

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ І МЕТОДИ АНАЛІЗУ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯМ ЗАЛІЗНИЦЬ

Анотація. Проаналізовано методи інноваційного перетворення систем постачання електроенергії залізницям. Показано, що сучасні інтелектуальні мережі електропостачання являють собою нову якість взаємно інтегрованої архітектури розподіленого комп'ютерного середовища керування електропостачанням і топології тягової електричної мережі, орієнтованих на накопичення нових знань та оптимізацію енергоресурсів. Для синтезу математичних моделей дослідження інтелектуальних систем побудовано граф розподіленого комп'ютерного середовища, який адекватно відображає топологію електромережі залізниці. Запропоновано диференційну математичну модель розподіленого комп'ютерного середовища інтелектуалізації процедур всережимного керування електропостачанням та методи обчислення значень ймовірностей стану вузлів, пропускної спроможності, кількості зайнятих каналів, кількості відмов заявок на обслуговування.

Ключові слова: диференційні математичні моделі, методи, граф, комп'ютерна мережа, архітектура, оптимізація, інтелектуальні мережі, комп'ютерне середовище.

ВСТУП

Дослідження еволюції інноваційного перетворення систем постачання електроенергії на тягу залізничному транспорту виявило широкий спектр особливостей, пов'язаних у першу чергу з специфікою процедури живлення. У процесі електропостачання залізниць, на відміну від загальносистемної енергомережі, значний негативний вплив проявляється внаслідок топологічних особливостей електроспоживання у несиметрії та несинусоїдальності напруги живлення, а також у значній нерівномірності рухомих навантажень під час вантажних і пасажирських перевезень потягами. Зазначені вище, а також інші фактори суттєво впливають на економічність режимів електропостачання, надійність функціонування системи залізничної енергетики, збільшення собівартості перевезень, організацію надійної мікропроцесорної мережі захисту від появи нештатних режимів і короткого замикання, а у поєднанні з фізичним і моральним старінням електромережі та силового електричного обладнання зумовлюють появу і розвиток системних аварій [1, 2]. Досвід експлуатації мереж електропостачання на тягу показав, що організацію сучасних методів формування процедур оптимізації електропостачання, зменшення загальносистемних витрат у процесі швидкісних перевезень та підвищення рівня надійності транспортних систем і, відповідно, безпеки руху можна здійснити за допомогою створення нових моделей і методів керування, орієнтованих на використання розподілених мереж, комп'ютерна архітектура яких адекватно відображає топологію тягової електричної системи залізниці [2–6]. Сучасна ідеологія інноваційного перетворення систем електропостачання залізниць підтверджується систематичним застосуванням інтегрованих розподілених комп'ютерних мереж і комплексу мережевих технологій керування швидкоплинними технологічними процесами електропостачання у режимі реального часу. Ця технологія отримала загальну назву SMART Grid [1, 7]. Перспективність такого підходу зумовлена необхідністю проведення додаткових досліджень і пошуку нових шляхів організації інтелектуальних мереж електропостачання. Синтез таких систем базується на принципах синхронних векторних вимірювань первинної інформації, єдиного інформаційного простору, саморегуляції, самовідновлення. Ці принципи у сукупності формують технологію керування

© О.І. Стасюк, Л.Л. Гончарова, 2018

швидкоплинними технологічними процесами споживання електроенергії залізничним транспортом, яка аналізує, контролює і звітує про їхній перебіг. Завдяки використанню сучасної методології формування інтелектуальних систем електропостачання відкривається можливість створення тягової електричної мережі, що являє собою нову якість взаємно інтегрованої архітектури розподіленого комп'ютерного середовища і топології тягової електричної мережі [3, 4, 8]. Такий підхід до організації інтелектуальних мереж електропостачання відкриває можливість для формування нових знань про залізничну енергетику, суттєвої оптимізації енергоресурсів, що споживаються на тягу, синтезу нових енергоощадних технологій електроспоживання, покращення рівня безпеки руху і розширення спектра ринкових послуг.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Створення сучасних інтелектуальних електричних мереж залізниць, що забезпечують оперативне керування швидкоплинними технологічними процесами постачання електроенергії на тягу та формування енергоощадних технологій електроспоживання і, як наслідок, підвищення надійності функціонування і безпеки руху за мінімальних інвестиційних затрат, можливе завдяки розробленню нових інноваційних моделей перетворення електричних тягових мереж на базі сучасної розподіленої комп'ютерної інфраструктури, яка є адекватною топології системи електропостачання. Домінантні сегменти таких інтелектуальних мереж включають сукупність інтелектуального силового обладнання і силової електроніки з вмонтованими мікроконтролерами із засобами телекомунікації, а також системи безпроводних датчиків з вмонтованими комп'ютерними чіпами. Комп'ютерна архітектура такого обчислювального середовища орієнтована на інтелектуалізацію сукупності процедур керування енергосистемою, отримання нових знань про штатні і аномальні режими функціонування і формування сучасних енергоощадних технологій оптимізації електроспоживання та мінімізації загальносистемних втрат на основі нових знань. Новий етап комп'ютерної інтелектуалізації залізничних мереж електропостачання, пов'язаний із створенням розподілених обчислювальних мереж і перспективних енергоощадних інформаційних технологій, зумовив широкий спектр наукових досліджень у сфері створення нових концептуальних інноваційно-інвестиційних підходів, принципів інтелектуалізації режимів оптимального функціонування тягових систем, математичних моделей і методів мінімізації електроспоживання, комерційної вартості електроенергії та підвищення рівня безпеки швидкісних перевезень залізничним транспортом. Головною особливістю інтелектуальних мереж електропостачання є те, що вони здатні накопичувати нові знання про природу режимів функціонування електросистем, що дозволяє значно підвищити ефективність їхнього функціонування, запровадити інтегральну систему динамічної тарифікації процесів електроспоживання, а також суттєво розширити спектр ринкових послуг.

