

---

УДК 621.311

**О.І. Стасюк**, д-р техн. наук, **Л.Л. Гончарова**, канд. техн. наук  
Державний економіко-технологічний університет транспорту  
(Україна, 03049, Київ, вул. Лукашевича, 19,  
тел. 0504193874, e-mail: X177@rambler.ru)

## **Математичні моделі і методи комп'ютерного керування електропостачанням залізниць на основі диференціальних перетворень Пухова**

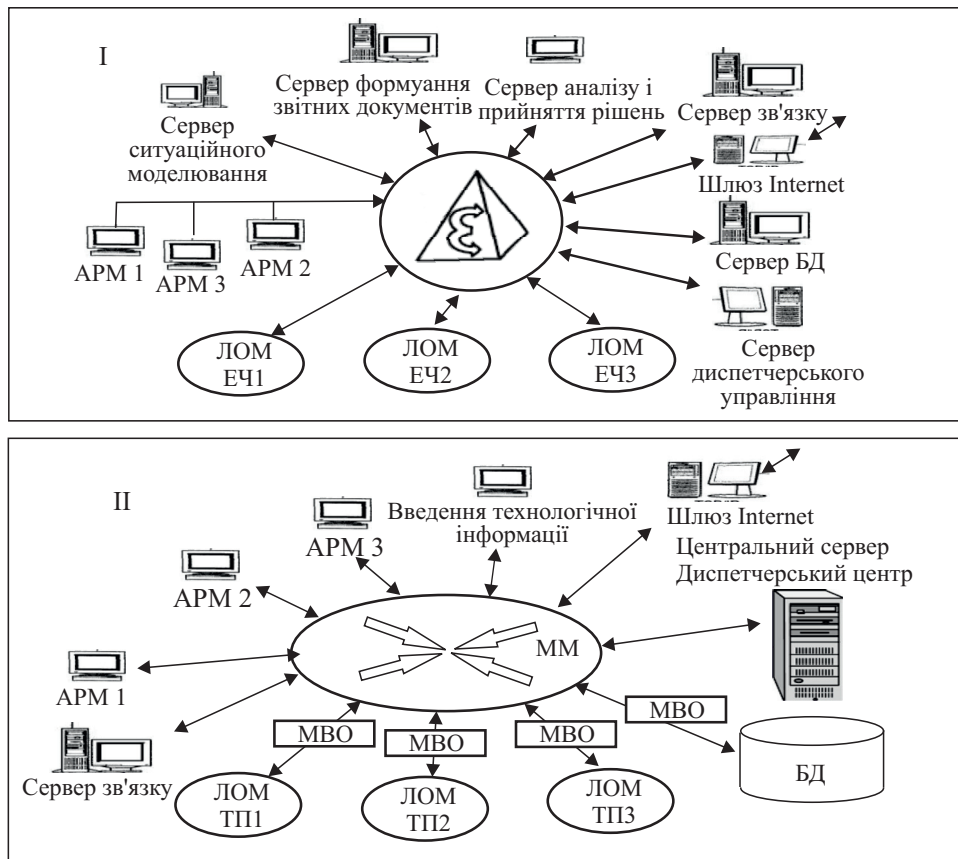
Наведено результати аналізу сучасного стану наукових досліджень в області інтелектуалізації електричних мереж залізниць. Показано, що актуальною проблемою є створення математичних моделей і методів формування нових знань шляхом підвищення рівня інформативності первинних даних. На основі математичного апарату диференціальних перетворень розроблено математичні моделі для покращення рівня інформативності даних, отриманих при реєстрації аномальних режимів систем електропостачання. Запропоновано комп'ютерно-орієнтовані методи організації інтелектуального обчислювального процесу з використанням диференціальних зображень для проведення спектрального і кореляційного аналізу первинної інформації.

Приведены результаты анализа современного состояния научных исследований в области интеллектуализации электрических сетей железных дорог. Показано, что актуальной проблемой является создание математических моделей и методов формирования новых знаний путем повышения уровня информативности первичных данных. На основе математического аппарата дифференциальных преобразований разработаны математические модели для повышения уровня информативности данных, полученных в результате регистрации аномальных режимов систем электроснабжения. Предложены компьютерно-ориентированные методы организации вычислительного процесса с использованием дифференциальных изображений для проведения спектрального и корреляционного анализа первичной информации.

