УДК [004.94+519.87+519.21]:631.6 https://doi.org/10.31713/vt420218

Кір'янов В. М., д.т.н., професор (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ЗАСТОСУВАННЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ У ВОДНОМУ ГОСПОДАРСТВІ ДЛЯ ОЦІНКИ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ НАДІЙНОСТІ ВООДОГОСПОДАРСЬКИХ СИСТЕМ

Розглядаються питання створення математичних імітаційних моделей. Основна увага приділена розробці і застосуванню імітаційного моделювання для дослідження надійності функціонування зрошувальної системи. У воднобалансових розрахунках використовується одновимірне диференціальне рівняння вологопереносу. Для уніфікації математичного та алгоритмічного опису впливу різних факторів на функціонування зрошувальної системи був застосований імовірнісно-статистичний принцип. Наведена укрупнена блок-схема алгоритму стохастичної імітаційної моделі внутригосподарської частини зрошувальної системи. В процесі імітації набирається статистика відхилень вологи у ґрунті від встановлених рівнів з урахуванням їх «тяжкості», збитків; ведеться розрахунок критеріїв надійності.

Ключові слова: **математичне моделювання; імітаційна модель; ЕОМ; водне господарство; зрошувальна система; надійність; водний баланс; вологопереніс; імовірнісно-статистичний принцип.**

В основі імітаційного моделювання лежить використання потужного математико-комп'ютерний апарату, який дозволяє формалізувати процеси, що відбуваються в реальних умовах на виробництві та в природному оточуючому середовищі; отримати багато відповідей в процесі наукових досліджень та вирішенні завдань в інженерній практиці, зокрема – у водогосподарській галузі.

Метою статті є показати на засадах найбільш характерних ознак та можливостей імітаційного моделювання результати його застосування у водному господарстві, перспектив застосування як в науці, так і в практичній діяльності, навчальному процесі; висвітлення конкретних результатів створення імітаційної моделі функціонування гідромеліоративної системи та дослідження надійності функціонування системи за допомогою створеної моделі.

Терміни «моделювання» (simulation) та «імітація» майже синоніми. Щоб відрізнити математичні моделі одну від іншої дослідники почали надавати їм додаткові назви. В даному випадку термін «імітація» введений, щоб акцентувати увагу на імітації, як на процесі проведення експерименту (переважно – на ЕОМ) [1].

Імітаційне моделювання – це метод дослідження, при якім досліджувана система заміняється моделлю, що описує з достатньою точністю реальну систему, з якою проводяться експерименти для отримання інформації про цю систему. Експериментування з моделлю називають імітацією.

Імітаційне моделювання - це окремий напрям математичного моделювання. З іншого боку імітаційне моделювання, враховуючи складнощі обчислень в процесі моделювання, це комп'ютерна робота, яку неможливо виконати без застосування ЕОМ. Тому часто для цього виду моделювання використовується синонім - комп'ютерне моделювання.

Імітаційна модель – це спеціальний програмний комплекс, який дозволяє імітувати функціонування складної системи (об'єкта) чи процесу. Він запускає в комп'ютері паралельні взаємодіючі обчислювальні процеси з використанням математичних рівнянь і логічних операторів, що описують процеси потоку інформації про стани системи та її елементів. Імітаційна модель дозволяє отримати докладну статистику про різні аспекти функціонування системи залежно від вхідних даних.

Імітаційний експеримент представляє собою числове моделювання на ЕОМ з метою відтворення динаміки реальних станів системи в результаті впливу на неї різних внутрішніх та зовнішніх факторів, збурюючих та управляючих впливів.

Мета імітаційного моделювання полягає у відтворенні поведінки системі, що досліджується, на основі результатів аналізу найбільш суттєвого взаємозв'язку між її елементами для проведення різних експериментів.

Імітаційне моделювання переважно застосовують тоді, коли:

- неможливо, небезпечно або занадто дорого проводити спостереження та експерименти на реальних об'єктах;

- неможливо побудувати адекватну аналітичну модель опису явища з достатньою точністю, коли мають місце дуже складні аналітичні залежності, спрощення яких приводить до суттєвого зменшення точності опису явищ;

- наявність факторів, які неможливо або важко формалізувати, зокрема - поведінку людини;

- необхідно імітувати поведінку системи у часі з метою проведення різних експериментів для пошуку суттєвих зв'язків між її елементами, оцінки впливу на систему різних зовнішніх і внутрішніх факторів;

- виникає потреба в уповільненні процесу для проведення експерименту у випадку швидкоплинних реальних процесів або навпаки - у прискоренні його для моделювання систем з повільною плинністю з метою контролю протікання процесу з боку дослідника;

- при невизначеності цілі та критеріїв функціонування системи, коли не існує закінченої постановки завдання дослідження і йде процес пізнання об'єкта моделювання.

Практично неможливо (а з практичної точки зору і не доцільно) створювати універсальну імітаційну модель конкретної системи «на всі можливі випадки». Це не лише дуже складно, але і відволікає дослідника від реальних потреб, завдань, які він хоче вирішити за допомогою цієї моделі; розпилює його увагу, заважає концентрації уваги для вирішення поставлених завдань.

Структура імітаційної моделі, процес її побудови залежить від завдань, які перед нею ставляться, та від сфери її використання (для наукових досліджень, практичного використання на виробництві, в навчальному процесі, тощо).

Імітаційна модель, її інтерфейс і функціональні можливості повинні сприяти не лише отриманню шуканих результатів, але і створювати умови сприяння виникненню у дослідника нових ідей, шляхів їх реалізації. Нерідко процес створення імітаційної моделі прирівнюють до мистецтва [2].