Мета роботи — розробити математичні моделі для дослідження характеристик взаємоінтеграції електромережевої топології та архітектури розподілених комп'ютерних мереж всережимного керування електропостачанням залізниць, а також комп'ютерно-орієнтовані методи обчислення значень ймовірностей станів вузлів мережі, її пропускної спроможності, кількості зайнятих каналів і відмов заявок на обслуговування.

МОДЕЛІ ІННОВАЦІЙНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ МЕРЕЖ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦЬ

Основою ключової ідеології інноваційного перетворення мереж електропостачання на тягу і формування інтелектуальної електроенергетики є якісно нова сукупність взаємно інтегрованих топологій електричних систем і розподілених архітектур комп'ютерних мереж, включаючи інтелектуальне силове обладнання з вбудованими контролерами і засобами захисту для реалізації моніторингу, комутації і регулювання напруги та потоків потужності, об'єднаних на основі су-

часних принципів саморегулювання, самовідновлення, єдиної моделі первинних даних, синхронної інформаційної взаємодії, діагностики та електромагнітної сумісності. Архітектура розподіленого комп'ютерного середовища інтелектуальної системи керування електропостачанням залізниці, що забезпечує інтелектуалізацію сукупності процедур оперативного, диспетчерського і технологічного керування електропостачанням, може бути представлена у вигляді корпоративної комп'ютерної мережі, логічну структуру якої будують з використанням будь-якої фізичної топології. Як вузли корпоративної мережі використовуються комп'ютерні засоби, орієнтовані на розв'язування широкого спектра задач, пов'язаних з організацією первинної інформації на умовах синхронності вимірювання, для синтезу перспективних та ретроспективних баз даних як основи для визначення і накопичення нових знань, створення нових енергоощадних технологій, формування мережі інтерфейсів користувачів, а також уніфікації документообігу. У процесі керування електропостачанням на тягу залежно від класу розв'язуваних задач, стану мережі електропостачання, обсягу трафіку і необхідності обміну інформацією між вузлами топологія архітектури корпоративної мережі може змінюватись у процесі роботи. Широкі можливості для організації динамічної архітектури розподіленої комп'ютерної мережі залізниці, без значної зміни її топології, відкривають магістральні маршрутизатори і програмні комутатори. Типову корпоративну розподілену комп'ютерну мережу залізниці для проведення процедур інтелектуалізації керування постачанням електроенергії на тягу представлено у вигляді графа на рис. 1 (Z_0 — вузол, яким є центральний сервер корпоративної комп'ютерної мережі керування електропостачанням залізниці; Z_1 — вузол, яким є сервер бази даних єдиного інформаційного простору комерційної і технологічної інформації залізниці; Z_2 — вузол, яким є сервер зв'язку з локальними комп'ютерними мережами тягових підстанцій, дистанцій електропостачання і окремих залізниць; Z_3 — вузол зв'язку з мережею Internet; Z_4 — вузол дистанційного керування комерційним обліком електроенергії; Z_5 — вузол, яким є сервер інтелектуальної обробки комерційної і технологічної інформації та оперативного керування електроспоживанням; Z_6 — вузол, яким є сервер проведення ситуаційного моделювання, аналізу і стратегічного керування; Z_7 — вузол, яким є сервер мікропроцесорного і релейного захисту контактної мережі; Z_8 — вузол, яким є сервер проведення

