

Міністерство транспорту України

Дніпропетровський державний технічний університет залізничного транспорту

Кузнецов Валерій Геннадійович



УДК 621.331.3

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ОБЛІКУ ТА КОНТРОЛЮ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
ДИСТАНЦІЙ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦЬ**

05.22.09 - Електротранспорт

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ - 2002

НТБ
ДНУЗТ

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі електропостачання залізниць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту Міністерства транспорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор Доманський Валерій Тимофійович,
Дніпропетровський державний технічний університет залізничного транспорту, завідуючий кафедрою електропостачання залізниць.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор Бурков Анатолій Трохимович,
Санкт-Петербурзький державний університет шляхів сполучень, Росія,
завідуючий кафедрою електропостачання залізниць.

кандидат технічних наук, доцент Скалозуб Владислав Васильович,
Дніпропетровський державний технічний університет залізничного транспорту, доцент кафедри комп'ютерних інформаційних технологій.

Провідна установа: Харківська державна академія залізничного транспорту, Міністерство
електричної тяги, м. Харків.

2 годині на засіданні спеціалізованої
державному технічному університеті
ровськ, вул. Академіка В.А. Лазаряна, 2.

тровського державного технічного

Костін М.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з першочергових задач залізничного транспорту України є перехід до реалізації енергооптимальних технологій здійснення процесів перевезень. Існуючий дефіцит потужності, зростання вартості електроенергії, малі темпи будівництва нових електрифікованих ліній збільшують актуальність цієї проблеми. Основою будь-якої енергозберігаючої політики повинна бути чітко налагоджена система обліку електроенергії. Автоматизована система обліку і контролю електроенергії сьогодні є незамінним і обов'язковим атрибутом цивілізованих розрахунків за електроенергію між суб'єктами енергоринок.

На сьогоднішній день вже накопичено великий досвід по проектуванню, створенню і експлуатації різноманітних автоматизованих систем обліку електроенергії у промисловості та на транспорті. Дані системи дозволили набагато підвищити надійність і вірогідність обліку електроенергії. Разом з тим усі ці системи були орієнтовані тільки на облік електроенергії і формування звітних документів. Перехід України на ринкові відносини, інформатизація технологічних процесів на залізничному транспорті, можливість розрахунків за електроенергію по диференційованих тарифах висунули на порядок денний ряд нових задач, що повинна вирішувати автоматизована система обліку і контролю електроенергії дистанції електропостачання (АСКОЕ).

Тому в даній дисертаційній роботі задача ставиться ширше – створити нову АСКОВЕ дистанції електропостачання, яка буде вбирати в себе всі позитивні якості, що були в попередніх системах, та разом з цим надасть користувачам додаткові можливості, а саме – рекомендації щодо раціонального переводу тягових підстанцій на диференційовані тарифи оплати за електроенергію, рекомендації по раціональному електрообігріванню приміщень дистанції електропостачання, надасть можливість прогнозування витрат електроенергії та надасть можливість проводити моніторинг спрацювання ресурсу силових трансформаторів тягових підстанцій.

У зв'язку з вищевикладеним тема роботи актуальна і її виконання доцільно для зменшення експлуатаційних витрат дистанції електропостачання, особливо в сучасних умовах роботи залізниць України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Представлена дисертаційна робота виконана відповідно до програми енергозбереження на залізничному транспорті України на 1996 – 2010 роки (розділ “Удосконалення обліку і впровадження багатофункціональних мікропроцесорних лічильників типа “Альфа”), а також за темами 23.01.98.99 “Інтелектуальні задачі та алгоритми рішення їх для управління приладами електропостачання електрифікованих залізниць”, номер держреєстрації 0199U001432; 23.02.00.01 “Розробка технології енергооптимального керування пристроями електропостачання електрифікованими ділянками залізниць”, номер держреєстрації 0101U002582.

