

**О.В. ЄФІМОВ**, д-р техн. наук, професор, зав. каф. НТУ „ХПІ”,  
**М.М. ПИЛИПЕНКО**, канд. фіз.-мат. наук, ст. н. с. ННЦ „ХФТІ” НАНУ,  
**Т.О. ЄСИПЕНКО**, н. с. НТУ „ХПІ”,  
**В.Л. КАВЕРЦЕВ**, канд. техн. наук, доцент НТУ „ХПІ”,  
**О.О. ЧУЯН**, студент НТУ „ХПІ»

## МЕТОДИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ І ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОГО УСТАТКУВАННЯ АЕС

Представлены примеры и обоснование необходимости применения математического, в том числе и имитационного, моделирования определения надежности и оптимизации параметров технологических процессов с целью создания и усовершенствования систем интеллектуальной поддержки, необходимых для автоматизированного управления сложными теплоэнергетическими системами.

Представлены примеры та обґрунтування необхідності застосування математичного, в тому числі і імітаційного, моделювання визначення надійності і оптимізації параметрів технологічних процесів з метою створення і удосконалення систем інтелектуальної підтримки, що необхідно для автоматизованого управління складними теплоенергетичними системами.

Examples and substantiation of necessity of application mathematical, including imitating modeling of definition of reliability and optimization of parameters of technological processes for the purpose of creation and improvement of systems of the intellectual support necessary for automated management of a difficult heat power systems are presented.

**Вступ.** Вирішення задач підвищення ефективності, надійності, екологічності і безпеки виробництва електричної, теплової та інших видів енергії тепловими і атомними електростанціями, являє для України важливу та актуальну проблему державного значення, яка безпосередньо пов'язана з енергетикою, енергозбереженням і запобіганням масштабних техногенних катастроф.

У зв'язку з цим постійно зростають вимоги до розробки нових ефективних теорій і методів аналізу якості функціонування і структурно-параметричного синтезу складних теплоенергетичних систем, їхньої діагностики і прогнозування надійності, як під час проектування, так і в процесі експлуатації. Це стосується теплоенергетичних об'єктів як вже діючих, так і нового покоління.

Тому на протязі багатьох років у світі постійно і послідовно проводяться фундаментальні наукові дослідження у напрямку розробки нових теорій і методів математичного, у тому числі, і імітаційного моделювання, визначення надійності та оптимізації параметрів технологічних процесів в енергетичному устаткуванні з метою створення та удосконалення систем інтелектуальної підтримки, що необхідні для автоматизованого управління складними теплоенергетичними системами. Особливого значення застосування систем інтелектуальної підтримки набуває в умовах відсутності або значної

невизначеності інформації о змінах параметрів технологічних процесів під час експлуатації складних теплоенергетичних систем.

**Постановка задачі.** Застосування методу математичного моделювання може бути показано на прикладі математичного моделювання і оптимізації параметрів парогенераторів АЕС з ВВЕР.

Для АЕС з ВВЕР розроблено декілька типів парогенераторів, які відрізняються не тільки принципами генерації пару, але і конструктивними характеристиками. Створення єдиної математичної моделі, яка б могла описати всі можливі типи парогенераторів для АЕС з ВВЕР і всю різноманітність їх конструктивних характеристик, представляє собою вельми складну і трудомістку задачу. Крім того, така модель в кожному випадку використання для конкретного типу парогенератора містила б надто великий об'єм надмірної інформації, яка необхідна для розрахунку інших типів парогенераторів, як з точки зору наявності вихідних даних, так і з точки зору наявності алгоритмів, які складають сутність моделі. У зв'язку з цим в практиці парогенераторобудування розробляються математичні моделі, кожна з яких описує відповідний тип парогенератора з урахуванням характерних для нього особливостей протікання технологічних процесів і конструктивних рішень окремих вузлів і елементів. Тим не менш, незалежно від технологічних і конструктивних особливостей парогенераторів принципи побудови їхніх моделей і алгоритми розрахунків подібні.

На рис. 1 представлена загальна логико-структурна схема розрахунку прямого гідкотрубного парогенератора для АЕС з ВВЕР.