Імітаційна модель функціонування зрошувальної системи, яка розглядається в цій статті, побудована для проведення наукових досліджень з метою оцінки та оптимізації надійності функціонування зрошувальної системи, її внутрігосподарської частини.

Основна мета функціонування зрошувальної системи – підтримання динаміки вологи в ґрунті у кореневмісному шарі у встановлених межах, які забезпечують проектну врожайність сільськогосподарських культур з дотриманням визначених обмежень екологічного та економічного характеру. Це вимагає ще на етапі проектування системи, планування її функціонування вирішення різних питань стратегічного і тактичного характеру з обґрунтуванням схем досягнення

кінцевого результату; вимагає на етапі експлуатації системи реалізації запланованого забору води з водних джерел, транспортування та розподілу її між господарствами, полями з доведенням води до кожної ділянки зрошуваного поля з переведенням її у вологість ґрунту з урахуванням реально виникаючих обставин.

Надійність – властивість об'єкту (системи, споруди) виконувати задані функції протягом необхідного проміжку часу [3].

Основним поняттям надійності є поняття відмови – відхилення стану системи за допустимі межі. Надійність полягає у відсутності таких непередбачених та недопустимих змін обраного режиму станів об'єкту.

Надійність системи за визначеністю академіка Н.П.Бусленка – це властивість стійкості оптимальної ефективності системи [4], тобто надійність – це ефективність у часі.

Показники надійності оцінюють ефективність об'єкту (системи) в динаміці (у часі), враховуючи тим самим характер та міру впливу на ефективність функціонування системи множини різних збурюючих факторів, які виводять її з стану заданого режиму в процесі експлуатації.

Велика кількість питань теорії надійності носить математичний характер і вимагає для свого розв'язку вже існуючих математичних засобів, а також розробки нових. З іншого боку, теорія надійності є інженерною дисципліною, яка вимагає врахування специфіки системи, що вивчається, з удосконаленням теоретичного апарату та підходів його застосування.

Особливості зрошувальної системи, розгляд її як складної організаційно-технологічної системи [3] суттєво ускладнює процес аналізу, оцінки та оптимізації надійності загальноприйнятими аналітичними моделями теорії надійності. Це вимагає застосування нестандартних підходів до вирішення поставлених завдань з питань надійності водогосподарських систем в цілому і, зокрема, зрошувальних систем. Одним з таких шляхів є застосування імітаційного моделювання, яке ще не зайняло гідне місце у дослідженнях надійності складних організаційно-технологічних систем; не розкриті і не використані в достатній мірі потенційні можливості імітаційного моделювання для цього.

Задача побудови імітаційної моделі функціонування зрошувальної системи досить складна і вимагає застосування різних методичних підходів до її вирішення. Не зупиняючись детально на класифі-

кації цих підходів в першу чергу слід розглядати цю задачу як багаторівневу, яка передбачає досягнення необхідного результату на кожному рівні системи, як з точки зору матеріального об'єкту (зрошувальна система, її підсистеми різного рівня), так і з точки зору шляхів отримання шуканих результатів (покроково від системи в цілому до певного рівня подрібнення системи на її складові) з застосуванням методів індукції та дедукції. А ці результати (на кожному рівні) повинні сприяти досягненню кінцевої мети функціонування зрошувальної системи в цілому, давати оцінку впливу складових частин системи, її елементів на кінцевій результат.

З урахуванням особливостей зрошувальної системи, управління нею, потоку управляючої інформації імітаційну модель зрошувальної системи в першу чергу доцільно представити такою, що складається з двох самостійних частин: імітаційної моделі міжгосподарської частини (МГС) та імітаційної моделі внутрігосподарської частини (ВГС) зрошувальної системи. Вони мають мінімальну кількість зв'язків між собою і суттєво полегшують прийняття управлінських рішень в процесі експлуатації.

Мета МГС полягає у заборі води з джерела в необхідній кількості та якості і розподіл її між масивами сільськогосподарських земель, які потребують зрошення. Імітується динаміка води в каналі, а саме – режим об'єму води в б'єфах каналу і режим рівня води, що з ним пов'язаний.

Мета ВГС полягає у заборі води з МГС в необхідній кількості і якості, розподіл її між сільськогосподарськими полями, доставка до конкретного поля з розподілом її по площині поля та переведенням води в стан вологості ґрунту по його профілю (по глибині) в межах кореневмісного шару. Імітується водний режим ґрунту і пов'язані з ним режими інших параметрів екосистеми (урожаю, гумусу, тощо).

Враховуючи вимоги до обсягу публікації обмежимось розглядом лише внутрігосподарської частини зрошувальної системи, а відповідно будемо розглядати побудову імітаційної моделі саме ВГС.

По ВГС імітується водний режим ґрунту і пов'язані з ним режими інших параметрів екосистеми, які впливають на формування врожаю сільськогосподарських культур, вимив або накопичення гумусу ґрунту, тощо. Динаміку водного режиму можна описувати рівняннями водного балансу, які на даний час лежать в основі управління зрошувальною системою, і які доцільно представити у вигляді двох

воднобалансових моделей: «зрошуваного поля» і «внутрігосподарської зрошувальної мережі» [5].