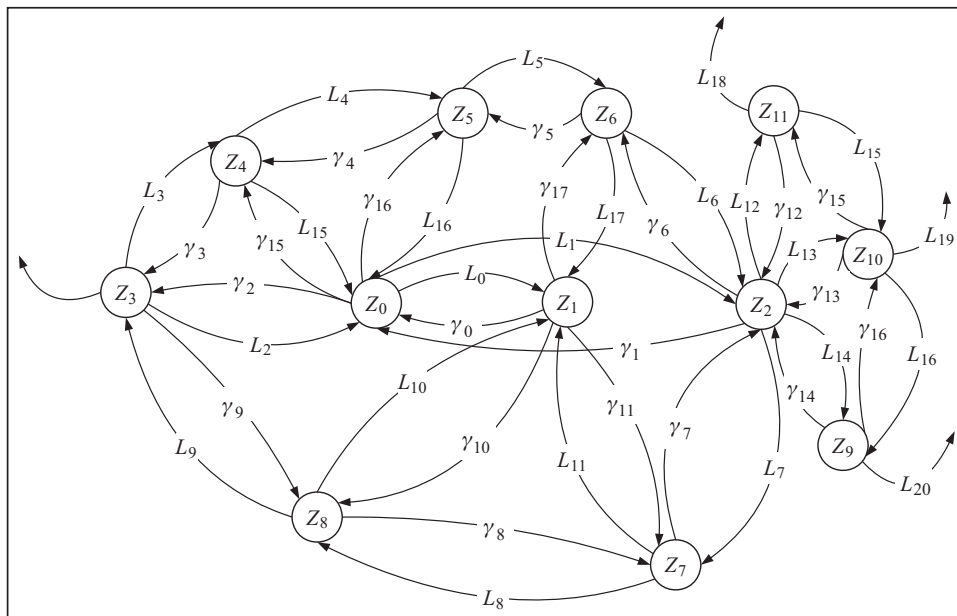


Рис. 1. Граф розподіленої корпоративної мережі керування електропостачанням залізниці

моніторингу, контролю, діагностики і прогнозу надійності функціонування електричних мереж залізниць; Z_9 — вузол зв'язку з ринком електроенергії; Z_{10} — вузол обміну інформацією між локальними мережами тягових підстанцій, дистанцій електропостачання і розподіленою корпоративною комп'ютерною мережею; Z_{11} — вузол зв'язку з міністерством та іншими вищими за рангом організаціями).

Сукупність вузлів графа $Z_0, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_7, Z_8, Z_9, Z_{10}, Z_{11}$ — це відповідні комп'ютерні засоби (див. рис. 1), а дугами графа розподіленої корпоративної комп'ютерної мережі залізниці позначено відповідно інтенсивність потоків заявок $L(t)$ на обмін інформацією між вузлами та інтенсивність $\gamma(t)$ потоків обслуговування заявок $L(t)$. Для дослідження архітектури корпоративного обчислювального середовища інтелектуальної системи електропостачання залізниці використаємо відповідні правила і формули [9] та побудуємо математичну модель, що відображає граф (рис. 1), у вигляді такої системи диференціальних рівнянь Колмогорова з початковими умовами:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{z0}(t)}{dt} &= \gamma_0 P_{z1}(t) + \gamma_1 P_{z2}(t) + L_2 P_{z3}(t) + L_{15} P_{z4}(t) + \\ &+ L_{16} P_{z5}(t) - (L_0 + L_1 - \gamma_2 - \gamma_{15} - \gamma_{16}) P_{z0}(t), \\ \frac{dP_{z1}(t)}{dt} &= L_0 P_{z0}(t) + L_{10} P_{z8}(t) + L_{11} P_{z7}(t) + L_{17} P_{z6}(t) - (\gamma_0 + \gamma_{10} + \gamma_{11} + \gamma_{17}) P_{z1}(t), \\ \frac{dP_{z2}(t)}{dt} &= L_1 P_{z0}(t) + L_6 P_{z6}(t) - (L_7 + L_{11} + L_{12} + L_{14} + \gamma_1 + \gamma_6) P_{z2}(t) + \\ &+ \gamma_{12} P_{z11}(t) + \gamma_{13} P_{z10}(t) + \gamma_{14} P_{z9}(t) + \gamma_7 P_{z7}(t), \\ \frac{dP_{z3}(t)}{dt} &= L_9 P_{z8}(t) - (L_2 + L_3 - \gamma_9) P_{z3}(t) + \gamma_2 P_{z0}(t) + \gamma_3 P_{z4}(t), \\ \frac{dP_{z4}(t)}{dt} &= L_3 P_{z3}(t) - (L_4 + L_{15} + \gamma_3) P_{z4}(t) + \gamma_4 P_{z5}(t) + \gamma_{15} P_{z0}(t), \\ \frac{dP_{z5}(t)}{dt} &= L_4 P_{z4}(t) - (L_5 + L_{16} + \gamma_4) P_{z5}(t) + \gamma_5 P_{z6}(t) + \gamma_{16} P_{z0}(t), \\ \frac{dP_{z6}(t)}{dt} &= L_5 P_{z5}(t) - (L_6 + L_{17} + \gamma_5) P_{z6}(t) + \gamma_6 P_{z2}(t) + \gamma_{17} P_{z1}(t), \\ \frac{dP_{z7}(t)}{dt} &= L_7 P_{z2}(t) - (L_8 + L_{11} + \gamma_7) P_{z7}(t) + \gamma_8 P_{z8}(t) + \gamma_{11} P_{z1}(t), \\ \frac{dP_{z8}(t)}{dt} &= L_8 P_{z7}(t) - (L_9 + L_{10} + \gamma_8) P_{z8}(t) + \gamma_9 P_{z3}(t) + \gamma_{10} P_{z1}(t), \\ \frac{dP_{z9}(t)}{dt} &= L_{14} P_{z2}(t) + L_{16} P_{z10}(t) - (\gamma_{14} + \gamma_{16}) P_{z9}(t), \\ \frac{dP_{z10}(t)}{dt} &= L_{13} P_{z2}(t) + L_{15} P_{z11}(t) - (\gamma_{16} + \gamma_{13} + \gamma_{15}) P_{z10}(t) + \gamma_{16} P_{z9}(t), \\ \frac{dP_{z11}(t)}{dt} &= L_{12} P_{z2}(t) + \gamma_{15} P_{z10}(t) - (L_{15} + \gamma_{12}) P_{z11}(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Початкові умови для розв'язання систем диференціальних рівнянь (1) можна записати так:

$$\begin{aligned} P_{z0}(t) + P_{z1}(t) + P_{z2}(t) + \dots + P_{z11}(t) &= 1, \quad P_{z0}(t) = 1, \\ P_{z1}(t) + P_{z2}(t) + \dots + P_{z11}(t) &= 0. \end{aligned}$$

Для обчислення значень ймовірностей стану $P_{z0}(t), P_{z1}(t), P_{z2}(t), P_{z3}(t), P_{z4}(t), P_{z5}(t), P_{z6}(t), P_{z7}(t), P_{z8}(t), P_{z9}(t), P_{z10}(t), P_{z11}(t)$ вузлів графа використаємо фундаментальні положення диференціальних перетворень Пухова і пред-

ставимо систему рівнянь (1) в області зображень у вигляді диференційної математичної моделі [10]

$$P_i(k) = \frac{H^k}{k!} \left[\frac{d^k P_i(t)}{dt^k} \right]_{t=0} \stackrel{\cong}{=} P_i(t) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \left(\frac{t}{H} \right)^k P_i(k), \quad (2)$$

де $P_i(t)$ — первісна функція аргументу t , яку можна n разів диференціювати: вона має низку відповідних обмежень, разом зі своїми похідними; $P_i(k)$ — диференційне Т-зображення первісної функції $P_i(t)$; H — масштабний коефіцієнт, розмірність якого збігається з розмірністю аргументу t , як правило, визначається за умови $0 \leq t \leq H$ на всьому діапазоні функції-оригіналу $P_i(t)$; \cong — символ відповідності між функцією-оригіналом $P_i(t)$ і його диференційним Т-зображенням $P_i(k)$. Внаслідок прямого диференційного перетворення, яке записане ліворуч від символу \cong , формується диференційне Т-зображення функції-оригіналу $P_i(t)$ у вигляді дискретної функції $P_i(k)$ цілочислового аргументу $k = 0, 1, 2, \dots$. На основі сукупності значень Т-дискрет функції цілочислового аргументу $P_i(k)$, $k = 0, 1, 2, \dots$, використавши обернене диференційне перетворення, що розташоване праворуч від символу \cong , отримуємо функції-оригінали $P_i(t)$. Зазначимо, що для $k = 0$ згідно з (2) для будь-якого миттєвого значення t кожного i -го параметра $P_i(t)$ виконується відповідна рівність $P_i(t) = P_i(k)$.

На основі виразу (2) побудуємо диференційну математичну модель для дослідження корпоративної розподіленої комп'ютерної мережі всережимного керування електропостачанням залізниць у такому вигляді:

$$\begin{aligned} P_{z0}(k+1) &= \frac{H}{k+1} [\gamma_0 P_{z1}(k) + \gamma_1 P_{z2}(k) + L_{15} P_{z4}(k) + L_{16} P_{z5}(k) - S_1 P_{z0}(k)], \\ P_{z1}(k+1) &= \frac{H}{k+1} [L_0 P_{z0}(k) + L_{10} P_{z8}(k) + L_{11} P_{z7}(k) + L_{17} P_{z6}(k) - S_2 P_{z1}(k)], \\ P_{z2}(k+1) &= \frac{H}{k+1} [L_1 P_{z0}(k) L_6 P_{z6}(k) + \gamma_{12} P_{z11}(k) + \gamma_{13} P_{z10}(k) + \\ &\quad + \gamma_{14} P_{z9}(k) + \gamma_7 P_{z7}(k) - S_3 P_{z2}(k)], \\ P_{z3}(k+1) &= \frac{H}{k+1} [L_9 P_{z8}(k) + \gamma_2 P_{z0}(k) + \gamma_3 P_{z4}(k) - S_4 P_{z3}(k)], \\ P_{z4}(k+1) &= \frac{H}{k+1} [L_3 P_{z3}(k) + \gamma_4 P_{z5}(k) + \gamma_{15} P_{z0}(k) - S_5 P_{z4}(k)], \\ P_{z5}(k+1) &= \frac{H}{k+1} [L_4 P_{z4}(k) + \gamma_5 P_{z6}(k) + \gamma_{16} P_{z0}(k) - S_6 P_{z5}(k)], \\ P_{z6}(k+1) &= \frac{H}{k+1} [L_5 P_{z5}(k) + \gamma_6 P_{z2}(k) + \gamma_{17} P_{z1}(k) - S_7 P_{z6}(k)], \\ P_{z7}(k+1) &= \frac{H}{k+1} [L_7 P_{z2}(k) + \gamma_8 P_{z8}(k) + \gamma_{11} P_{z1}(k) - S_8 P_{z7}(k)], \\ P_{z8}(k+1) &= \frac{H}{k+1} [L_8 P_{z7}(k) + \gamma_9 P_{z3}(k) + \gamma_{10} P_{z1}(k) - S_9 P_{z8}(k)], \\ P_{z9}(k+1) &= \frac{H}{k+1} [L_{14} P_{z2}(k) + L_{16} P_{z10}(k) - S_{10} P_{z9}(k)], \\ P_{z10}(k+1) &= \frac{H}{k+1} [L_{13} P_{z2}(k) + L_{15} P_{z11}(k) + \gamma_{16} P_{z9}(k) - S_{11} P_{z10}(k)], \\ P_{z11}(k+1) &= \frac{H}{k+1} [L_{12} P_{z2}(k) + \gamma_{15} P_{z10}(k) - S_{12} P_{z11}(k)] \end{aligned} \quad (3)$$

з відповідними початковими умовами, які в області диференціальних зображень представлені таким чином:

$$P_{z_0}(t=0) = P_{z_0}(k=0) = 1, P_{z_i}(t=0) = P_{z_i}(k=0) = 0, t=0, i=1, 2, \dots,$$

де

$$\begin{aligned} S_1 &= L_0 + L_1 - \gamma_2 - \gamma_{15} - \gamma_{16}; S_2 = \gamma_0 + \gamma_{10} + \gamma_{11} + \gamma_{17}; \\ S_3 &= L_7 + L_{11} + L_{12} + L_{14} + \gamma_1 + \gamma_6; S_4 = L_2 + L_3 + \gamma_9; S_5 = L_4 + L_{15} + \gamma_3; \\ S_6 &= L_5 + L_{16} + \gamma_4; S_7 = L_6 + L_{17} + \gamma_5; S_8 = L_8 + L_{11} + \gamma_7; S_9 = L_9 + L_{10} + \gamma_8; \\ S_{10} &= \gamma_{14} + \gamma_{16}; S_{11} = L_{16} + \gamma_{13} + \gamma_{15}; S_{12} = L_{15} + \gamma_{12}. \end{aligned}$$

Диференціальна математична модель (3) є основою для визначення в аналітичному вигляді ймовірностей $P_{z_0}(t)$, $P_{z_1}(t)$, $P_{z_2}(t)$, $P_{z_3}(t)$, $P_{z_4}(t)$, $P_{z_5}(t)$, $P_{z_6}(t)$, $P_{z_7}(t)$, $P_{z_8}(t)$, $P_{z_9}(t)$, $P_{z_{10}}(t)$, $P_{z_{11}}(t)$ стану вузлів комп'ютерної архітектури всережимої системи керування електропостачанням залізниці, представленій у вигляді графа. Підставивши значення початкових умов $P_{z_0}(t=0) = P_{z_0}(k=0) = 1$, $P_{z_i}(t=0) = P_{z_i}(k=0) = 0$, $t=0$ у (3), для $k=0$ отримаємо спектр Т-дискрет у вигляді

$$\begin{aligned} P_{z_0}(0) &= 1; P_{z_0}(1) = -S_1 H; P_{z_1}(1) = L_0 H; P_{z_2}(1) = L_1 H; P_{z_3}(1) = \gamma_2 H; \\ P_{z_4}(1) &= \gamma_{15} H; P_{z_5}(1) = \gamma_{16}; P_{z_6}(1) = 0; P_{z_7}(1) = 0; P_{z_8}(1) = 0; \\ P_{z_9}(1) &= 0; P_{z_{10}}(1) = 0; P_{z_{11}}(1) = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Далі, вважаючи, що $k=1$, підставимо значення $P_{z_0}(0) = 1$; $P_{z_0}(1) = -S_1 H, \dots$, $P_{z_5}(1) = \gamma_{16}$; $P_{z_6}(1) = 0, \dots$, $P_{z_{11}}(1) = 0$ у (3) і отримаємо таку сукупність Т-дискрет:

$$\begin{aligned} P_{z_0}(2) &= \frac{H^2}{2} (L_0 \gamma_0 + L_1 \gamma_1 + L_{15} \gamma_{15} + L_{16} \gamma_{16} + S_1^2); \\ P_{z_1}(2) &= \frac{H^2 L_1}{2} (S_1 + S_2); P_{z_2}(2) = \frac{H^2 L_1}{2} (S_1 + S_3); \\ P_{z_3}(2) &= \frac{H^2}{2} [\gamma_3 \gamma_{15} - \gamma_2 (S_1 + S_4)]; P_{z_4}(2) = \frac{H^2}{2} [\gamma_4 \gamma_{16} + \gamma_2 (L_3 - S_5) - \gamma_{15} S_1]; \\ P_{z_5}(2) &= \frac{H^2}{2} [L_4 \gamma_{15} - \gamma_{16} (S_1 - S_6)]; P_{z_6}(2) = \frac{H^2}{2} (L_5 \gamma_{16} + \gamma_6 L_1 + \gamma_{17} L_0); \\ P_{z_7}(2) &= \frac{H^2}{2} (L_0 \gamma_{11} + L_1); P_{z_8}(2) = \frac{H^2}{2} (\gamma_9 \gamma_2 + \gamma_{10} L_0); \\ P_{z_9}(2) &= \frac{H^2}{2} L_1 L_{14}; P_{z_{10}}(2) = \frac{H^2}{2} L_1 L_{13}; P_{z_{11}}(2) = \frac{H^2}{2} L_1 L_{12}. \end{aligned} \quad (5)$$

Підставимо отриманий спектр Т-дискрет (4), (5) в обернене диференціальне перетворення $P_i(t) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \left(\frac{t}{H}\right)^k P_i(k)$ та отримаємо ймовірності стану вузлів графа в аналітичному вигляді:

$$\begin{aligned} P_{z_0}(t) &= 1 - S_1 t + (L_0 \gamma_0 + L_1 \gamma_1 + L_{15} \gamma_{15} + L_{16} \gamma_{16} + S_1^2) \frac{t^2}{2}; \\ P_{z_1}(t) &= L_0 t - L_1 (S_1 + S_2) \frac{t^2}{2}; P_{z_2}(t) = L_1 t - L_1 (S_1 + S_3) \frac{t^2}{2}; \\ P_{z_3}(t) &= \gamma_2 t [\gamma_3 \gamma_{15} - \gamma_2 (S_1 + S_4)] \frac{t^2}{2}; \\ P_{z_4}(t) &= \gamma_{15} t + [\gamma_4 \gamma_{16} + \gamma_2 (L_3 - S_5) - \gamma_{15} S_1] \frac{t^2}{2}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$P_{z5}(t) = \gamma_{16} t [L_4 \gamma_{15} - \gamma_{16} (S_1 - S_6)] \frac{t^2}{2}; \quad P_{z6}(t) = (L_5 \gamma_{16} + \gamma_{6L_1} + \gamma_{17} L_0) \frac{t^2}{2};$$

$$P_{z7}(t) = (L_0 \gamma_{11} + L_1) \frac{t^2}{2}; \quad P_{z8}(t) = (\gamma_{9\gamma_2} + \gamma_{10} L_0) \frac{t^2}{2};$$

$$P_{z9}(t) = L_1 L_{14} \frac{t^2}{2}; \quad P_{z10}(t) = L_1 L_{13} \frac{t^2}{2}; \quad P_{z11}(t) = L_1 L_{12} \frac{t^2}{2}.$$

Отримані значення ймовірностей стану вузлів графа використаємо для визначення сукупності характеристик комп'ютерної мережі інтелектуальної системи електропостачання залізниць. Ймовірність того, що центральний сервер Z_0 корпоративної комп'ютерної мережі керування електропостачанням залізниць здійснить обслуговування потоку заявок $L_0(t)$, $L_1(t)$, $L_2(t)$, $L_{15}(t)$, $L_{16}(t)$, характеризується значенням $P_{z0}(t)$. Якщо одна або декілька заявок потоку отримають відмову, то її ймовірність $\varphi_{z0}(t)$ буде доповненням $P_0(t)$ до одиниці, тобто

$$\varphi_{z0}(t) = 1 - P_{z0}(t) = S_1^t - (L_0 \gamma_0 + L_1 \gamma_1 + L_{15} \gamma_{15} + L_{16} \gamma_{16} + S_1^2) \frac{t^2}{2}.$$