Інститут інженерів
електричного
транспорту
НАН України

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є підвищення енергетичної ефективності роботи електрифікованих ліній залізниць шляхом створення систем АСКОЕ дистанцій електропостачання з новими функціональними можливостями.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові задачі:

- створити F-мережні моделі нижнього і верхнього рівнів АСКОЕ, сформулювати критерій вибору мікропроцесорних лічильників електроенергії і вибрати лічильники для АСКОЕ;

- створити математичні моделі раціонального переводу тягових підстанцій на диференційовані тарифи оплати за активну і реактивну електроенергію і раціонального електрообігрівання приміщень для підвищення енергетичної ефективності роботи електрифікованих ліній;

- вибрати та обґрунтувати методику прогнозування місячних витрат електроенергії дистанцій електропостачання на базі аналізу реальних витрат електроенергії тягових підстанцій Придніпровської залізниці;

- розробити інформаційну технологію непрямого контролю спрацювання ресурсу тягових трансформаторів.

Об'єкт дослідження - процеси споживання електроенергії електричним транспортом на залізницях України та в стаціонарній енергетиці.

Предмет дослідження автоматизовані системи обліку та контролю електроенергії дистанцій електропостачання.

Методи досліджень. Результати дисертації одержані за допомогою методів математичного моделювання, використання F-мереж, марковських процесів, методів аналізу часових рядів та математичної статистики, динамічного програмування.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Вперше запропоновані нові функції систем АСКОЕ, що підвищують енергетичну ефективність електричної тяги, в числі яких - раціональний перевід тягових підстанцій на диференційовані тарифи оплати за активну і реактивну електроенергію, контроль за раціональним електрообігріванням приміщень дистанцій електропостачання, прогнозування місячних витрат електроенергії тягових підстанцій, непрямої контроль за спрацюванням ресурсу тягових трансформаторів. Для реалізації цих функцій розроблено моделі раціонального переводу тягових підстанцій на диференційовані тарифи оплати за активну і реактивну електроенергію, раціонального електрообігрівання приміщень, теоретично обґрунтована доцільність застосування методу «Гусениця» для прогнозування місячних витрат електроенергії дистанцій електропостачання.

2. Розроблено F- мережні моделі системи АСКОЕ дистанції електропостачання з розширеною номенклатурою базових примітивів, що відбивають функціональні властивості й особливості

взаємодії електроспоживання в стаціонарній і тяговій енергетиці, що дозволяють вибрати раціональні структуру та алгоритми функціонування АСКОВ, що впливається в нові системи керування.

3. Сформульовано критерій вибору мікропроцесорних лічильників для систем АСКОВ (при цьому знайшла свій подальший розвиток модель мікропроцесорних лічильників на базі ланцюгів Маркова. Вдосконалена модель містить додаткову позицію – «сервісне обслуговування» і додаткові переходи, що більш повно відбивають стани лічильника в процесі життєвого циклу).

Практичне значення одержаних результатів визначається наступним:

1. АСКОВ з новими функціональними можливостями впроваджена на Павлоградській дистанції електропостачання Придніпровської залізниці.

2. Запропоновані в дисертаційній роботі методики раціонального перевodu тягових підстанцій на диференційовані тарифи оплати за електроенергію, раціонального електрообігрівання, прогнозування місячних витрат електроенергії дистанцій електропостачання використані в роботі нової організаційної структури залізниць «Енергозбут».

3. Розроблена інформаційна технологія непрямого контролю спрацьовування ресурсу трансформаторів тягових підстанцій зможе бути використана надалі для переходу від нормованої системи технічного обслуговування трансформаторів до найбільш прогресивної системи технічного обслуговування по фактичному стану. Це дасть можливість заощаджувати кошти на технічне обслуговування трансформаторів. Актуальність даної проблеми підвищується саме в сучасних умовах, коли розміри руху упали в середньому в 2 рази, а норми по технічному обслуговуванню трансформаторів залишилися колишніми. Дана технологія не вимагає установки дорогого діагностуючого устаткування.