*К л ю ч о в і с л о в а: математичні моделі, диференціальні перетворення, інтелектуалізація, стохастичні процеси, оптимізація, інтелектуальна обробка інформації.*

Вирішення комплексної проблеми, пов'язаної з проведенням сукупності процедур, направлених на оптимізацію електропостачання залізниць, зменшення загальносистемних витрат, створення нових енергозберігаючих технологій та покращення безпеки руху при незначних інвестиціях, стало можливим завдяки застосуванню нових математичних моделей, комп'ютерно-орієнтованих методів та сучасних мережевих і інформаційних тех-

© О.І. Стасюк, Л.Л. Гончарова, 2016



нологій інтелектуалізації швидкоплинних процесів постачання електроенергії на тягу [1—4]. Подібне інноваційне перетворення тягових електричних систем відкриває широкі можливості реалізації в реальному часі безперервного моніторингу комплексу параметрів режимів електропостачання і проведення оптимізації, планування мережі електропостачання, зміни параметрів топології електромережі за поточними режимними умовами, регулювання навантаження. Це дозволяє складати прогноз та проводити аналіз виникнення і розвитку аварій, а також розширення ринкових можливостей інтелектуальної електричної мережі шляхом взаємного надання широкого спектру послуг між суб'єктами ринку і інфраструктурою електричної системи [3, 6].

Застосування сучасних комп'ютерних мереж та інформаційних технологій керування електропостачанням залізниць відкрило новий етап в області комп'ютерної інтелектуалізації електричних систем і створило підґрунтя для формування нових знань, розробки сучасних технологій енергозбе-

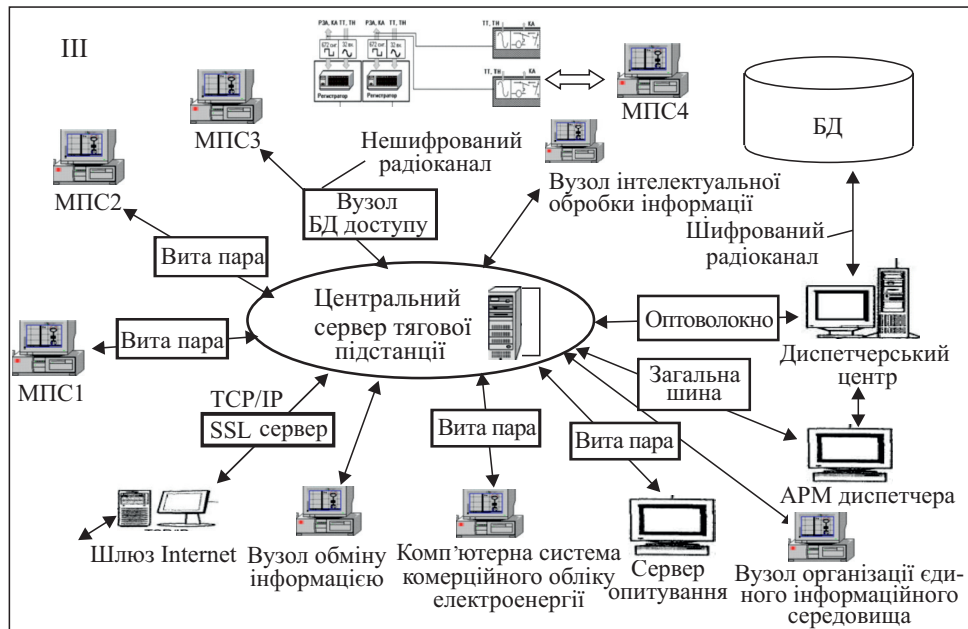


Рис. 1. Тривірнева архітектура комп'ютерної системи керування електропостачанням залізниць: I — рівень залізниць; II — рівень дистанції електропостачання; III — рівень тягової підстанції; АРМ1, АРМ2, АРМ3 — автоматизоване робоче місце відповідно управління і координації, диспетчера, звітних диспетчерів; магістральний маршрутизатор; МВО — маршрутизатор віддалених офісів; ЛОМ ЕЧ1 — ЛОМ ЕЧ3 — локальні обчислювальні мережі дистанції енергопостачання; ЛОМ ТП1, ЛОМ ТП2, ЛОМ ТП3 — локальна обчислювальна мережа відповідно опорної тягової підстанції, транзитної тягової підстанції і тупикової підстанції; МПС1—МПС4 — мікропроцесорні системи моніторингу відповідно діелектричних параметрів силових трансформаторів високовольтної ізоляції, збору інформації релейного захисту, високовольтних вимикачів синхронізації, контактної мережі ЕРП, СЦБ; БД— база даних аварійної і комерційної інформації

реження та безпеки швидкісних перевезень. Концепція «розумної» енергетики стимулювала проведення наукових досліджень в області розробки нових принципів організації комп'ютерних архітектур безперервного моніторингу комплексу параметрів режимів енергосистем, математичних моделей з інтелектуальними властивостями для формування і накопичування нових знань, що відображають особливості швидкоплинних технологічних процесів електроенергетики, а також моделей для визначення характеристик комп'ютерних архітектур керування електропостачанням залізниць.

