

ДИФЕРЕНЦІЙНІ МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ АРХІТЕКТУРИ ВСЕРЕЖИМНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДИСТАНЦІЄЮ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦЬ

Анотація. Проаналізовано еволюційний розвиток систем електропостачання залізниць і комп'ютерних мереж та технологій керування ними. Показано, що основою оптимізації електроспоживання є напрямок, пов'язаний з інтелектуалізацією процедур електропостачання. Побудовано граф, топологія якого адекватно відображає типову архітектуру комп'ютерної мережі керування на рівні дистанції електропостачання залізниць, для дослідження взаємоінтеграції електромережевої інфраструктури та комп'ютерної архітектури всережимного керування. Запропоновано диференційну математичну модель для дослідження комп'ютерної архітектури всережимної системи керування дистанцією електропостачання та методи визначення в аналітичному вигляді значень ймовірностей станів вузлів, пропускної спроможності, кількості відмов заявок як основи інтелектуалізації процедур електропостачання.

Ключові слова: математичні моделі, методи, диференційні перетворення, граф, комп'ютерна мережа, архітектура, дистанція електропостачання, оптимізація.

ВСТУП

Дослідження еволюції мереж електропостачання залізниць виявило низку особливостей їхнього функціонування на відміну від енергосистем загального призначення. Такі мережі належать до класу розподілених багатоієрархічних систем. Перший рівень — тягові підстанції, другий — дистанції електропостачання, кожна із яких складається з n тягових підстанцій, третій — окрема залізниця. Негативний вплив подібної топології систем електропостачання залізниць спостерігається, в першу чергу, в значній несиметричності напруги живлення і несинусоїдальності внаслідок того, що процедура живлення реалізується між фазами [1, 2]. Подібна особливість електроспоживання на тягу зумовлює значну нерівномірність рухомих навантажень, що істотно впливає на системи захисту, режими функціонування залізничної автоматики, організацію захисту від короткого замикання, а також може призвести до системних аварій. Зменшення загальносистемних витрат електроенергії на тягу та виконання процедур оптимізації електроспоживання, надійності і безпеки руху можливо здійснити шляхом інтелектуалізації електричних мереж залізниць за допомогою створення сучасної моделі керування на основі інтегрованої розподіленої комп'ютерної мережі, архітектура якої адекватно відображає топологію залізничної системи електропостачання. Такий підхід потребує виконання наукових досліджень у галузі інформаційних і мережевих технологій, розроблення нових критеріїв оптимізації електропостачання, сучасних енергоощадних і безаварійних технологій та розширення ринкових можливостей. У процесі організації всережимної системи керування електроспоживанням залізниць на рівні дистанцій електропостачання важливою проблемою є створення математичних моделей, методів дослідження та оцінки комп'ютерної архітектури для неперервного моніторингу параметрів режимів, мінімізації втрат електроенергії і дотримання умов надійності і якості електроенергії [3].