Пропускную спроможність центрального сервера Z_0 комп'ютерної мережі всережимної системи керування електропостачанням залізниць запишемо як

$$\Psi_{z0}(t) = L_{0m}(t)(1 - \varphi_{z0}(t)) = L_{0m}(t)[1 - S_1 t + (L_0 \gamma_0 + L_1 \gamma_1 + L_{15} \gamma_{15} + L_{16} \gamma_{16} + S_1^2)] \frac{t^2}{2},$$

$$L_{0m}(t) = \max_i \{L_i(t)\}, \quad i = 1, 2, \dots$$

Середня кількість заявок $G_{z0}(t)$, що обробляються в мережі, має вигляд:

$$G_{z0}(t) = \frac{\Psi_{z0}(t)}{Z_{0m}(t)} = \frac{L_{0m}(t)[1 - S_1 t + (L_0 \gamma_0 + L_1 \gamma_1 + L_{15} \gamma_{15} + L_{16} \gamma_{16} + S_1^2)] \frac{t^2}{2}}{Z_{0m}(t)},$$

$$Z_{0m}(t) = \max_i \{Z_i(t)\}, \quad i = 1, 2, \dots$$

Важливою характеристикою комп'ютерної мережі керування електропостачанням залізниць є визначення ймовірностей стану її другого вузла Z_2 , яким є сервер зв'язку з локальними комп'ютерними мережами тягових підстанцій, дистанцій електропостачання і окремих залізниць. Значення ймовірності $P_2(t)$ стану другого вузла Z_2 мережі, який обслуговує заявки, що надходять від сукупності локальних комп'ютерних мереж тягових підстанцій, дистанцій електропостачання і окремих залізниць, задано в аналітичному вигляді виразом (6), відповідно, $P_{z2}(t) = L_1 t - L_1 (S_1 + S_3) \frac{t^2}{2}$. Ймовірність відмови $\varphi_{z2}(t)$ обслуговування заявок визначимо виразом

$$\varphi_{z2}(t) = 1 - P_{z2}(t) = 1 - L_1(t) + L_1(S_1 + S_2) \frac{t^2}{2},$$

а пропускную спроможність $\Psi_{z2}(t)$ другого вузла мережі і середню кількість заявок $G_{z2}(t)$, які обробляє сервер зв'язку, запишемо таким чином:

$$\Psi_{z2}(t) = L_{2m}(t)(1 - \varphi_{z2}(t)) = L_{2m}(t)[L_1(t) + L_1(t)(S_1 + S_2)] \frac{t^2}{2},$$

$$L_{2m}(t) = \max_i \{L_{2i}(t)\}, \quad i = 1, 2, \dots,$$

$$G_2(t) = \frac{\Psi_{z2}(t)}{Z_{2m}(t)} = \frac{L_{2m}(t)[L_1(t) + L_1(t)(S_1 + S_2)] \frac{t^2}{2}}{Z_{2m}(t)},$$

$$Z_{2m}(t) = \max_i \{Z_i(t)\}, \quad i = 1, 2, \dots$$

Аналогічно можна визначити сукупність характеристик інших вузлів комп'ютерної мережі керування електропостачанням залізниці, а також інтегральних параметрів комп'ютерної мережі в цілому.

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз сучасних ідеологій інноваційного перетворення систем постачання електроенергії окремим залізницям показав, що розв'язання комплексної проблеми оптимізації електроспоживання за мінімальної інвестиційної складової можливе шляхом інтелектуалізації спектра процедур керування швидкоплинними технологічними процесами електропостачання, які в сукупності отримали загальну назву SMART Grid технології. Використання методології формування інтелектуальних систем електропостачання відкрило можливість створення сучасної тягової електричної мережі залізниці, яка являє собою нову якість взаємно інтегрованої архітектури розподіленого комп'ютерного середовища керування електропостачанням та топології тягової електромережі, що в комплексі дозволяє сформулювати нові знання про залізничну енергетику та здійснити оптимізацію енергоресурсів.

2. Показано, що формування інтелектуальної залізничної енергетики базується на організації архітектури розподіленого комп'ютерного середовища, яке забезпечує інтелектуалізацію сукупності процедур оперативного диспетчерського і технологічного керування електропостачанням і може бути представлено у вигляді розподіленої корпоративної комп'ютерної мережі залізниці. З урахуванням сучасних концептуальних підходів до організації інтелектуальних систем електропостачання для синтезу математичних моделей дослідження характеристик комп'ютерної мережі і глибини взаємоінтеграції обчислювальної інфраструктури та електричної топології залізниці запропоновано граф розподіленого комп'ютерного середовища, який адекватно відображає топологію електромережі залізниці.