Аналіз останніх досліджень в області організації інтелектуальних електромереж і силового електричного обладнання тягових підстанцій показав, що існує значний негативний вплив, обумовлений особливостями

систем залізничної енергетики, на економічність режимів постачання електроенергії, збільшення незапланованих витрат в процесі електроспоживання і погіршення надійності функціонування тягових електросистем [3—6]. Особливість топології електричних систем залізниць проявляється в значній несиметричності напруги живлення і несинусоїдальності, оскільки процес живлення реалізується між фазами  $U_a(t) - U_c(t)$  або  $U_b(t) - U_c(t)$ , а велика нерівномірність рухомих навантажень суттєво впливає на режими функціонування залізничної автоматики, системи захисту, а також стимулює розвиток системних аварій [6—9]. Аналіз світових наукових досліджень показав, що перспектива розвитку систем електропостачання базується на сучасних SMART Grid технологіях, в основі яких лежить модель інтелектуальних електричних мереж [2, 9, 10]. Подібні моделі базовані на принципах саморегуляції, самовідновлення, єдиного інформаційного простору первинної інформації, сформованого на загальносистемних позиціях, що в сукупності представляє собою аналізуючу, самоконтролюючу та звітуючу технологію в умовах ринку.

Застосування сучасних мережевих і інформаційних технологій для керування швидкоплинними технологічними процесами електропостачання засвідчило, що для розв'язання загальної проблеми інноваційного перетворення тягових електричних мереж залізничного транспорту домінуючою є розробка моделей визначення повної інформативності зареєстрованих первинних даних.

На основі теорії диференціальних перетворень побудуємо математичні моделі та комп'ютерно-орієнтовані методи визначення інформативності зареєстрованих багатоаспектних первинних даних, що відображають штатні і аномальні режими складних енергетичних об'єктів та систем.

**Комп'ютерне керування електроспоживанням.** Результати дослідження процесів еволюційного розвитку систем електропостачання і комп'ютерних мереж управління електроспоживанням свідчать про те, що в теперішній час популярною є концепція «розумної енергоефективності» як відображення інтелектуальної взаємодії ефективності використання ресурсів, оптимізації швидкоплинних технологічних процесів електропостачання і комерційного ціноутворення [1, 3]. Сформувалась нагальна проблема інноваційного перетворення електричних мереж шляхом створення інтелектуальних енергосистем нового покоління.

Базовим інструментарієм при інноваційно-інвестиційних перетвореннях електричного господарства є інтелектуально-комп'ютерне середовище і перспективні інформаційні технології енергозбереження як основи створення інтелектуальних, самонавчаючихся, адаптивних мереж електропостачання на тягу. Архітектура розподіленого комп'ютерного середовища корпоратив-

ної системи оперативного управління і оптимізації процесів електропостачання залізничному транспорту представлена на рис. 1.

Перший рівень I обчислювальної архітектури єдиного комп'ютерного середовища орієнтований на управління технологічними процесами електропостачання тягових підстанцій представлено у вигляді спеціалізованої локальної комп'ютерної мережі, структура якої відображає топологію відповідного сегмента енергосистеми [2].

На другому рівні II ієрархії розподіленого комп'ютерного середовища реалізовано регіональне управління електропостачанням. Топологію логічної структури комп'ютерної мережі на рівні II організовано у вигляді зірки, сегментами якої є локальні обчислювальні мережі тягових підстанцій. Обмін інформацією між локальними обчислювальними мережами тягових підстанцій і комп'ютерними мережами дистанції електропостачання реалізується за допомогою магістрального маршрутизатора.

Рівень III розподіленого комп'ютерного середовища представлено у вигляді корпоративної обчислювальної мережі. Він орієнтований на оперативне та диспетчерське керування електропостачанням окремої залізниці. Комп'ютерна мережа цього рівня — це набір регіональних обчислювальних мереж і спеціалізованих комп'ютерних компонентів, об'єднаних між собою високошвидкісними лініями зв'язку, які забезпечують обмін інформацією. Особливість корпоративної обчислювальної мережі третього рівня полягає в необхідності проводити стратегічне моделювання режимів енергосистеми, обчислювати запас надійності, визначати комерційну вартість електроенергії, що споживається на тягу, оптимізувати процес електроспоживання та формувати сучасні технології енергозбереження. Однією із головних задач корпоративної мережі є інтелектуальна обробка інформації та представлення отриманих нових знань у вигляді готових альтернативних рішень диспетчерському персоналу.

**Математичні моделі обчислення інформативності.** В процесі керування постачанням електроенергії залізницям на рівні тягових підстанцій в локальній обчислювальній мережі окремими її комп'ютерними компонентами здійснюється реєстрація комплексу аналогових, дискретних, цифрових і інших сигналів, що відображають штатні, аномальні та аварійні режими функціонування електромережі. Зареєстровані первинні дані є базовими для отримання повної інформативності про режими електромережі, яка забезпечує організацію і накопичування нових знань для оптимізації електроспоживання, інтелектуалізації інноваційних комп'ютерних технологій енергозбереження та покращення безпеки руху.