Розрахунок парогенератора починається з визначення термодинамічних параметрів робочої речовини (води і водяної пари) у вузлових точках пароводяного циклу і визначення параметрів теплоносія в  $t-Q$  координатах. Потім виконується вибір з бази даних моделі (блок 1) значень вихідних даних, необхідних для проведення теплового розрахунку (блок 2), і перевірка обмежень по діаметру корпусу парогенератора, виходячи з заданих в першому приближенні значень зовнішніх і внутрішніх діаметрів трубок поверхонь теплообміну, швидкості теплоносія в трубках, кількості парогенераторів в енергоблоці та інших.

Для проведення теплового розрахунку поверхні теплообміну парогенератора розділяються на п'ять ділянок, які входять до економайзерної, випарувальної і пароперегрівальної частин парогенератору.

Після визначення у результаті теплового розрахунку (блок 3) площин поверхонь теплообміну парогенератора та довжини його трубок (блок 4) визначаються відстані між розподільними перегородками міжтрубної відстані і проводяться гідравлічні розрахунки першого і другого контурів парогенератора (блок 5). На основі одержаних значень гідравлічних опорів ділянок випарувальної і пароперегрівальної частин парогенератору здійснюється більш точний розрахунок площин їх поверхонь теплообміну з урахування уточненого значення температури насичення (блок 4).

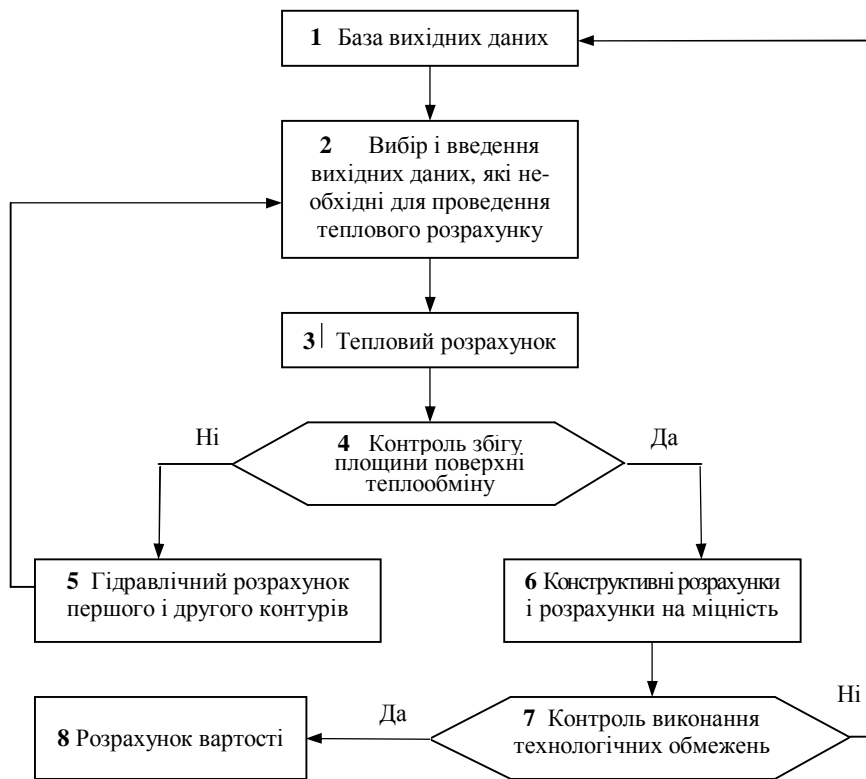


Рисунок 1. Загальна логико-структурна схема розрахунку прямооточного гладкотрубного парогенератора для АЕС з ВВЕР за допомогою математичної моделі

Після виконання конструктивних розрахунків і розрахунків на міцність елементів конструкції парогенератора (блок 6) перевіряються основні технологічні обмеження цих елементів конструкції (блок 7), в тому числі критична різниця відносних подовжень корпусу і трубок, товщини трубних дощок, товщина днища (еліптичного або сферичного), діаметри патрубків трубопроводів теплоносія і поживної води та інші. Якщо технологічні обмеження елементів конструкції парогенератора не виконуються, проводяться ітераційні розрахунки з введенням відповідних коректив в базу вихідних даних (блок 1). Останнім з технологічних обмежень елементів конструкції перевіряється висота парогенератора.