Сучасні технології інтелектуалізації процесів керування і оптимізації електропостачання базуються на систематичному застосуванні обчислювальних систем і комп'ютерних мережевих технологій. У працях [1, 3] показано, що домінуючий напрямок досліджень у сфері керування в реальному часі комплексом технологічних процесів постачання електроенергії на тягу ґрунтується на технології SMART Grid. Перспективність цього підходу зумовлена необхідністю проведення додаткових досліджень і пошуку шляхів створення нових принципів, пов'язаних з організацією єдиного інформаційного простору, саморегуляції, самовідновлення, синхронних векторних вимірювань. Ці принципи у сукупності формують технологію керування швидкоплинними технологічними процесами споживання електроенергії залізничним транспортом, яка аналізує, контролює і звітує про їхній перебіг. При такому підході до організації системи електропостачання тягова електрична мережа являє собою нову якість взаємно інтегрованої топології електромережі і архітектури розподіленого комп'ютерного середовища, що відкриває можливість оптимізації енергоресурсів, формування нових енергоощадних технологій, покращення рівня безпеки руху і суттєвого розширення спектра ринкових послуг.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Аналіз розвитку мереж електропостачання, а також інноваційного перетворення тягових мереж залізниць засвідчив, що у науковій літературі більше досліджуються методи і комп'ютерні системи автоматизації керування енергоспоживанням [1, 2]. У той же час проблемі побудови комп'ютерних інформаційно-керувальних мереж, адекватних топології електричних тягових мереж, приділено недостатньо уваги. Створення подібних розподілених комп'ютерних мереж можливе в результаті проведення циклу досліджень з визначення загальних властивостей математичних моделей електромереж, методів, алгоритмів і обчислювальних архітектур. Важливим при цьому є розроблення і вивчення математичних моделей комп'ютерних архітектур всережимної системи керування електропостачанням. Це дозволить реалізувати інтелектуальні тягові електричні мережі, які дають можливість накопичити нові знання про електричні системи, значно підвищити їхню ефективність, оптимізувати сукупність загальносистемних витрат, запровадити динамічну інтегральну тарифікацію, а також суттєво розширити комплекс взаємних послуг на ринку електроенергії.

Мета роботи — на основі теорії диференційних перетворень розробити математичні моделі функціонування розподілених комп'ютерних архітектур всережимної системи керування дистанцією електропостачання залізниць та методів оцінки повномасштабного інформаційного забезпечення інтелектуальних електричних мереж залізниць.

ІННОВАЦІЙНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЗАЛІЗНИЦЬ

Ідеологія інноваційного перетворення тягових мереж базується на сучасній технології організації комплексної комп'ютерної інфраструктури, адекватній топології системи електропостачання, для проведення неперервного моніторингу параметрів режимів мереж електропостачання, включаючи силове електричне обладнання. Такий підхід надає можливість формування інтелектуальних мереж електропостачання, ключовими компонентами яких є інтелектуальне силове обладнання з вмонтованими мікроконтролерами, силова електроніка та мережі безпроводних датчиків з комп'ютерними чіпами. Архітектура подібного комп'ютерного середовища, орієнтованого на інтелектуалізацію

процедур керування електропостачанням, має три рівні [1, 2]. Перший рівень формує сукупність локальних мереж, кожна із яких адекватно відображає топологію відповідної тягової підстанції. Особливістю функціонування комп'ютерної інфраструктури є необхідність здійснення у реальному часі моніторингу, розв'язування комплексу задач оперативного керування і, головне, обміну інформацією між вузлами комп'ютерної мережі. Тому другий рівень формують із набору розподілених комп'ютерних мереж регіонального рівня дистанції електропостачання, вузлами якої є не тільки комп'ютерні компоненти, але і локальні мережі відповідних тягових підстанцій. Третій рівень — розподілена корпоративна комп'ютерна мережа окремої залізниці. Оскільки керування швидкоплинними технологічними процесами електропостачання тісно пов'язане з необхідністю своєчасного обміну інформаційними даними, розглянемо особливості організації розподілених локальних мереж регіонального рівня і методи синтезу математичних моделей для дослідження їхніх параметрів. Логічна структура локальної мережі регіонального рівня формується на основі двох типів топологій: «кільце» і «зірка». Архітектура розподіленої локальної мережі внаслідок гармонійного взаємного поєднання двох типів обчислювальних структур дозволяє адекватно відображати топологію електричної мережі дистанції електропостачання.