Для визначення повної інформативності зареєстрованих багатоаспектних первинних даних використовуємо, наприклад, сукупність миттєвих зна-

чень напруги  $u(t_0), u(t_1), u(t_2), \dots, u(t_j), u(t_m)$ , які відображають штатні і аварійні режими на всьому інтервалі  $T$  аномального процесу. Синтез математичних моделей і методів для визначення повної інформативності, із сукупності первинних інформаційних даних, реалізуємо на основі теорії диференціальних перетворень Пухова, фундаментальні поняття якої представлені наступними математичними залежностями [5]:

$$U_j(k) = \frac{H^k}{k!} \left[ \frac{d^k u(t)}{dt^k} \right]_{t=t_j} \quad \bar{=} \quad u(t) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \left( \frac{t}{H} \right)^k U_j(k), \quad (1)$$

де  $u(t)$  — первісна функція аргументу  $t$ , яку можна  $f$ раз диференціювати і яка має ряд відповідних обмежень, включаючи свої похідні;  $U_j(k)$  — зображення функції-оригіналу  $u(t_j)$ , яке представляє собою дискретну функцію  $U_j(k)$  цілочислового аргументу  $k = 0, 1, 2, \dots$ ;  $H$  — масштабний коефіцієнт, який має таку саму розмірність, що й аргумент  $t$ , в більшості випадків вибирається за умови  $0 \leq t \leq H$ , тобто на всьому діапазоні, функції-оригіналу  $u(t_j)$ ;  $\bar{=}$  — символ, що характеризує відповідність між оригіналом і його диференціальним  $T$ -зображенням  $U_j(k)$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ . Пряме диференціальне перетворення в (1) ліворуч від символу  $\bar{=}$  дозволяє сформувати диференціальне  $T$ -зображення функції-оригіналу  $u(t_j)$  у вигляді дискретної функції  $U_j(k)$  цілочислового аргументу  $k = 0, 1, 2, \dots$ . Отримання функції-оригіналу  $u(t_j)$  із сукупності значень  $T$ -дискрет функції цілочислового аргументу  $U_j(k)$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ , може бути реалізовано на основі зворотного диференціального перетворення, яке розташовано праворуч від символу  $\bar{=}$  в (1). Використавши пряме диференціальне перетворення

$$u(k) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \left( \frac{t}{H} \right)^k U_j(k),$$

сформуємо систему алгебраїчних рівнянь  $n$ -го порядку при  $t_0$  [5]:

$$\begin{aligned} \frac{t_1}{H} U_0(1) + \left( \frac{t_1}{H} \right)^2 U_0(2) + \left( \frac{t_1}{H} \right)^3 U_0(3) + \dots + \left( \frac{t_1}{H} \right)^n U_0(n) &= u(t_1) - U_0(0), \\ \frac{t_2}{H} U_0(1) + \left( \frac{t_2}{H} \right)^2 U_0(2) + \left( \frac{t_2}{H} \right)^3 U_0(3) + \dots + \left( \frac{t_2}{H} \right)^n U_0(n) &= u(t_2) - U_0(0), \quad (2) \\ \frac{t_n}{H} U_0(1) + \left( \frac{t_n}{H} \right)^2 U_0(2) + \left( \frac{t_n}{H} \right)^3 U_0(3) + \dots + \left( \frac{t_n}{H} \right)^n U_0(n) &= u(t_n) - U_0(0). \end{aligned}$$

Оскільки на основі прямих диференціальних перетворень (1) справедливими є рівності  $u(t_0) = U_0(0)$ ,  $u(t_1) = U_1(0)$ ,  $u(t_j) = U_j(0)$ , ...,  $u(t_m) = U_m(0)$ ,



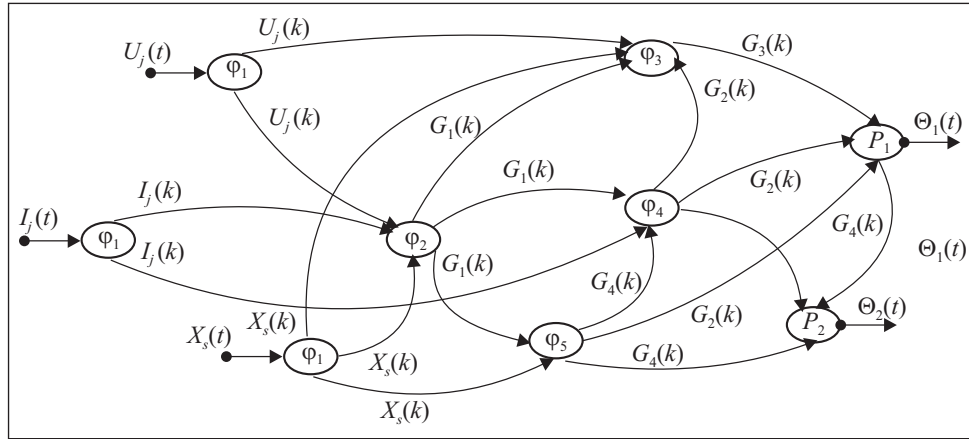


Рис. 2. Граф обробки первинної інформації в області диференціальних  $T$ -зображень