На останньому етапі розрахунків парогенератора за допомогою математичної моделі визначається його вартість методом укрупненого калькулювання (блок 8). Матеріальна складова вартості парогенератора

розраховується, виходячи з маси застосованих конструкційних матеріалів і їх сорторозмірів.

В математичній моделі парогенератора також використовуються інтерполяційні та апроксимаційні рівняння термодинамічних і теплофізичних властивостей води і водяної пари. Крім того, в математичній моделі використовуються рівняння, які описують механічні властивості застосованих конструкційних матеріалів.

У результаті проведення оптимізаційних розрахунків прямооточного гладкотрубного парогенератора за допомогою математичної моделі мають бути одержані його оптимальні техніко-економічні показники, такі як розрахункова довжина теплообмінних трубок; кількість трубок в одному парогенераторі; довжина і діаметр корпусу парогенератора; маса парогенератора.

Прикладом застосування методу імітаційного моделювання, для енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000, яке представляє великий інтерес як для проектувальників, так і для експлуатаційного персоналу АЕС, є визначення за допомогою імітаційної моделі енергетичних характеристик, що описують вплив температури поживної води на вході в парогенератори на електричну потужність, теплову економічність (питома витрата теплоти) і надійність енергоблоків.

На рис. 2 і рис. 3 представлені залежності змінювання споживчої турбоустановкою типу К-1000-60/1500, яка входить до складу цих енергоблоків АЕС, теплової потужності реактора ВВЕР-1000, її електричної потужності і питомої витрати теплоти на виробку електроенергії від температури поживної води на вході в парогенератори при постійній сумарній витраті свіжої пари на турбіну і другу ступінь проміжного пароперегрівача. Лінійна залежність  $Q$ , яка представлена на рис. 2, ілюструє необхідне для забезпечення номінальної електричної потужності енергоблоку підвищення теплової потужності реактора у випадку зниження температури поживної води.

Зниження температури поживної води імітується в математичній моделі шляхом вар'ювання значень недогрівів в регенеративних підігрівачах високого тиску і послідовним їх відключенням. Змінювання питомої витрати теплоти енергоблоків в діапазонах температур поживної води 180÷190 °С, 190÷210 °С и 210÷230 °С досягається змінюваннями недогрівів у відповідних підігрівачах, які поживляються паром з відборів турбіни.

Аналіз теплового циклу турбоустановки типу К-1000-60/1500 свідчить про те, що в межах одного і того ж діапазону температур поживної води потенціал гріючої пари не змінюється при змінюванні недогріву на відповідному цьому діапазону останньому працюючому підігрівачі. При переході з одного діапазону на інший у зв'язку з використанням для нагріву поживної води пари (підігрівача) від вище лежачого відбору турбіни різко змінюється і його потенціал.

Саме цим обумовлена кускова гладкість залежності питомої витрати теплоти  $q_1$  енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 від температури поживної води

$t_{п.в}$  (порушення гладкості – розрив першої похідної  $\partial q_1' / \partial t_{п.в}$  – відбувається в точках, що відповідають температурам 190 °С и 210 °С). На відміну від кривої  $q_1$  крива  $q_2$  є повністю гладкою по всьому діапазону температур поживної води 180÷230 °С, яке досліджується. Ця крива відображає змінювання економічності енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 при умовному безперервному змінюванні тиску грючої пари, що подається на останній працюючий регенеративний підігрівач, тобто коли потенціал грючої пари змінюється безперервно.