«Поле»:

$$\pm \Delta W_n = (W_{дм} + O + Г) - (E + \Delta O + \Delta P + И), \quad (1)$$

де ΔW_n – зміна запасів вологи в активному шарі ґрунту; $W_{дм}$ – об'єм води, що подана на поле дощувальною машиною (або іншим засобом); *О* – опади; *Е* – сумарне випаровування води з поля; *И* – підпитка ґрунтовими водами; *ΔО* – втрати опадів; *ΔР* – втрати поливної води на скид; *Г* – використання рослинами ґрунтових вод.

«Внутрігосподарська мережа»:

$$\pm \Delta W_{вхс} = W_{нс} - \sum_{i=1}^{n} W_{дм_i} - \sum_{j=1}^{m} W_{n_j}, \quad (2)$$

де $W_{нс}$ – об'єм води, що забирає насосна станція підкачки з каналу у ВГС; $\Delta W_{вхс}$ – зміна об'єму води у мережі; $\sum_{j=1}^{m} W_{n_j}$ – сумарні втрати води у закритій мережі.

Якщо розглядати мережу при відсутності регулюючих ємностей ($\Delta W_{вхс}$ = *0),* а втрати води у закритій мережі прирівняти до нуля, то об'єм поданої води дощувальною машиною на поле, випаровування при поливі, поверхневий скид можна (і доцільно) виразити через поливну норму нетто, а втрати опадів і поливної води на вертикальний скид, підпитку ґрунтовими водами виразити через вологообмін. Формула водного балансу в такому випадку для ВГС прийме наступний загальновідомий вигляд:

$$W_\tau = W_{\tau-1} + O_\tau + P_\tau - E_\tau \pm G_\tau, \quad (3)$$

де W_τ – запас вологи у ґрунті на кінець τ-ої доби (розрахункового періоду); $W_{\tau-1}$ – запас вологи у ґрунті на початок розрахункового періоду (або кінець попереднього періоду); O_τ – сума опадів за розрахунковий період; E_τ – сумарне випаровування води з поля за той же період; G_τ – приток (або відтік) вологи в кореневмісний шар ґрунту (з кореневмісного шару ґрунту) за рахунок вологообміну між шарами ґрунту; P_τ – величина поливної норми.

Особливістю моделі водного балансу є те, що шуканий об'єм вологи у ґрунті є неявною функцією, так як вологообмін, який вхо-

дить до складу моделі, залежить від шуканої функції (вологості ґрунту) і це ускладнює розрахунок.

На даний час широко використовується спрощений розрахунок водного балансу. При цьому обсяг вологообміну приймається усередненим за розрахунковий період в долях від поданої води на зрошення або взагалі вважається, що вологообмін відсутній. В другому випадку вважається, що система управління зрошувальною системою спроможна не допустити відхилення вологи ґрунту за допустимі межі, а волога в ґрунті пересувається переважно за рахунок гравітаційних сил і в цьому випадку розміром вологообміну можна знехтувати. Застосування такого підходу вимагає коректного обґрунтування умов, для яких такий підхід може бути застосований, що вимагає в свою чергу проведення певних досліджень.

Точність розрахунків за моделлю (3) в значній мірі визначається точністю врахування вологообміну *G*. Модель вологопереносу в ґрунті, за якою встановлюється обсяг вологообміну, суттєво нелінійна функція і обсяг вологообміну залежить не лише від середньої вологості ґрунту в кореневмісному шарі ґрунту, але і від характеру розподілу вологи по глибині профілю ґрунту; пересування вологи в ґрунті залежить не лише від гравітаційних сил, але і від капілярних, тощо [6]. Це ускладнює процес визначення об'єму вологообміну з достатньою точністю.

Необхідність в процесі експерименту враховувати вплив на функціонування зрошувальної системи різних збурюючи факторів (для оцінки, аналізу та оптимізації її надійності) ще в більшій мірі ускладнює цей процес і робить імітаційне моделювання незамінним інструментом для вивчення питань надійності зрошувальних систем. Крім того, саме імітаційне моделювання надає можливість після проведення експериментів дати відповідь, чи коректно застосовувати вищевказане спрощення розрахунку водного балансу, чи ні; для яких саме умов це спрощення допустиме.

Враховуючи складний характер вологообміну у ґрунті і завдання експерименту (необхідно враховувати вплив тих чи інших передбачуваних і непередбачуваних факторів на динаміку вологи у ґрунті, а через неї – на динаміку і інших процесів; необхідно не лише підвищити точність розрахунку, але і зрозуміти механізм і характер впливу факторів на ці процеси) перевагу слід віддати більш точному розрахунку вологи у ґрунті з використанням одновимірного диференціального рівняння вологопереносу за методикою О.І. Голованова [6].

Не вдаючись до детального розгляду методики розрахунку вологопереносу (це не є предметом розгляду у цій публікації), розглянемо **структуру створеної імітаційної моделі**, яка дозволяє здійснити імітування внутрігосподарської зрошувальної системи, проводити числові експерименти на ПЕОМ.

Відмінною особливістю імітаційної моделі, що розглядається, як і всього підходу щодо дослідження функціонування гідромеліоративної системи, є врахування в процесі імітації множини різних внутрішніх та зовнішніх збурюючих факторів, які мають місце в процесі експлуатації зрошувальної системи і які виводять її з стану планового режиму.

Значна різноманітність впливів на процес функціонування зрошувальної системи, характер їх прояву (детальний їх розгляд виходить за межі цієї публікації) вимагає такого ж різноманіття для математичного та алгоритмічного опису впливу цих факторів на систему в складі імітаційній моделі.