Типову розподілену локальну мережу регіонального рівня для інтелектуального керування електричними системами на рівні дистанції електропостачання представлено у вигляді графа на рис. 1. Сегмент топології комп'ютерної мережі типу «зірка» містить центральний сервер $P_0(t)$, сервер бази даних $P_1(t)$, вузол опитування локальних обчислювальних мереж тягових підстанцій $P_2(t)$, сервер зв'язку $P_3(t)$, вузол зв'язку по Internet $P_4(t)$, сервер оперативного диспетчерського

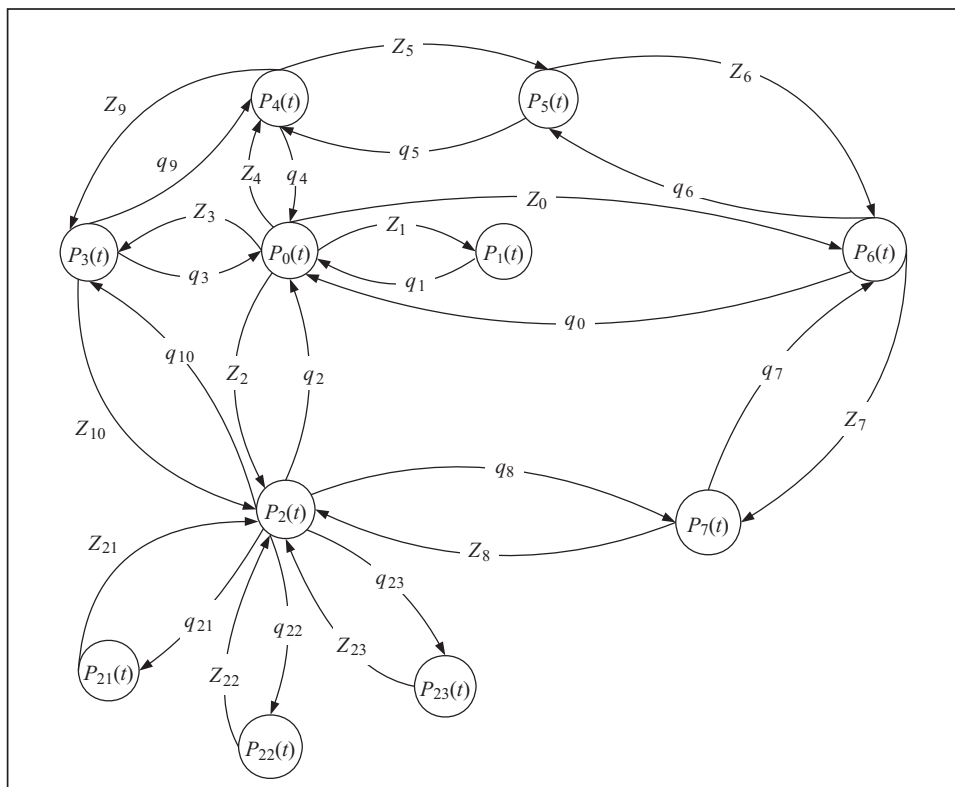


Рис. 1. Граф розподіленої локальної мережі дистанції електропостачання залізниць

керування $P_5(t)$, локальні обчислювальні мережі тягових підстанцій $P_{21}(t)$, $P_{22}(t)$, $P_{23}(t)$. У топологію логічної структури типу «коло» входять вузли інтелектуального оброблення комерційної інформації $P_6(t)$, продукування звітних документів $P_7(t)$, а також вузли $P_2(t)$, $P_3(t)$, $P_4(t)$, $P_5(t)$. Інтенсивність потоку заявок на обмін інформацією між вузлами розподіленої мережі позначимо як $q(t)$, а інтенсивність потоку обслуговування заявок відповідно як $Z(t)$. Модель локальної мережі дистанції електропостачання залізниць (див. рис. 1) розглянемо як систему масового обслуговування з очікуванням та обмеженою чергою [2]. Сукупність потоків $q(t)$, $Z(t)$ у системі, які є основою її переходу із одного стану в інший, належить до класу пуассонівських [5]. Синтезуємо математичну модель для визначення, в першу чергу, ймовірностей $P_0(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$, $P_4(t)$, $P_5(t)$, $P_6(t)$, $P_7(t)$, $P_{21}(t)$, $P_{22}(t)$, $P_{23}(t)$ стану вузлів системи, а потім на їхній базі побудуємо методи обчислення характеристик цієї моделі, таких як пропускна здатність, середній термін очікування заявок, середнє число заявок, що обслуговуються системою, і низка інших показників. Для дослідження комп'ютерної архітектури всережимної системи керування дистанцією електропостачання представимо граф (див. рис. 1) у вигляді рівнянь Колмогорова, використавши необхідний набір правил і формул [1]. Отримана система диференціальних рівнянь з відповідними початковими умовами буде мати такий вигляд:

$$\begin{aligned}
\frac{dP_0(t)}{dt} &= q_1P_1(t) + q_2P_2(t) + q_3P_3(t) + q_4P_4(t) + \\
&+ q_0P_6(t) - (Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4)P_0(t), \\
\frac{dP_1(t)}{dt} &= Z_1P_0(t) - q_1P_1(t), \\
\frac{dP_2(t)}{dt} &= Z_2P_0(t) + Z_8P_7(t) + Z_{10}P_3(t) + Z_{21}P_{21}(t) + Z_{22}P_{22}(t) + \\
&+ Z_{23}P_{23}(t) - (q_2 + q_8 + q_{10} + q_{21} + q_{22} + q_{23})P_2(t), \\
\frac{dP_3(t)}{dt} &= Z_3P_0(t) + Z_9P_4(t) + q_{10}P_2(t) - (q_3 + q_9 + Z_{10})P_3(t), \\
\frac{dP_4(t)}{dt} &= q_5P_5(t) + q_9P_3(t) + Z_4P_0(t) - (q_4 + Z_5 + Z_9)P_4(t), \\
\frac{dP_5(t)}{dt} &= q_6P_6(t) + Z_5P_4(t) - (q_5 + Z_6)P_5(t), \\
\frac{dP_6(t)}{dt} &= q_7P_7(t) + Z_0P_0(t) + Z_6P_5(t) - (q_0 + q_6 + Z_7)P_6(t), \\
\frac{dP_7(t)}{dt} &= q_8P_2(t) + Z_7P_6(t) - (q_7 + Z_8)P_7(t), \\
\frac{dP_{21}(t)}{dt} &= q_{21}P_2(t) - Z_{21}P_{21}(t), \quad \frac{dP_{22}(t)}{dt} = q_{22}P_2(t) - Z_{22}P_{22}(t), \\
\frac{dP_{23}(t)}{dt} &= q_{23}P_2(t) - Z_{23}P_{23}(t),
\end{aligned} \tag{1}$$

$$P_0(t_0) + P_1(t_0) + \dots + P_7(t_0) + P_{21}(t_0) + P_{22}(t_0) + P_{23}(t_0) = 1, \quad t_0 = 0,$$

$$P_0(t_0) = 1, \quad P_1(t_0) + P_2(t_0) + \dots + P_7(t_0) + P_{21}(t_0) + P_{22}(t_0) + P_{23}(t_0) = 0.$$

Запишемо систему (1) в області зображень у вигляді диференційної математичної моделі, застосувавши диференціальні перетворення Пухова [4]. Фундаментальні поняття теорії диференціальних перетворень задані парою математич-

них залежностей:

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

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 $P_i(t)$; Ξ — 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 Ξ , 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 Ξ , отримуємо функції-оригіналу $P_i(t)$. Зазначимо, що при $k=0$ 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 комп'ютерної архітектури всережимної системи керування дистанцією електропостачання залізниць у такому вигляді:

$$\begin{aligned} P_0(k+1) &= \frac{H}{k+1} [q_1 P_1(k) + q_2 P_2(k) + q_3 P_3(k) + q_4 P_4(k) + q_0 P_6(k) - \beta_1 P_0(k)], \\ P_1(k+1) &= \frac{H}{k+1} [Z_1 P_0(k) - q_1 P_1(k)], \\ P_2(k+1) &= \frac{H}{k+1} [Z_2 P_0(k) + Z_8 P_7(k) + Z_{10} P_3(k) + Z_{21} P_{21}(k) + \\ &\quad + Z_{22} P_{22}(k) + Z_{23} P_{23}(k) - \beta_2 P_2(k)], \\ P_3(k+1) &= \frac{H}{k+1} [Z_3 P_0(k) + Z_9 P_4(k) + q_{10} P_2(k) - \beta_3 P_3(k)], \\ P_4(k+1) &= \frac{H}{k+1} [q_5 P_5(k) + q_9 P_3(k) + Z_4 P_0(k) - \beta_4 P_4(k)], \\ P_5(k+1) &= \frac{H}{k+1} [q_6 P_6(k) + Z_5 P_4(k) - \beta_5 P_5(k)], \\ P_6(k+1) &= \frac{H}{k+1} [q_7 P_7(k) + Z_0 P_0(k) + Z_6 P_5(k) - \beta_6 P_6(k)], \\ P_7(k+1) &= \frac{H}{k+1} [q_8 P_2(k) + Z_7 P_6(k) - \beta_7 P_7(k)], \\ P_{21}(k+1) &= \frac{H}{k+1} [q_{21} P_2(k) - Z_{21} P_{21}(k)], \quad P_{22}(k+1) = \frac{H}{k+1} [q_{22} P_2(k) - Z_{22} P_{22}(k)], \\ P_{23}(k+1) &= \frac{H}{k+1} [q_{23} P_2(k) - Z_{23} P_{23}(k)] \end{aligned} \quad (3)$$

з початковими умовами, які в області диференційних зображень представлені таким чином: $P_0(t_0) = P_0(0) = 1$, $P_i(t_0) = P_i(0) = 0$, $P_{2i}(t_0) = P_{2i}(0) = 0$, $k = 0$,

$t_0 = 0, i = 1, 2, \dots, 7$, де $\beta_1 = (Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4)$; $\beta_2 = (q_2 + q_8 + q_{10} + q_{21} + q_{22} + q_{23})$; $\beta_3 = (q_3 + q_9 + Z_{10})$; $\beta_4 = (q_4 + Z_5 + Z_9)$; $\beta_5 = (q_5 + Z_6)$; $\beta_6 = (q_0 + q_6 + Z_7)$; $\beta_7 = (q_7 + Z_8)$.

Диференційна математична модель (3) є основою для визначення в аналітичному вигляді ймовірностей $P_0(t), P_1(t), P_2(t), P_3(t), P_4(t), P_5(t), P_6(t), P_7(t), P_{21}(t), P_{22}(t), P_{23}(t)$ стану вузлів комп'ютерної архітектури всережимної системи керування дистанцією електропостачання на тягу, представленої у вигляді графа. Підставивши значення початкових умов $P_0(t) = P_0(0) = 1, P_i(t_0) = P_i(0) = 0, P_{2i}(t_0) = P_{2i}(0) = 0, k = 0, t_0 = 0, i = 1, 2, \dots, 7$, у (3), при $k = 0$ отримаємо спектр дискрет $P_i(1), P_{2i}(1)$ у вигляді

$$\begin{aligned} P_0(1) &= -H\beta_1, P_1(1) = HZ_1, P_2(1) = HZ_2, P_3(1) = HZ_3, \\ P_4(1) &= HZ_4, P_5(1) = 0, P_6(1) = HZ_0, P_7(1) = 0, \\ P_{21}(1) &= 0, P_{22}(1) = 0, P_{23}(1) = 0. \end{aligned}$$