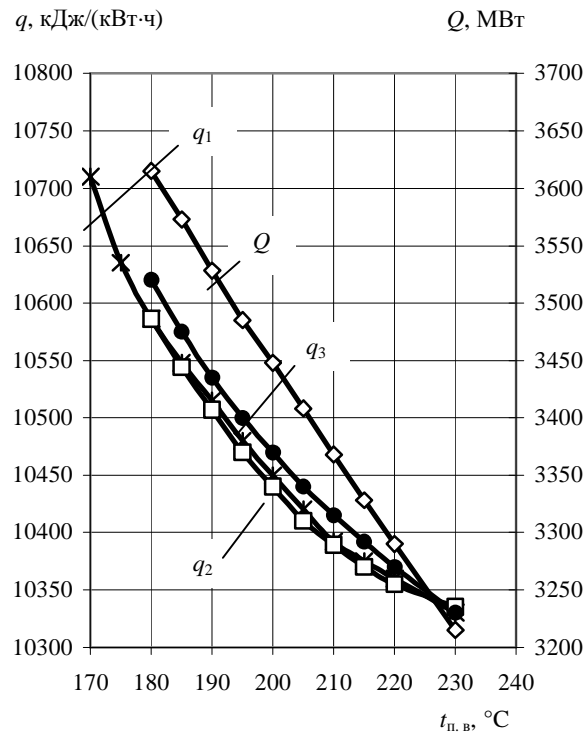


Рисунок 2 . Вплив температури поживної води на показники енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 і турбоустановкою К-1000-60/1500:

$q_1$  –×– змінювання питомої витрати теплоти при перемінній тепловій потужності реактора;  $q_2$  –□– змінювання питомої витрати теплоти при перемінній тепловій потужності реактора при умовному безперервному змінюванні тиску грючої пари;  $q_3$  –●– змінювання питомої витрати теплоти при постійній тепловій потужності реактора;  $Q$  –◇– змінювання теплової потужності реактору

Точки порушення гладкості кривої  $N_1$  (рис. 3), яка характеризує збільшення електричної потужності енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 при зменшенні температури поживної води на вході в парогенератори, відповідають тим же температурам, що і зломи кривої  $q_1$  та обумовлені тими ж причинами.

Криві  $Q$ ,  $q_1$ ,  $q_2$  и  $N_1$  є теоретичними (ідеалізованими) енергетичними характеристиками енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000, які здатні збільшувати без обмежень показників надійності теплову потужність реактора  $Q = var$ . Однак, на відміну від котельних агрегатів енергоблоків ТЕС, які працюють на органічному паливі, конструкції водо-водяних енергетичних реакторів і парогенераторів, які використовуються зараз в Україні і Росії, не дозволяють вар'їрувати теплову потужність реактора без суттєвого зниження рівня проектної надійності АЕС. Тому у теперішній час в реальних умовах експлуатації енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 при підтримці постійної теплової потужності реакторів  $Q = const$  зниження температури поживної води  $t_{п.в}$  на вході в парогенератори супроводжується відповідним зменшенням витрати свіжої пари, що вироблюється в них.

У зв'язку з цим представляють інтерес показані на рис. 2 і рис. 3 криві відносного змінювання теплової економічності  $q_3$  і електричної потужності  $N_2$  енергоблоків АЕС з ВВЕР потужністю 1000 МВт, які одержані при тих же вихідних передумовах, що і крива  $q_1$ , але при постійних значеннях теплової потужності реактора  $Q = const$  і надійності  $R = const$ .

Ці залежності наглядно підтверджують неможливість підвищення електричної потужності енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 за рахунок відключення одного чи декількох регенеративних підігрівачів високого тиску при постійній тепловій потужності реактора. При цьому необхідно відмітити, що збільшений по зрівнянню з кривою  $q_1$  вплив кривої  $q_3$  на теплову економічність енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 пояснюється погіршенням параметрів робочого циклу турбоустановки типа К-1000-60/1500 в наслідок зменшення тиску свіжої пари на вході в проточну частину турбіни. Коли б цього зменшення тиску не було (що можливо при корекції проточної частини турбіни під кожену температуру поживної води), то крива  $q_3$  лежала б нижче кривої  $q_1$ .

Характер змінювань енергетичних характеристик  $N_1$ ,  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $N_2$  и  $q_3$  свідчить про значний вплив температури поживної води  $t_{п.в}$  на вході в парогенератори на електричну потужність, теплову економічність і надійність енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 в цілому.