З метою обійти такі ускладнення при врахуванні впливів різних факторів в імітаційній моделі, що вимагає певної уніфікації математичного та алгоритмічного опису, був використаний імовірнісно-статистичний принцип.

Характерною особливістю цього принципу є перехід від часткових до більш системних понять, яким є ймовірнісний стиль мислення. Граничним (частковим) випадком є схема жорсткого детермінізму.

В цьому випадку більшість збурюючих факторів в імітаційній моделі представляються як випадкові величини, поява яких (їх числові значення) задаються певних законом та числовими значеннями їх характеристик. В силу цього розгляд функціонування системи може бути тільки імовірнісним, тобто врахування стохастичності системи означає визнання принципової неможливості передбачити кожний з відхилень окремо, але можливість в тій чи іншій мірі оцінити їх імовірність.

Правомірність використання такого підходу до конкретних факторів і встановлення законів розподілу випадкових величин та їх параметрів повинна відповідати всім вимогам і правилам теорії ймовірностей і математичної статистики і може встановлюватись наступними шляхами:

- проведення натурних спостережень;
- проведення статистичного моделювання на ЕОМ;
- аналітичний розв'язок задач.

Зазначений підхід спрощує процес імітації, переносячи більш глибоке вивчення кожного фактору, якщо це необхідно, в розряд самостійної задачі. Відбувається покроковий пошук (уточнення) відповіді на поставлені питання. В цьому випадку також може бути використане імітаційне моделювання, аналітичні моделі або натурний експеримент. Тобто і задача пошуку відповідей розглядається також як багаторівнева, що передбачає досягнення необхідного результату на кожному рівні системи покроково.

В нашому випадку в імітаційній моделі ВГС використовуються імовірності закони появи випадкових величин (подій) та числові значення їх параметрів.

Для подальшого пояснення суті роботи імітаційної моделі слід зазначити, що всі збурюючи впливи на функціонування зрошувальної системи, їх характер прояву можна поділити на явні та приховані, на керовані на некеровані.

В кінцевому підсумку всі фактори в явному або прихованому вигляді проявляються у вигляді точності врахування елементів водного балансу, які представлені у формулі (3). Точність урахування елементів водного балансу, степінь переносу строку поливу може залежати як від одного фактору, так і від сполучення декілька.

Для запобігання появи таких збурюючих впливів, їх усунення при появі або зниження негативного впливу здійснюються відповідні управляючі дії на етапі перспективного планування (заздалегідь, при проектуванні системи), або в процесі оперативного планування (в процесі експлуатації системи) [3]. Функція розподілу випадкової величини, що використовується в імітаційній моделі, значення її параметрів враховує не лише вплив певного фактору («навантаження» на систему, використовуючи термінологію теорії надійності), але також може враховувати і певну систему протидії цьому у вигляді певної системи управління – управляючих впливів («опір» системи).

Побудована імітаційна модель ВГС дозволяє давати оцінку надійності системи, її оптимізовувати, оцінювати вплив тих чи інших збурюючих факторів та управляючих впливів на надійність системи. Саме з такою метою і була ця модель побудована.

Характер управляючих впливів у значній мірі залежить від явного або прихованого характеру прояву збурюючих факторів.

З усіх збурюючих факторів слід виділити динаміку метеорологічних умов, які впливають як на природний водний режим ґрунту, так і штучний (в процесі проведення зрошувальних меліорацій). Динамі-

чний характер метеофакторів вже не можна представити як випадкову величину. Це складна нестаціонарна випадкова функція, яка практично не піддається ні аналітичному опису, а ні статистичному. В цьому випадку метеорологічні фактори вводяться в імітаційну модель як детерміновані для конкретних реальних років.

На рисунку наведена **укрупнена блок-схема алгоритму стохастичної імітаційної моделі ВГС**.

У загальному вигляді імітаційний експеримент полягає в наступному.

Імітується динаміка вологи у ґрунті з урахуванням прийнятої стратегії призначення строків поливу. Одночасно імітується вплив на систему різних збурюючих факторів, прояв яких носить або прихований характер (точність врахування елементів водного балансу), або явний (відмови технічних елементів, порушення технології поливу, нестача зрошувальної води з причини обмеження водних ресурсів або пропускної здатності мережі, тощо).

В зв'язку з наявністю явних та скритих проявів відмов імітаційна модель працює в двох режимах: «експлуатаційний режим» та «контрольний режим» (або «контроль»).

При «експлуатаційному режимі» враховуються лише явні відмови, що впливають на строк призначення проведення поливу. Цей режим використовується для призначення строків поливу, для оцінки надійності функції «планування» при управлінні системою, аналізу та оптимізації цієї функції.

При «контролі» враховуються і скриті відмови, тобто імітується як би фактичний режим вологи у ґрунті, який формується під впливом стохастичних процесів, впливу на систему імовірнісних факторів. Використовується цей режим для оцінки, аналізу і оптимізації всіх функцій управління, ступеня впливу на надійність системи технічних об'єктів.

В процесі імітації набирається статистика відхилень вологи у ґрунті від встановлених рівнів з урахуванням їх «тяжкості», збитків; ведеться розрахунок критеріїв надійності.

Врахування відхилень вологи у ґрунті ведеться для двох варіантів:

- відхилення W від оптимального для сільськогосподарської культури рівня та нульового рівня вологообміну G;

- відхилення *W, G* від прийнятих рівнів регулювання вологи у ґрунті, при досягненні яких призначається полив та величина поливної норми [7].