розв'язавши систему рівнянь (2), отримаємо наступну сукупність  $T$ - дискрет  $U_0(0), U_0(1), U_0(2)$  функції цілочислового аргументу  $k=0,1,2,\dots$ , що є зображенням  $u(t_0)$  в точці  $t_0$ . Проводячи аналіз отриманих результатів, можна звернути увагу на те, що функція  $u(t)$  в точці  $t_0$  є не тільки величиною миттєвого значення  $u(t_0)=U_0(0)$ , а і сукупністю  $T$ -дискрет  $U_0(1), U_0(2), \dots, U_0(k)$ , кожна  $k$ -а із яких еквівалентна  $k$ -й похідній функції  $u(t)$  в точці  $t_0$ . На основі (1), (2) синтезуємо математичну модель для визначення  $T$ -дискрет  $U_j(0), U_j(1), U_j(2), \dots, U_j(k)$  в кожній точці  $t_s, s=0, 1, 2, \dots, n-1$ , функції-оригіналу  $u(t)$ :

$$\begin{aligned} \frac{t_{js+1}}{H} U_s(1) + \left(\frac{t_{js+1}}{H}\right)^2 U_s(2) + \left(\frac{t_{js+1}}{H}\right)^3 U_s(3) + \dots + \left(\frac{t_{js+1}}{H}\right)^n U_s(n) = \\ = u(t_{js+1}) - U_s(0), \quad j=1,2,\dots,n, \quad s=0, 1, 2, \dots, n-1. \end{aligned} \quad (3)$$

Розв'язавши системи рівнянь (3), отримаємо в кожній точці  $t_s, s=0, 1, 2, \dots, n-1$ , стохастичного процесу  $u(t)$  спектр дискрет  $U_0(0), U_0(1), \dots, U_0(n), U_1(0), U_1(1), \dots, U_1(n), U_n(0), U_n(1), \dots, U_n(n)$ . Такий підхід дозволяє при обробці первинної інформації використовувати не тільки миттєві значення  $u(t_s)$  стохастичного процесу, а і їх  $n$   $T$ -дискрет  $U_s(0), U_s(1), \dots, U_s(n)$ , що є основою організації інтелектуального обчислювального процесу для визначення нових знань про режими функціонування складних мереж електропостачання та обладнання тягових підстанцій.

**Методи обробки первинної інформації в сфері диференціальних  $T$ -зображень.** Отримавши сукупність нових первинних даних і сформувавши їх відповідним чином,  $U_s(s), s=0,1,\dots,n, k=0, 1, 2, \dots$ , можна пред-

ставити обчислювальний процес у вигляді графа (рис. 2). На першому етапі обчислювального процесу для зареєстрованих первинних даних — сукупності напруг  $u_j(t)$ , струмів  $i_j(t)$ , а також комплексу сигналів  $x_s(t)$ , що надходять від датчиків силового електричного обладнання та систем захисту тягових підстанцій, — згідно (3) формується множина дискретних  $T$ -функцій  $\varphi_1(u_j(t)) \bar{=} U_j(k)$ ,  $\varphi_1(i_j(t)) \bar{=} I_j(k)$ ,  $\varphi_1(x_s(t)) \bar{=} X_s(k)$ , яка і є основою організації інтелектуального обчислювального процесу для визначення нових знань про режими функціонування електричних мереж.

На наступних етапах обчислювального процесу використовуються отримані на першому етапі згідно (3) спектр  $T$ -функцій для обробки їх в  $T$ -області. В результаті обчислень формується новий  $T$ -спектр функцій:

$$\varphi_1(U_j(k), I_j(k), X_s(k)) = G_1(k), \quad \varphi_3(U_j(k), X_s(k), G_1(k)) = G_3(k), \\ \varphi_4(G_1(k), I_j(k), G_4(k)) = G_2(k), \quad \varphi_5(G_1(k), X_s(k)) = G_4(k).$$

Якщо в результаті обчислювального процесу для оперативного прийняття рішень або формування керуючих впливів необхідна проміжна інформація, то згідно (1) застосовується зворотнє диференціальне перетворення

$$u(t_j) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \left( \frac{t}{H} \right)^k U_j(k).$$

Після закінчення обчислень на основі оператора

$$P_1(G_3(k), G_2(k), G_4(k)) = \theta_1(t), \quad P_2(G_2(k), \theta_1(t), G_4(k)) = \theta_2(t), \\ j = 1, 2, \dots, s = 1, 2, \dots, k = 0, 1, 2, \dots, \quad (4)$$

реалізується формування нових знань  $\Theta_1(t)$  про особливості функціонування електричних мереж, накопичення їх і представлення належним чином. Крім того, на базі залежностей (4) реалізується формування експрес-інформації і файлу повних інформаційних даних аномального режиму електричної мережі  $\Theta_2(t)$  для передачі її на верхні рівні керування з метою прийняття оперативних диспетчерських і стратегічних рішень оптимізації електроспоживання і енергозбереження.