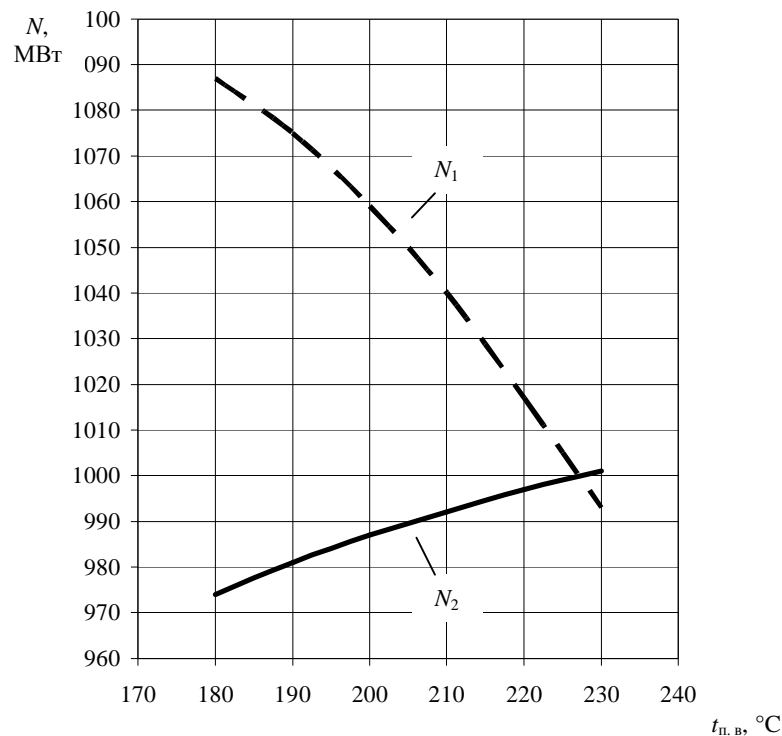


Рисунок 3. Вплив температури поживної води  $t_{п.в.}$  на електричну потужність енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 і турбоустановкою К-1000-60/1500:

$N_1$  – ----- – змінювання електричної потужності енергоблоків при перемінній тепловій потужності реактора;  $N_2$  – ——— – змінювання електричної потужності енергоблоків при постійній тепловій потужності реактора

**Виводи.** Приведені приклади доводять, що застосування методів математичного моделювання визначення надійності і оптимізації параметрів технологічних процесів в теплоенергетичному устаткуванні АЕС є необхідним і актуальним для вирішення задач контролю і автоматизованого управління складними теплоенергетичними системами.

*Надійшла до редколегії 00.00.08*

**О. В. ДОРОХОВ**, канд. техн. наук, ХНЕУ (Харків),  
**Д. АНТОВ**, PhD, TTU (Таллінн, Естонія)

### ВИКОРИСТАННЯ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ПОКРАЩАННЯ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

Розглянуто можливості використання засобів та мереж мобільного зв'язку для покращання транспортного обслуговування. Наведено та проаналізовано відповідну постановку завдань та практичний досвід вирішення питань паркування та оплати перевезень в умовах великого міста. Визначено особливості застосування такого підходу з урахуванням соціально-економічних умов, що склалися в Україні.

Рассмотрены возможности использования средств и сетей мобильной связи для совершенствования транспортного обслуживания. Приведена и проанализирована соответствующая постановка задач и практический опыт решения вопросов парковки и оплаты перевозок в условиях крупного города. Определены особенности применения такого подхода с учетом социально-экономических условий, которые сложились в Украине

Usage opportunities of mobile communication means and networks for perfection of transport service are considered. Corresponding statement of problems and practical experience for the decision of parking problems and payment of transportations in conditions of large city is resulted and analyzed. Features of application of such approach in view of social and economic conditions which have developed in Ukraine are certain.

**Вступ.** Вдосконалення транспортного забезпечення потреб економіки України, а також надання транспортних послуг населенню з огляду на підвищення вартості палива, значне екологічне забруднення навколишнього середовища, інфраструктурні труднощі розвитку великих промислових центрів стає надзвичайно важливим та складним завданням.

Серед засобів його вирішення значне місце займають сучасні інформаційні та телекомунікаційні технології [1, 2].

**Формулювання проблеми.** В умовах поширення мобільного зв'язку та мережних технологій з'являється можливість та постає завдання їх ефективного використання для розв'язання в режимі реального часу складних динамічних задач як організації дорожнього руху, так і вантажного й пасажирського транспортного обслуговування, зокрема, організації паркування транспортних засобів та оплати проїзду на міському громадському транспорті [2, 3].

**Вирішення проблеми.** Розглянемо модель організації мобільної оплати транспортних послуг як таку, впровадження якої не потребує значних матеріальних вкладень, значною мірою є забезпеченою вже існуючими технічними, кадровими, програмними ресурсами, може бути реалізованою за відносно стислий проміжок часу, дати значний соціально-економічний ефект.