- Управляючи впливи, що оптимізуються, можуть враховуватись в імітаційній моделі або у вигляді вибору стратегії призначення строків поливу, або через параметри (закони) випадкових значень.

Закон розподілу випадкових відхилень сумарного випаровування, об'єму зрошувальної води, опадів, вологості ґрунту прийнятий за результатами натурного експерименту в умовах півдня України «нормальним».

Кінцевою метою імітації появи відмов технічних об'єктів є отримання інформації про зміщення (затримку) строків поливу, що прогнозуються, з даної причини.

Вхідною інформацією для формування часу появи і усунення відмов є як параметри «експоненціального» закону розподілу λ, яким описується час напрацювання на відмову і час його поновлення, так і морфологічна структура мережі, організація поливів. Числові значення λ були отримані експериментальним шляхом на зрошувальних системах півдня України.

- Імітаційна модель дозволяє вносити різні значення її параметрів (параметри λ відмов техніки, параметри нормального розподілу випадкових відхилень елементів водного балансу; завчасність прогнозу; стратегію призначення строків поливу і поливної норми; тривалість поливу всього поля; тривалість поливу на протязі доби; стратегію корегування строку поливу при появі опадів та ін.). При цьому окрема інформація, значення параметрів для зручності проведення експериментів вводиться в модель з екрану комп'ютера: експлуатаційний та контрольний режим розрахунку; повний (за весь поливний сезон), або неповний (за обрану частку вегетаційного періоду); строки поливу, що прогнозуються або призначаються; відмови технічних об'єктів враховуються або не враховуються; вихідне число для формування випадкових чисел. Якщо розрахунок ведеться за цілий вегетаційний період, то з екрана ПЕОМ вводиться команда на розрахунок для певного року забезпеченості за дефіцитом водного балансу (5, 25, 50, 75, 95%); якщо розрахунок ведеться за короткий, довільної довжини період часу, то з екрану вводиться вхідна інформація про сумарне випаровування, опади, фази розвитку рослин та ін.