Підставимо значення $P_i(1), P_{2i}(1)$ у рівняння (3) і по аналогії з описаним вище при $k = 1$ отримаємо таку сукупність значень $P_i(2), P_{2i}(2)$:

$$\begin{aligned} P_0(2) &= \frac{H^2}{2} [q_1 Z_1 + q_2 Z_2 + q_3 Z_3 + \beta_1^2], P_1(2) = -\frac{H^2}{2} Z_1 (\beta_1 + Z_1), \\ P_2(2) &= \frac{H^2}{2} [Z_{10} Z_3 - Z_2 (\beta_1 + \beta_2)], P_3(2) = \frac{H^2}{2} [q_{10} Z_2 + Z_9 Z_4 - Z_3 (\beta_1 + \beta_3)], \\ P_4(2) &= \frac{H^2}{2} [Z_9 Z_3 - Z_4 (\beta_1 + \beta_4)], P_5(2) = \frac{H^2}{2} [q_6 Z_0 + Z_5 Z_4], \\ P_6(2) &= -\frac{H^2}{2} Z_0 (\beta_1 + \beta_6), P_7(2) = \frac{H^2}{2} (q_8 Z_2 + Z_7 Z_0), \\ P_{21}(2) &= \frac{H^2}{2} q_{21} Z_2, P_{22}(2) = \frac{H^2}{2} q_{22} Z_2, P_{23}(2) = \frac{H^2}{2} q_{23} Z_2. \end{aligned}$$

Для визначення ймовірностей $P_0(t), P_1(t), P_2(t), P_3(t), P_4(t), P_5(t), P_6(t), P_7(t), P_{21}(t), P_{22}(t), P_{23}(t)$ стану вузлів графа комп'ютерної мережі підставимо значення Т-дискрет $P_i(0), P_i(1), P_i(2), P_{2i}(0), P_{2i}(1), P_{2i}(2)$ в обернене диференційне перетворення $P_i(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{t}{H}\right)^k P_i(k)$ та отримаємо їх в аналітичному вигляді:

$$\begin{aligned} P_0(t) &= 1 - \beta_1 t + \frac{t^2}{2} (q_1 Z_1 + q_2 Z_2 + q_3 Z_3 + \beta_1^2), P_1(t) = Z_1 t - \frac{t^2}{2} Z_1 (\beta_1 + t_1), \\ P_2(t) &= Z_2 t + \frac{t^2}{2} [Z_{10} Z_3 - Z_2 (\beta_1 + \beta_2)], \\ P_3(t) &= Z_3 t + \frac{t^2}{2} [q_{10} Z_2 + Z_9 Z_4 - Z_3 (\beta_1 + \beta_3)], \\ P_4(t) &= Z_4 t + \frac{t^2}{2} [q_9 Z_3 - Z_4 (\beta_1 + \beta_4)], P_5(t) = \frac{t^2}{2} [q_6 Z_0 + Z_5 Z_4], \\ P_6(t) &= Z_0 t - \frac{t^2}{2} Z_0 (\beta_1 + \beta_6) = \left[1 - \frac{t}{2} (\beta_1 + \beta_6)\right] Z_0 t, P_7(t) = \frac{t^2}{2} (q_8 Z_2 + Z_7 Z_0), \\ P_{21}(t) &= \frac{t^2}{2} q_{21} Z_2, P_{22}(t) = \frac{t^2}{2} q_{22} Z_2, P_{23}(t) = \frac{t^2}{2} q_{23} Z_2. \end{aligned} \tag{4}$$

На основі цих ймовірностей розглянемо методи визначення сукупності характеристик комп'ютерної мережі. Ймовірність того, що буде прийнято і обслуговано потік заявок $q_0(t), q_1(t), q_2(t), q_3(t), q_4(t)$ центральним сервером, характеризується значенням $P_0(t)$. Якщо одна або декілька заявок потоку $q_0(t), q_1(t), q_2(t), q_3(t), q_4(t)$ отримають відмову, то її ймовірність $\lambda(t)$ буде доповненням $P_0(t)$ до одиниці, тобто

$$\lambda(t) = 1 - P_0(t) = \beta_1 t - \frac{t^2}{2} (q_1 Z_1 + q_2 Z_2 + q_3 Z_3 + \beta_1^2).$$