Розглянемо процедуру організації обчислювального процесу в  $T$ -області для реалізації спектрального аналізу первинної інформації, поданої на основі диференціальних зображень у вигляді  $T$ -спектрів згідно (3). На практиці широко застосовуються інтегральні перетворення Фур'є з кінцевими і безкінечними границями. Пряме перетворення Фур'є на кінцевому проміжку  $(0, T)$  має вигляд [5]

$$U_\gamma = \frac{j^2}{T} \int_0^T e^{-j\gamma t} u(t) dt, \quad j^2 = -1, \quad (5)$$



де  $U_\gamma$  — комплексна амплітуда  $\gamma$ -ї гармоніки напруги,  $U_\gamma = e^{-j\gamma\omega t}$ ;  $\omega = 2\pi/T$  — частота основної гармоніки струму. Оскільки

$$u(t) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \left(\frac{t}{H}\right)^k U(k),$$

підставивши значення  $u(t)$  в (5), отримаємо наступну математичну залежність:

$$U_\lambda = \sum_{k=0}^{k=\infty} \frac{U(k)}{H^2} \left( \frac{j^2}{T} \int_0^T t^k e^{-j\gamma\omega t} u(t) dt \right). \quad (6)$$

Значення інтегралу в (6) можна записати у вигляді [5, 6]

$$\int_0^T t^k e^{-j\gamma\omega t} dt = \frac{k!(-1)^k}{(-j\gamma\omega t)^{k+1}} \left( 1 - \sum_{m=0}^{m=k} \frac{(-j\gamma\omega t)^m}{m!} \right).$$

Підставивши значення інтегралу в (6), отримаємо математичну модель, яка дає можливість на основі  $T$ -спектру функцій  $U(k)$  цілочислового аргументу  $k = 0, 1, 2, \dots$  визначити набір комплексних амплітуд  $\gamma$ -х гармонік:

$$U_\gamma = \frac{1}{\pi\gamma} \sum_{k=0}^{k=\infty} \frac{k!}{(e^{-j\gamma\omega t} - H)^m} \left[ \sum_{m=0}^{m=k} \left(\frac{T}{H}\right)^m \frac{(-j\gamma\omega t)^m}{m!} - 1 \right] U(k).$$

Це є дуже важливим при проведенні аналізу аномальних режимів систем електропостачання в залізничній енергетиці, а також для формування нових знань. Поступаючи аналогічно, на основі зворотних перетворень Фур'є можна синтезувати математичну модель визначення  $T$ -спектрів проміжних обчислень  $G_j(k)$  для організації подальшої обробки інформації.

Наведені формули отримано для випадку, коли використовуються перетворення Фур'є з кінцевими границями. Якщо необхідно використовувати інтегральні перетворення Фур'є з безкінечними границями,

$$u(jw) = \int_0^\infty e^{-j\gamma\omega t} u(t) dt, \quad u(t) = \int_{-j\infty}^{j\infty} e^{j\gamma\omega t} u(jw) djw, \quad j^2 = -1,$$

за умови  $u(t) = 0, t < 0$ , то, реалізувавши ряд аналогічних математичних перетворень, синтезуємо математичну модель для визначення спектральної щільності шляхом обробки первинної інформації  $U_s(k), s = 0, 1, \dots, n, k = 0, 1, 2, \dots$ , для диференціальних  $T$ -зображень [5]:

$$u(jw) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \frac{k!}{(j\gamma\omega H)^k} \frac{k!}{j^w}, \quad U(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(j\gamma\omega t)^k}{k!} u(jw) dw.$$

Розглянемо особливості організації обчислювального процесу в  $T$ -області на прикладі обчислення взаємної кореляційної функції двох змінних  $u_j(t_i), u_s(t_{i+f})$ :

$$R(u_j(t_i), u_s(t_{i+f})) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_j(t_i) u_s(t_{i+f}),$$

$$I = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, r, f = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