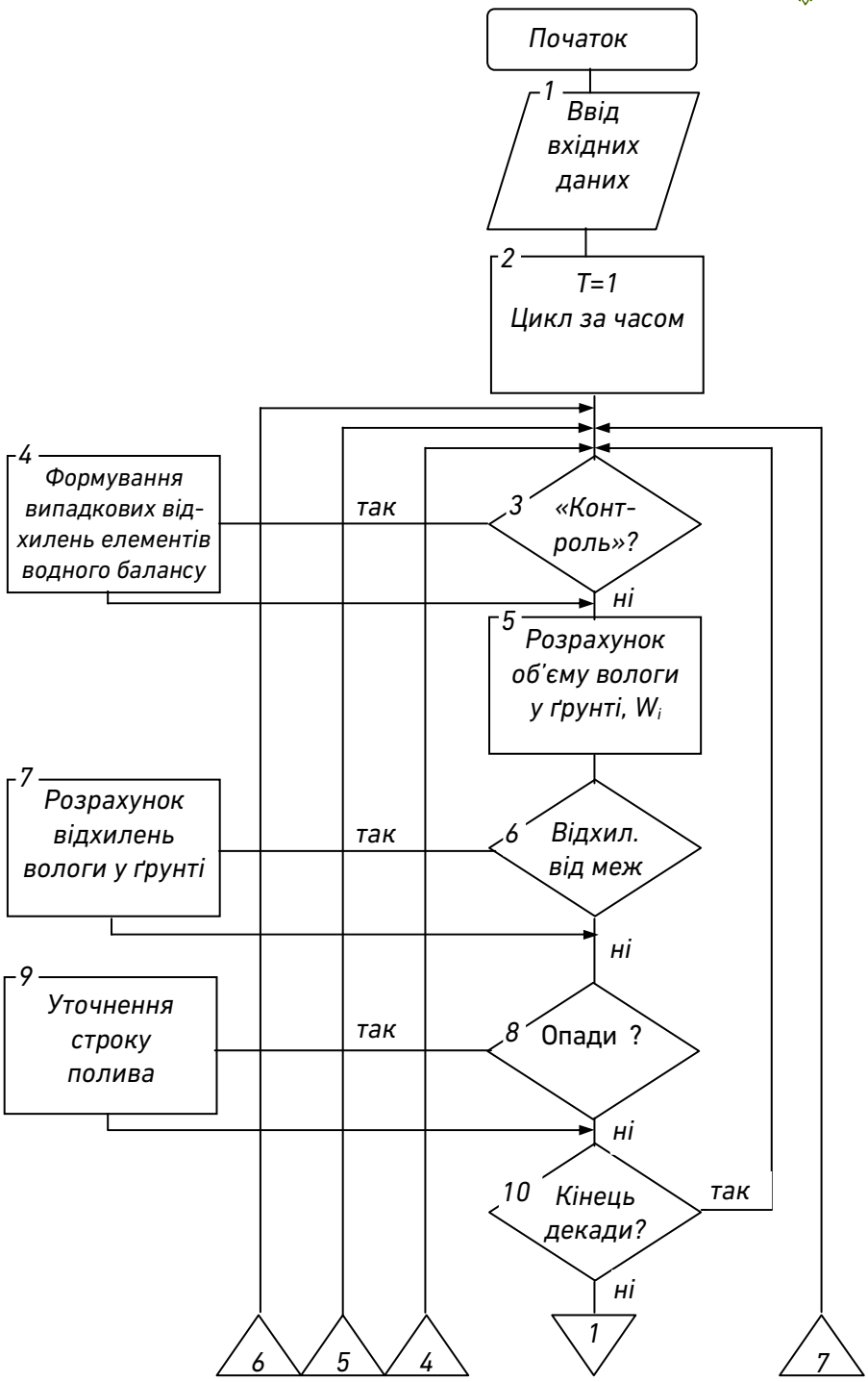
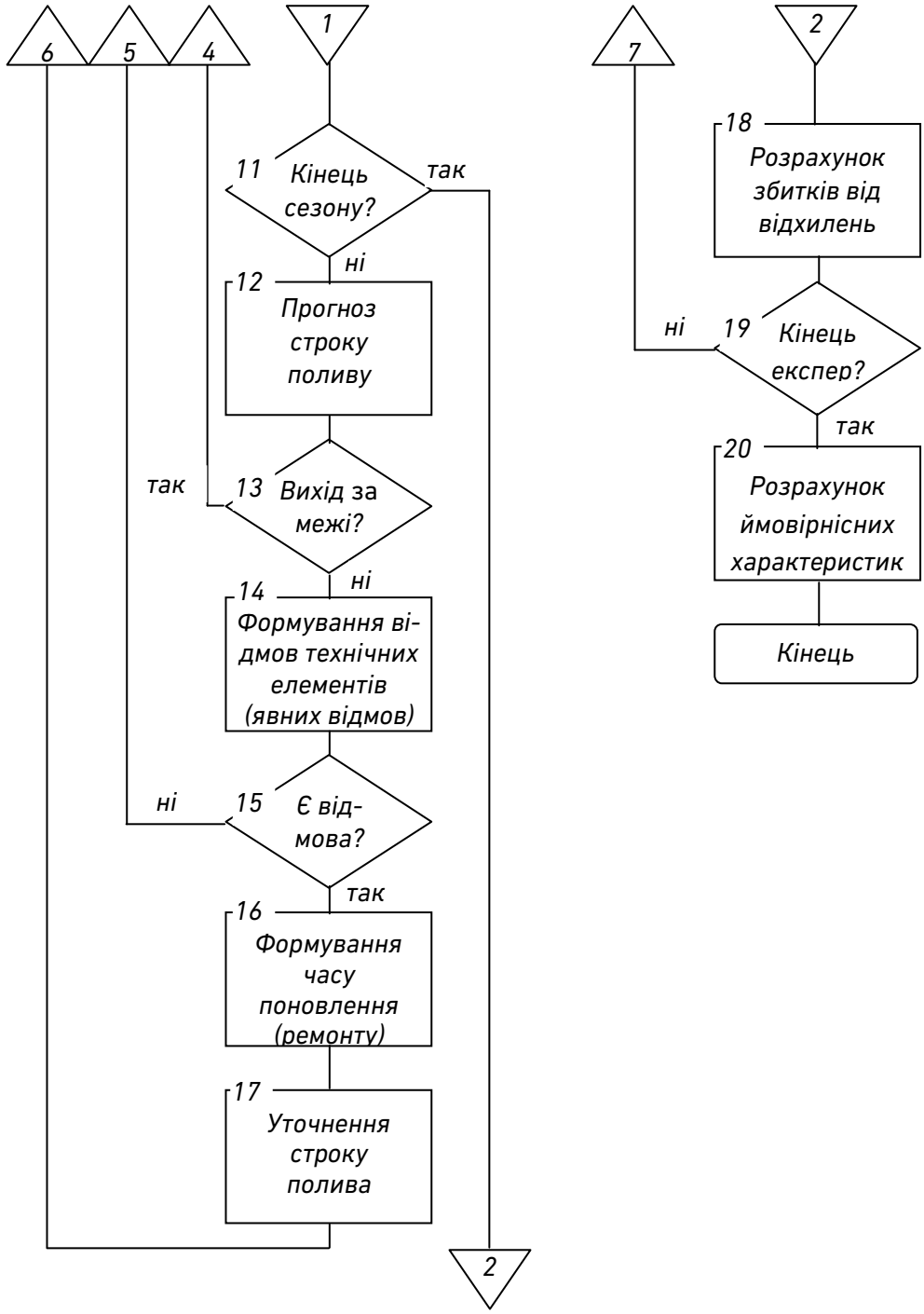


Рисунок. Укрупнена блок-схема стохастичної імітаційної моделі внутрігосподарської частини зрошувальної системи



Продовження рисунка. Укрупнена блок-схема стохастичної імітаційної моделі внутрігосподарської частини зрошувальної системи

Імітаційна модель на початку експерименту також дозволяє задати з екрану ПЕОМ кількість прогонів моделі, змінюючи автоматично на початку кожного прогону вхідне число для формування випадкових чисел; задається один з двох варіантів інформації, що виводиться: неповний – з виводом інформації подекадно і за сезон про збитки, значення показників надійності; вологості ґрунту у розрахунковому шарі за останню добу декади; данні виводяться при розрахунку від оптимального рівня для рослини і від допустимих меж; виводиться інформація про врожайність сільськогосподарської культури, баланс гумусу у ґрунті і величина сумарного випаровування, імовірність безвідмовної роботи на кінець сезону; повний – крім вищезазначеного виводиться динаміка елементів водного балансу, динаміка вологості ґрунту за заданий період часу пошарово у двохметровому шарі ґрунту, відомості про відмови техніки.

При «експлуатаційному режимі» розрахунку при першому прогоні моделі формується поливний режим; при автоматичному переході на наступні цикли (прогони) в режимі «контролю» поливний режим залишається тим же, змінюються лише випадкові числа, які формують величину випадкових відхилень елементів водного балансу.