3. На основі теорії диференційних перетворень запропоновано диференційну математичну модель архітектури розподіленого комп'ютерного середовища інтелектуалізації процедур всережимного керування електропостачанням окремої залізниці. На основі цієї моделі розроблено низку методів визначення ймовірностей стану вузлів розподіленої комп'ютерної мережі керування електроспоживанням, а також таких параметрів, як пропускна спроможність кожного вузла, кількість каналів, зайнятих на заданий момент часу, кількість відмов заявок на обслуговування та інших показників.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.
2. Стасюк А.И., Гончарова Л.Л. Математические модели и методы анализа компьютерных сетей управления электроснабжением тяговых подстанций железных дорог. *Проблемы управления и информатики*. 2017. № 1. С. 34–43.
3. Стасюк О.І., Гончарова Л.Л. Математичні моделі комп'ютерної інтелектуалізації технологій синхронних векторних вимірів параметрів електричних мереж. *Кибернетика и системный анализ*. 2016. Т. 52, № 5. С. 41–49.
4. Стасюк О.І., Гончарова Л.Л. Диференційні математичні моделі для дослідження комп'ютерної архітектури всережимної системи керування дистанцією електропостачання залізниць. *Кибернетика и системный анализ*. 2017. Т. 53, № 1. С. 184–182.
5. Буткевич О.Ф., Левконюк А.В., Стасюк О.І. Підвищення надійності моніторингу допустимості завантажень контрольованих перетинів енергосистем. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 2. С. 56–67.

6. Opanasenko V.N., Kryvyi S.L. Partitioning the full range of boolean functions based on the threshold and threshold relation. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2012. Vol. 48, N 3. P. 459–468.
7. Стасюк О.І., Гончарова Л.Л. Математичні моделі і методи комп'ютерного керування електропостачанням залізниць на основі диференційних перетворень Пухова. *Електронне моделювання*. 2016. Т. 38, № 4. С. 127–139.
8. Opanasenko V.N., Kryvyi S.L. Synthesis of adaptive logical networks on the basis of Zhegalkin polynomials. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2015. Vol. 51, N 6. P. 969–977.
9. Венцель Е.С. Исследование операций. Москва: Сов. радио, 1972. 552 с.
10. Пухов Г.Е. Преобразования Тейлора и их применение в электротехнике и электронике. Київ: Наук. думка, 1978. 259 с.

Надійшла до редакції 13.03.2017

А.И. Стасюк, Л.Л. Гончарова

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ
УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕМ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

Аннотация. Проведен анализ методов инновационного преобразования систем для поставки электроэнергии железным дорогам. Показано, что современные интеллектуальные сети электроснабжения представляют собой новое качество взаимно интегрированной архитектуры распределенной компьютерной среды управления электроснабжением и топологии тяговой электрической сети, ориентированной на накопление новых знаний и оптимизацию энергоресурсов. Для синтеза математических моделей исследования интеллектуальных систем предложен граф распределенной компьютерной среды, который адекватно отображает топологию электросети железной дороги. Предложены дифференциальная математическая модель распределенной компьютерной среды интеллектуализации процедур всережимного управления электроснабжением и методы определения значений вероятностей состояний узлов, пропускной способности, числа занятых каналов, количества отказов заявок на обслуживание.

Ключевые слова: дифференциальные математические модели, методы, граф, компьютерная сеть, архитектура, интеллектуальные сети, компьютерная среда.

O.I. Stasiuk, L.L. Goncharova

**MATHEMATICAL MODELS AND METHODS OF THE ANALYSIS OF COMPUTER
NETWORKS FOR RAILWAY POWER SUPPLY CONTROL**

Abstract. The authors analyze the methods of innovative conversion of railroad power supply systems. Modern intelligent power supply networks are shown to represent a new quality of mutually integrated architecture of a distributed computer environment of power supply control and topology of traction electric network, focused on accumulating new knowledge and optimizing energy resources. For the synthesis of mathematical models of intelligence systems, the authors propose the graph of a distributed computing environment, which adequately reflects the topology of the railway electricity supply network. The paper also proposes a differential mathematical model of the distributed computer environment of intellectualization of the procedures of fully-variable power control and a set of methods to determine the probability of the state of nodes, bandwidth, the number of occupied channels, and the number of service denials.

Keywords: differential mathematical model, methods, graph, computer network architecture, intelligent networks, computer environment.

Стасюк Олександр Іонович,

доктор техн. наук, професор, завідувач кафедри Державного економіко-технологічного університету транспорту, Київ, e-mail: x177@rambler.ru.

Гончарова Лідія Леонідівна,

кандидат техн. наук, доцент кафедри Державного економіко-технологічного університету транспорту, Київ, e-mail: ktarael88@gmail.com.