Оскільки первинні дані, сформовані на основі математичної моделі (2), мають вигляд  $T$ -спектрів,  $U_j(0), U_j(1), U_j(k), U_j(2), U_j(k), U_s(0), U_s(1), U_s(k), U_s(2), U_s(k)$  як функції цілочислового аргументу  $k = 0, 1, 2, \dots$ , математичну залежність (7) [5, 6] в області диференціальних зображень можна записати так:

$$R_{js}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{l=0}^{l=k} U_j^i(l) U_s^{i+f}(k-l), j = 1, 2, \dots, r, s = 1, 2, \dots, r. \quad (8)$$

На основі (8) обчислювальний процес в  $T$ -області для визначення дискрети  $R_{js}(k)$   $T$ -спектру взаємної кореляційної функції в сфері диференціальних зображень можна виконати наступним чином. Підставляючи в (8) первинні інформаційні дані у вигляді  $T$ -спектрів  $U_j(0), U_j(1), U_j(k), U_j(2), U_j(k), U_s(0), U_s(1), U_s(k), U_s(2), U_s(k)$  при  $k = 0$  отримаємо першу дискрету,

$$R_{js}(0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_j^i(0) U_s^{i+f}(0), \quad (9)$$

при  $k = 1$  — другу дискрету,

$$R_{js}(1) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_j^i(0) U_s^{i+f}(1) + U_j^i(1) U_s^{i+f}(0)), \quad (10)$$

при  $k = 2$  — значення третьої дискрети:

$$R_{js}(2) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_j^i(0) U_s^{i+f}(2) + U_j^i(1) U_s^{i+f}(1) + U_j^i(2) U_s^{i+f}(0)). \quad (11)$$

Діючи по аналогії, отримаємо  $T$ -спектр взаємної кореляційної функції  $R_{js}(0), R_{js}(1), R_{js}(2), \dots, R_{js}(k)$ , який може бути використаний для подальших обчислень. Для прийняття оперативних рішень або формування керуючих впливів, застосувавши зворотні перетворення (1), для  $T$ -спектру (9)—(11) отримаємо

$$R(u_j(t_i), u_s(t_{i+f})) = R_{js}(0) + R_{js}(1) \frac{t}{H} + R_{js} \frac{t^2}{H^2}.$$

Таким чином, при реалізації синтезу математичних моделей і комп'ютерно-орієнтованих методів на базі математичного апарату диференціальних перетворень відкривається можливість формування нових знань про особливості режимів функціонування мереж електропостачання на тягу. Отримані нові знання є основою формування інформаційних технологій для оптимізації електропостачання, енергозбереження і безпеки руху залізничного транспорту.

## Висновки

1. Проведений аналіз методів комп'ютерної інтелектуалізації процедур керування процесами, що протікають в складних енергетичних об'єктах і системах, дозволив зробити висновок про те, що для розв'язання головної проблеми оптимізації електроспоживання і створення енергозберігаючих технологій необхідно розробити сучасні математичні моделі і методи формування нових знань шляхом суттєвого підвищення рівня інформативності недетермінованих первинних даних, що відображають аномальні режими складних енергетичних систем.

2. Розроблені на основі математичного апарату диференціальних перетворень математичні моделі орієнтовано на підвищення рівня інформативності первинних інформаційних даних, отриманих в результаті реєстрації перехідних, аномальних і динамічних режимів, які протікають в системах електропостачання залізниць.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Стогній Б.С., Кириленко О.В., Праховник А.В.* Інтелектуальні електричні мережі: світовий досвід і перспективи України // Зб.наук. праць Ін-ту електродинаміки НАН України. Ч. 1. — 2011. — С. 5—20.
2. *Стасюк О.І., Гончарова Л.Л., Максимчук В.Ф.* Методи організації інтелектуальних електричних мереж залізниць на основі концепції SMART Grid // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2014. — № 2. — С. 29—37.
3. *Стасюк О.І., Железняк А.Л., Гончарова Л.Л.* Математичні моделі і методи комп'ютерної інтелектуалізації швидкоплинних технологічних процесів електропостачання залізниць. — Київ: Аспект-поліграф, 2015. — 192 с.
4. *Буткевич О.Ф., Левконюк А.В., Стасюк О.І.* Підвищення надійності моніторингу допустимості завантажень контрольованих перетинів енергосистем // Технічна електродинаміка. — 2014. — № 2. — С. 56—67.
5. *Пухов Г.Е.* Преобразования Тейлора и их применение в электротехнике и электронике. — Киев: Наук. думка, 1978. — 259 с.
6. *Стасюк О.І., Гончарова Л.Л.* Математичні моделі і методи організації інтелектуальних мереж постачання електроенергії на тягу залізничному транспорту // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2015. — № 3. — С. 25—31.
7. *Carter A.M. et al.* The Application of Wide Area Monitoring to the GB Transmission System to Facilitate Large-scale Integration of Renewable Generation. Cigre C2-112. Paris 2010.