При кількості прогонів в автоматичному режимі «контроль» більше трьох видаються результати статистичної обробки інформації, що виводиться: математичне сподівання, коефіцієнт варіації, коефіцієнт асиметрії випадкових чисел.

При проведенні експерименту використовується в основному варіант з неповним виводом інформації. При більш глибокому вивченні процесів, що відбуваються на системі, виводиться повна інформація, яка аналізується, як правило, з екрана комп'ютера (можна і роздрукувати).

На екрані комп'ютера в динаміці відображається зміна вологості ґрунту в межах встановлених рівнів (оптимальних та допустимих) для різних контролюючих параметрів (для урожаю сільськогосподарських культур, для вологи та гумусу ґрунту); відображається поява відмов технічних об'єктів та час їх усунення. Це дозволяє аналізувати, спів ставляти, пояснювати отримані числові значення параметрів та критеріїв з інформацією на екрані комп'ютера.

Проведення експерименту на імітаційній моделі передбачає попереднє планування експерименту, яке полягає у сукупності дій, що направлені на розробку стратегії експерименту від початкових до завершальних етапів вивчення об'єкту дослідження (від отримання

апріорної інформації до отримання необхідної інформації у відповідності з завданням експерименту). Розгляд цього питання виходить за межі цієї публікації.

Створена імітаційна модель дозволила отримати достатньо багато відповідей з питань функціонування зрошувальної системи оцінки та оптимізації її надійності, оцінки впливу тих чи інших факторів та управляючих дій на надійність системи, зробити висновки і надати необхідні поради виробництву з цих питань, які висвітлені в різних публікаціях автора.

Одночасно зазначена модель широко використовувалась і з навчальною метою в процесі роботи зі студентською молоддю при виконанні курсових та дипломних проектів, магістерських робіт, проведенні студентської наукової роботи.

Імітаційна математична модель стала тренажером для вивчення студентами тих чи інших процесів в складі навчального курсу в університеті.

Слід зазначити, що розробка та застосування такого характеру моделей дозволяє студентам глибше зрозуміти характер різних природних та технологічних процесів, бачити наслідки прийнятих тих чи інших рішень, формує в них допитливість, бажання пізнати їх більш глибоко.

Саме через ПЕОМ та математичні моделі на кафедрі водогосподарського будівництва вдалося не лише залучити значну частину студентської молоді до наукової роботи, але і розкрити їх потенціал, здібності, бажання вчитись.

Студенти не лише використовували існуючи комп'ютерні технології, але і приймали безпосередню участь у їх розробці, які до цього часу залишаються актуальними для використання у навчальному процесі [8,9,10].

Серед таких тренажерів, окрім розглянутої імітаційної моделі, слід виділити «Систему сіткового планування та управління», «Кошторис», «Канал», «Будівельний кран», «Статистика» та інші, які у своїй більшості працюють в різних режимах для реалізації різних дидактичних функцій (режимах навчання, оцінки знань і навичок, оптимізації, тощо). Це дозволяло самим студентам оцінювати себе і надавати оцінку не лише своїм знанням, але і отриманим навичкам і є найбільш важливою складовою навчального процесу; є значно кориснішими з дидактичної точки зору і складнішими з точки зору створення таких комп'ютерних технологій навчання.

Дидактичні аспекти використання таких технологій виходять за межі завдання цієї публікації.

1. Максимей И. В. Имитационное моделирование на ЭВМ. М. : Радио и связь, 1988. 231 с. **2.** Шеннон В. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М. : Мир, 1978. 488 с. **3.** Кір'янов В. М. Функціональний підхід дослідження надійності водогосподарських систем. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки*. 2015. Вип. 3(71). С. 42–56. **4.** Бусленко Н. П., Калашников В. В., Коваленко И. Н. Лекции по теории сложных систем. М. : Радио и связь, 1973. 400 с. **5.** Киенчук А. Ф. Водораспределение на оросительных системах. К. : Урожай, 1989. 176 с. **6.** Голованов А. И., Новиков О. С. Математическая модель переноса влаги и растворов солей в почвогрунтах на орошаемых землях. *Тр. МГМИ*. М., 1974. Том 36. С. 87–95. **7.** Кір'янов В. М. Застосування математичних методів і моделей оптимального управління при регулюванні водного режиму в зрошувальних меліораціях на засадах гідроінформатики. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки*. 2019. Вип. 1(85). С. 40–55. **8.** Кір'янов В. М., Сирота І. Н. Застосування ПЕОМ при вивченні студентами розділу «Сітьове планування і управління будівництвом». *Тези доповід. Міжнародн. наук.-методичн. конференції*. Рівне : УДАВГ, 1995. **8.** Кір'янов В. М., Гамазін Д. В. Комп'ютерна технологія навчання «Кошторис». *Вісник РДТУ*. 2000. Вип. 3(5). Ч. 1. С. 113–116. **9.** Кір'янов В. М., Штирбулов О. Д. Комп'ютерна технологія навчання по підбору будівельного крану. *Вісник РДТУ. Сер. Технічні науки*. 2000. Вип. 3(5). С. 56–63. **10.** Кір'янов В. М. Впровадження наскрізної програми комп'ютеризації навчального процесу на кафедрі водогосподарського будівництва. *Нова педагогічна думка* : матер. VIII всеукр. конфер. журнал. Рівне, 2007. С. 551–558.