Пропускну спроможність $\Theta(t)$ центрального сервера комп'ютерної мережі все-режимної системи керування дистанцією електропостачання запишемо як

$$\Theta(t) = q_m(t)(1 - \lambda(t)) = q_m(t) \left(1 - \beta_1 t + \frac{t^2}{2} (q_1 Z_1 + q_2 Z_2 + q_3 Z_3 + \beta_1^2) \right),$$

$$q_m(t) = \max_i \{q_i(t)\}, \quad i = 1, 2, \dots$$

При цьому середнє число заявок $\Delta(t)$, що обробляються в комп'ютерній мережі, має вигляд

$$\Delta(t) = \frac{\Theta(t)}{Z_m(t)} = \frac{q_m \left(\beta_1 t - \frac{t^2}{2} (q_1 Z_1 + q_2 Z_2 + q_3 Z_3 + \beta_1^2) \right)}{Z_m(t)},$$

$$Z_m(t) = \max_i \{Z_i(t)\}.$$

Важливою характеристикою комп'ютерної мережі керування дистанцією електропостачання залізниць є визначення ймовірностей стану її другого вузла $P_2(t)$, яким є сервер опитування локальних комп'ютерних мереж керування електропостачанням тягових підстанцій. Ймовірність $P_2(t)$ стану другого вузла мережі, який обслуговує заявки $q_{21}(t), q_{22}(t), \dots, q_{2m}(t)$, що надходять від m локальних мереж тягових підстанцій, задано в аналітичному вигляді таким чином: $P_2(t) = Z_2 t + \frac{t^2}{2} [Z_{10} Z_3 - Z_2 (\beta_1 + \beta_2)]$. Ймовірність відмови $\lambda_2(t)$ обслуговування заявок $q_{21}(t), q_{22}(t), \dots, q_{2m}(t)$ визначимо виразом

$$\lambda_2(t) = 1 - P_2(t) = 1 - Z_2 t - \frac{t^2}{2} [Z_{10} Z_3 - Z_2 (\beta_1 + \beta_2)],$$

а пропускну спроможність $\Theta_2(t)$ другого вузла мережі і середнє число заявок $\Delta_2(t)$, які обробляє сервер зв'язку, запишемо таким чином:

$$\Theta_2(t) = q_{2m}(t)(1 - \lambda_2(t)) = q_{2m}(t) \left(Z_2 t + \frac{t^2}{2} [Z_{10} Z_3 - Z_2 (\beta_1 + \beta_2)] \right),$$

$$q_{2m}(t) = \max_j \{q_{2j}(t)\}, \quad j = 1, 2, \dots,$$

$$\Delta_2(t) = \frac{\Theta_2(t)}{Z_{2m}(t)} = \frac{q_{2m}(t) \left(Z_2 t + \frac{t^2}{2} [Z_{10} Z_3 - Z_2 (\beta_1 + \beta_2)] \right)}{Z_{2m}(t)},$$

$$Z_{2m}(t) = \max_j \{Z_j(t)\}.$$

Аналогічно можна визначити сукупність інших характеристик комп'ютерної мережі керування дистанцією електропостачання, наприклад для третього вузла $P_3(t)$, що орієнтований на обмін інформацією між корпоративною комп'ютерною мережею залізниці і ринком електроенергії.

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз еволюції систем електропостачання заліниць і комп'ютерних мереж керування ними показав, що мінімізація загальносистемних витрат електроенергії, оптимізація електроспоживання і безпеки руху можливі шляхом інтелектуалізації процедур електропостачання. Розв'язання цієї проблеми потребує проведення додаткових досліджень в галузі інформаційних і мережевих технологій, а також створення математичних моделей та методів дослідження і оцінки комп'ютерних архітектур для організації всережимної системи керування електроспоживанням заліниць.