8. Arango O.J. et al. Low Frequency Oscillations in the Colombian Power System — Identification and Remedial Actions. Cigre C2-105. Paris 2010.
9. European Technology Platform- Smart Grids. April 2011: Strategic Deployment document for European Commission, 2014. [Electronic resource] — Mode of access: <http://www.smartgrids.eu/>.
10. Smart Grid -European Technology Platform for Electricity Networks of the Future- European Commission, 2012. — Ibid.

O.I. Stasiuk, L.L. Goncharova

MATHEMATICAL MODELS AND METHODS FOR COMPUTER  
CONTROL OF THE POWER SUPPLY OF RAILWAYS ON THE BASIS  
OF PUKHOV'S DIFFERENTIAL TRANSFORMATIONS

The results of the analysis of the current state of scientific research in the sphere of intellectualization of railway electrical networks are presented. It is shown that urgent problem is the creation of progressive mathematical models and methods of formation of new knowledge by increasing the level of informativeness of the initial data. A set of advanced differential mathematical models has been developed based on the mathematical apparatus of differential transformation for determining the informativeness level of the data obtained as a result of synchronous recording of abnormal modes of the power supply systems. The computer-based methods have been proposed for organizing computational process with the use of differential images for spectral and correlation analysis of initial information.

*Key words:* mathematical models, differential transformations, intellectualization, stochastic processes, optimization, intelligent information processing.

REFERENCES

1. Stogniy, B.S., Kyrylenko, O.V. and Prakhovnyk, A.V. (2011), “Intelligent electric networks: the world experience and prospects of Ukraine”, *Zbirnyk naukovykh prats In-tu elektrodynamiky NAN Ukrainy*, Part 1, pp. 5-20.
2. Stasiuk, O.I., Goncharova, L.L. and Maksymchuk, V.F. (2014), “Methods of organization of intelligent electrical railway networks on the SMART Grid concept”, *Informatsiyno-keruyuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, no. 2, pp. 29-37.
3. Stasiuk, O.I., Zheleznyak, A.L. and Goncharova, L.L. (2015), *Matematychni modeli i metody kompyuternoi intelektualizatsii shvydkoplynykh tekhnologichnykh protsesiv elektro-postachannia zaliznyts* [Mathematical models and organization methods of intelligent electricity supply networks for rail transport powering], Aspekt-poligraph, Kyiv, Ukraine.
4. Butkevych, O.F., Levkonyuk, A.V. and Stasiuk, O.I. (2014), “Increasing the reliability of power systems controlled intersections download admissibility monitoring”, *Tekhnicheskaya elektrodinamika*, no. 2, pp. 56-67.
5. Pukhov, G.E. (1978), *Preobrazovaniya Teilora i ikh primenenie v elektrotekhnike i elektronike* [Taylor's transformations, and their use in electrical engineering and electronics], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
6. Stasiuk, O.I. and Goncharova, L.L. (2015), “Mathematical models and methods of organization of intellectual networks of electric power supply to railway transport traction”, *Informatsiyno-keruyuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, no. 3, pp. 25-31.
7. Carter, A.M. et al. (2010), The application of wide area monitoring to the GB transmission system to facilitate large-scale integration of renewable generation, Cigre C2-112, Paris, France.

8. Arango, O.J. et al. (2014), Low frequency oscillations in the Colombian power system – Identification and remedial actions, Cigre C2-105, Paris, France.
9. European Technology Platform-Smart Grids: Strategic Deployment document for European Commission (2011), available at: <http://www.smartgrids.eu/>.
10. Smart Grid-European Technology Platform for Electricity Networks of the Future-European Commission (2012), available at: <http://www.smartgrids.eu/>.

Поступила 02.06.16

*СТАСЮК Олександр Іонович, д-р техн. наук, професор, лауреат Державної премії в галузі науки, зав. кафедри автоматизації і комп'ютерно-інтегрованих технологій транспорту Державного економіко-технологічного університету транспорту. В 1972 р. закінчив Київський ін-т інженерів цивільної авіації. Сфера наукових досліджень — методи відображення роз'язно-інтерпретованих математичних моделей на архітектуру паралельних обчислювальних систем надвисокої швидкодії, орієнтованих на сучасну інтегральну технологію для оптимізації керування і регулювання об'єктами підвищеної концентрації енергії.*

*ГОНЧАРОВА Лідія Леонідівна, канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації і комп'ютерно-інтегрованих технологій транспорту Державного економіко-технологічного університету транспорту. В 2008 р. закінчила Київський гуманітарний ін-т, а в 2009 р. — Державний економіко-технологічний університет транспорту. Сфера наукових досліджень — методи комп'ютеризації і методи синтезу паралельних архітектур швидкодіючих контролерів для розв'язання задач підвищеної інтелектуальної складності та розмірності, орієнтованих на управління швидкоплинними технологічними процесами електропостачання.*