REFERENCES:

1. Maksimey I. V. Imitatsionnoe modelirovanie na EVM. M. : Radio i svyaz, 1988. 231 s. **2.** SHennon V. Imitatsionnoe modelirovanie sistem – iskusstvo i nauka. M. : Mir, 1978. 488 s. **3.** Kirianov V. M. Funktsionalnyi pidkhid doslidzhennia nadiinosti vodohospodarskykh system. *Visnyk NUVHP. Ser. Tekhnichni nauky*. 2015. Vyp. 3(71). S. 42–56. **4.** Buslenko N. P., Kalashnikov V. V., Kovalenko I. N. Lektsii po teorii slojnyih sistem. M. : Radio i svyaz, 1973. 400 s. **5.** Kienchuk A. F. Vodoraspredelenie na orositelnyih sistemah. K. : Urojay, 1989. 176 s. **6.** Golovanov A. I., Novikov O. S. Matematicheskaya model perenosa vlagi i rastvorov soley v pochvogruntah na oroshaemyih zemlyah. *Tr. MGMI*. M. : 1974. Tom 36. S. 87–95. **7.** Kirianov V. M. Zastosuvannia matematychnykh metodiv i modelei optymalnoho upravlinnia pry rehuliuvanni vodnoho rezhymu v zroshuvalnykh melioratsiiakh na zasadakh hidroinformatyky. *Visnyk NUVHP. Ser. Tekhnichni nauky*. 2019. Vyp. 1(85). S. 40–55. **8.** Kirianov V. M., Syrota I. N. Zastosuvannia PEOM pry vyvchenni stu¬dentamy rozdilu «Sitove planuvannia i upravlinnia budivnytstvom». *Tezy dopovid. Mizhnarodn. nauk.-metodychn.*

konferentsii. Rivne : UDAVH, 1995. **8.** Kirianov V. M., Hamazin D. V. Kompiuterna tekhnolohiia navchannia «Koshtorys». *Visnyk RDTU*. 2000. Vyp. 3(5). Ch. 1. S. 113–116. **9.** Kirianov V. M., Shtyrbulov O. D. Kompiuterna tekhnolohiia navchannia po pidboru budivelnoho kranu. *Visnyk RDTU. Ser. Tekhnichni nauky*. 2000. Vyp. 3(5). S. 56–63. **10.** Kirianov V. M. Vprovadzhennia naskriznoi prohramy kompiuteryzatsii navchalnoho protsesu na kafedri vodohospodarskoho budivnytstva. *Nova pedahohichna dumka* : mater. VIII vseukr. konfer. zhurnal. Rivne, 2007. S. 551–558.

Kirianov V. M., Doctor of Engineering, Professor (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

APPLICATION OF SIMULATION MODELING IN WATER MANAGEMENT TO ASSESS AND OPTIMIZE THE RELIABILITY OF WATER MANAGEMENT SYSTEMS

The issues of creating mathematical simulation models, their features, the role of simulation modeling are considered. The main attention is paid to the development and application of simulation modeling in the water industry to study the reliability of the irrigation system. A multi-level approach is used to build a simulation model, both in terms of the material object and the ways of obtaining the desired results. Water balance models of the farm part of the irrigation system, which are the basis of system management, are given. One-dimensional differential equation of moisture transfer is used in water balance calculations. To unify the mathematical and algorithmic description of the influence of various factors on the functioning of the irrigation system in the simulation model was used probabilistic-statistical principle, which simplifies the simulation process, transferring a deeper study of each factor in the category of independent task. All influences on the functioning of the irrigation system, their mode of manifestation are classified as overt and covert, controlled and uncontrolled. Ultimately, all factors are manifested in the form of accuracy in taking into account the elements of water balance. An enlarged block diagram of the algorithm of the stochastic simulation model of the farm part of the irrigation system is given. Due to the presence of visible and hidden manifestations of failures, the simulation model works in two modes: "operational" and "control". In the case of "operational" mode, only visible failures that affect the term of watering are taken into account. The "control" mode also takes into account hidden

failures, ie it simulates the actual regime of soil moisture, which is formed under the influence of stochastic processes. In the process of simulation, statistics of deviations of moisture in the soil from the established levels is gathered taking into account their "severity", losses; reliability criteria are calculated. The dynamics of the soil moisture change within the set levels is displayed on the computer screen; the occurrence of failures of technical objects and their repair time are displayed. The created simulation model was widely used for educational purposes in the process of working with student youth.

***Keywords*: mathematical modeling; simulation model; computer; water management; irrigation system; reliability; water balance; moisture transfer; probability-statistical principle.**

Кирьянов В. Н., д.т.н., профессор (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно),

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ВОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ И ОПТИМИЗАЦИИ НАДЕЖНОСТИ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ

Рассматриваются вопросы создания математических имитационных моделей. Основное внимание уделено разработке и применению имитационного моделирования для исследования надежности функционирования оросительной системы. В воднобалансовых расчетах используется одномерное дифференциальное уравнение влагопереноса. Для унификации математического и алгоритмического описания воздействия разных факторов на функционирование оросительной системы был применен вероятностно-статистический принцип. Наведена укрупненная блок-схема алгоритма стохастической имитационной модели внутрихозяйственной части оросительной системы. В процессе имитации набирается статистика отклонения влаги в почве от установленных уровней с учетом их «тяжести», ущербов; ведется расчет критериев надежности.

***Ключевые слова:* математическое моделирование; имитационная модель; ЭВМ; водное хозяйство; оросительная система; надежность; водный баланс; влагоперенос; вероятностно-статистический принцип.**