2. З метою інтелектуалізації процедур електроспоживання на тягу побудовано граф, топологія якого адекватно відображає типову архітектуру комп'ютерної мережі керування на рівні дистанції електропостачання залізниці. Це дозволяє синтезувати математичні моделі і створити методи дослідження характеристик і глибини взаємоінтеграції електромережевої інфраструктури і комп'ютерної архітектури всережимного керування на рівні дистанції електропостачанням заліниць, а також оптимізувати електроспоживання, розширити ринкові можливості і стимулювати технологічний та економічний розвиток.

3. На основі диференційних перетворень Пухова запропоновано диференційну математичну модель дослідження комп'ютерної архітектури всережимної системи керування дистанцією електропостачання заліниць і на її базі — методи визначення в аналітичному вигляді значень ймовірностей станів вузлів комп'ютерної мережі, її пропускної спроможності, кількості відмов заявок на обслуговування та зайнятих каналів як основи інтелектуалізації процедур електропостачання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стасюк О.І., Гончарова Л.Л., Максимчук В.Ф. Методи організації інтелектуальних електричних мереж заліниць на основі концепції SMART Grid. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2014. № 2. С. 29–37.
2. 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.
3. Буткевич О.Ф., Левконюк А.В., Стасюк О.І. Підвищення надійності моніторингу допустимості завантажень контрольованих перетинів енергосистем. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 2. С. 56–67.
4. Пухов Г.Е. Преобразования Тейлора и их применение в электротехнике и электронике. Киев: Наук. думка, 1978. 259 с.
5. Венцель Е.С. Исследование операций. Москва: Сов. радио, 1972. 552 с.

Надійшла до редакції 21.04.2016

А.И. Стасюк, Л.Л. Гончарова

**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
КОМПЬЮТЕРНОЙ АРХИТЕКТУРЫ ВСЕРЕЖИМНОЙ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ДИСТАНЦИЕЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

Аннотация. Проанализировано эволюционное развитие систем электроснабжения железных дорог и компьютерных сетей и технологий управления ими. Показано, что основой оптимизации электропотребления является направление, связанное с интеллектуализацией процедур электроснабжения. Построен граф, топология которого адекватно отражает типовую архитектуру компьютерной сети управления на уровне дистанции электроснабжения железных дорог, для исследования взаимоинтеграции электросетевой инфраструктуры и компьютерной архитектуры всережимного управления. Предложена дифференциальная математическая модель для исследования компьютерной архитектуры всережимной системы управления дистанцией электроснабжения и методы определения в аналитическом виде значений вероятностей состояний узлов, пропускной возможности, числа отказов заявок как основы интеллектуализации процедур электроснабжения.

Ключевые слова: математические модели, методы, дифференциальные преобразования, граф, компьютерная сеть, архитектура, дистанция электроснабжения, оптимизация.

O.I. Stasuk, L.L. Goncharova

**DIFFERENTIAL MATHEMATICAL MODELS TO STUDY THE COMPUTER
ARCHITECTURE OF A FULLY INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEM
FOR DISTANT ELECTRIC SUPPLY ON RAILWAYS**

Abstract. The authors analyze the joint evolutionary development of power supply systems in railways and computer networks and their management technologies. It is shown that the basis of energy consumption optimization is related to intelligent power supply procedures. The authors propose a graph topology that adequately reflects the model architecture for computer network management at the level of railway power distance, for the mutual integration of grid infrastructure and computer architecture at all-management level of railway supply distance. The differential mathematical model is proposed for the analysis of the computer architecture of a fully integrated management system for power supply distance and methods are specified to determine, in analytical form, the probability values of the nodes, throughput capabilities, the number of failures, as the basis of intellectualization of power supply procedures.

Keywords: mathematical model, methods, differential, graph, computer network, architecture, distance of power supply, optimization.

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 Державного економіко-технологічного університету транспорту, Київ, e-mail: ktarael@yandex.ru.