы систем водоснабжения, чему и посвящена диссертационная работа.

Проведенные в диссертационной работе исследования позволили получить новые научные результаты. Впервые разработана стохастическая модель квазистационарных режимов работы системы подачи и распределения воды, учитывающая стохастический характер объекта управления и окружающей среды и адекватно описывающая процессы транспорта и распределения воды в системе водоснабжения на заданном интервале управления.

Стохастическая модель квазистационарных режимов работы системы подачи и распределения воды использовалась для математической постановки задачи оптимизации режимов работы водопроводных распределительных сетей на заданном интервале времени в виде двух взаимосвязанных задач: задачи минимизации математического ожидания суммарных избыточных напоров в узлах водопроводной сети (снижение непроизводительных потерь питьевой воды, связанных с обнаруженными и неустранёнными утечками); задачи минимизации математического ожидания суммарных затрат электроэнергии, затраченной всеми насосными агрегатами на всех насосных станциях, работающих на водопроводную сеть.

Разработан метод решения задачи минимизации математического ожидания суммарных избыточных напоров в узлах водопроводной сети как для вектора управления, включающего стандартный набор режимных параметров (напоров и расходов на выходах насосных станций), так и для расширенного вектора управления, включающего, кроме режимных параметров, параметры, определяющие оптимальную (зонированную) структуру водопроводной распределительной сети – задачи зонирования водопроводной сети.

На базе стохастической модели квазистационарных режимов работы системы подачи и распределения воды впервые сформулирована и решена задача оптимального стохастического управления режимами работы магистрального водовода с вероятностными и экстремальными ограничениями на фазовые переменные объекта управления (уровни воды в резервуарах чистой воды), решение которой позволяет получить такой вектор управления, который обеспечивает минимум математического ожидания стоимости затрат электроэнергии на интервале управления при трёхзонном тарифе на электроэнергию.

Усовершенствован метод оптимального стохастического управления режимами работы насосных станций за счёт оптимального выбора состава работающих насосных агрегатов, минимизирующий их отрицательное взаимное влияние.

Проведена оценка эффективности разработанных моделей и методов. Как показали исследования, в результате зонирования и использования регуляторов давления для тестового примера математическое ожидание суммы квадратов избыточных напоров в узлах водопроводной сети для выбранной зоны уменьшилась на 73%. В результате решения задачи оптимизации режимов работы насосной станции математическое ожидание потребления

электроэнергии насосной станцией сократилось на 11%. Экономический эффект в результате перехода от существующих систем управления режимами работы магистрального водовода к системам оптимального стохастического управления с использованием трёхзонных тарифов на электроэнергию для одного из крупнейших магистральных водоводов Украины составил около 6,5%. Для этого магистрального водовода были разработаны несколько вариантов модернизации его оборудования и структуры. Один из наиболее перспективных вариантов модернизации (8) позволяет сэкономить до 52% фактических затрат на электроэнергию.

Ключевые слова: ресурс- и энергосбережение, оптимальное стохастическое управление, магистральный водовод, насосная станция, зонирование, квазистационарный режим, стохастическая модель.

ABSTRACT

Matviienko O. Mathematical modeling and optimization of operating modes of water systems. – Manuscript.

The thesis for the candidate's degree of technical science in a speciality 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods. Kharkiv National University of Radioelectronics, Ministry of Education and Science of Ukraine Kharkiv, 2017.

The dissertation is dedicated to the development of new mathematical models and methods of mathematical modeling and optimization of the modes of operation of water supply systems, the use of which has allowed to develop and implement new resource and energy saving technologies of the management of development and operation of water supply and distribution systems.

As a result of carrying out of the present dissertation research, the following scientific results have been obtained: for the first time a mathematical model of the quasi-stationary modes of operation of the water supply and distribution systems has been developed, taking into account the stochastic nature of the object of control and environment, and describes adequately the processes of transportation and distribution of the water in water supply systems. On the basis of this model, the problem of optimization of the quasi-stationary modes of operation of water distribution systems including the problem of optimal distribution of the water between pumping stations and the problem of zoning have been set and solved for the first time, the problem of optimal stochastic control of water mains with discrete-time which differs from the known ones by the introduction of additional extreme and probabilistic constraints on the phase variables has been developed; the evaluation the effectiveness of the developed models and methods has been carried out.

Keywords: resource and energy efficiency, optimal stochastic control, water main, pumping station, zoning, quasi-stationary mode, a stochastic model.

Підп. до друку 24.01.17.
Умов. друк. арк. 1,1.
Зам. № 2-82.

Формат 60×84 1/16.
Облік. вид. арк. 1,3.
Ціна договірна.

Спосіб друку – ризографія.
Тираж 100 прим.

ХНУРЕ. Україна. 61166, Харків, просп. Науки, 14

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі ХНУРЕ
61166, Харків, просп. Науки, 14