Особистий внесок здобувача. Автору дисертації належать:

моделі оперативного прогнозування витрат електроенергії на тягу поїздів [1];

математична модель раціонального електрообігрівання приміщень [3];

математична модель раціонального перевodu тягових підстанцій на диференційовані тарифи [4];

методика визначення спрацьовування тягових трансформаторів по інформації від системи обліку електроенергії та реєстратора ударних струмів [5];

принципи побудови автоматизованих систем обліку та контролю електроенергії дистанцій електропостачання [7];

Роботи [2, 6] написані автором особисто.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертації доповідались і обговорювались на міжнародній конференції - 7th International Scientific Conference of Railway Experts ЮЖЕЛ-2000 (Yugoslavia, Vrnjacka Banja, october 4 – 6, 2000), на науковому семінарі

кафедри “Електропостачання залізниць” Санкт-Петербурзького державного університету шляхів сполучень, на міжнародному науковому симпозиумі „Eltraps 2001” (Росія, м. Санкт-Петербург, 23-28 жовтня 2001р.), на НТС Придніпровської залізниці (1999, 2000р.р.) та на розширеному засіданні кафедри “Електропостачання залізниць” Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту (2001р., м. Дніпропетровськ).

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано в п’яти наукових статтях у фахових виданнях та матеріалах двох міжнародних конференцій. Дві наукові статті написано без співавторів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, п’яти розділів, висновків, що викладені на 143 сторінках машинописного тексту і які містять 25 рисунків і 22 таблиці, переліку використаних джерел із 114 найменувань, викладеного на 12 сторінках, 5 додатків на 34 сторінках. Ілюстрації (рисунки), які розміщені на окремих сторінках дисертації, займають 15 сторінок. Повний об’єм дисертації складає 189 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дисертації подано обґрунтування актуальності теми досліджень, встановлено напрямки розвитку автоматизованих систем обліку та контролю електроенергії в промисловості та на транспорті, розглянуто загальну характеристику та основні результати роботи.

У першому розділі робиться аналітичний огляд існуючих автоматизованих систем обліку і контролю електроенергії на Україні та у країнах зарубіжжя. Даються основні шляхи розвитку АСКОВ на залізничному транспорті. Зазначено, що створення АСКОВ на залізничному транспорті є складовою частиною формування енергооптимальної технології перевезень. Необхідно відзначити, що значний вклад в вирішення цієї проблеми внесли слідуючи вчені: Бадер М.П., Бикадоров О.Л., Бородулін Б.М., Бурков А.Т., Гуртовцев О.Л., Григор’єв В.Л., Доманський В.Т., Жарков Ю.І., Железко Ю.С., Ісаєв І.П., Котельников О.В., Мамошин Р.Р., Марквардт К.Г., Марквардт Г.Г., Мірошніченко Р.І., Овласюк В.Я., Пупинін В.М., Фігуринов Є.П. Для розв’язання задач вдосконалення управління електропостачанням важливими є роботи Арзамасцева Д.А., Бородуліна Б.М., Венікова В.А., Германа Л.А., Динькіна Б.Є., Праховника О.В., Кохановича В.С., а також інших вчених. Зазначено, що на сьогоднішній день АСКОВ дистанції електропостачання повинна вирішувати не тільки класичні задачі систем обліку, генерувати звітні документи, але і вирішувати цілий ряд додаткових задач. Це і визначило основні напрямки досліджень у даній дисертаційній роботі – розробка і впровадження нової АСКОВ дистанції електропостачання з новими можливостями, що дозволяють заощаджувати електроенергію. Далі в роботі подається розробка структури і вибір основних компонентів АСКОВ дистанції електропостачання.

Указується, що при виборі мікропроцесорних лічильників електроенергії треба крім вартісних показників керуватися ще і характеристиками надійності. Тому для вибору лічильників запропоновано комплексний критерій – мінімум питомої вартості життєвого циклу

$$U = \frac{C_i + n_i S_{pi} + m_i S_{hi} + k_i S_{si} + \sum_{l=1}^l V_l t_l P_i}{T_i}, \quad (1)$$

де C_i – вартість лічильника, T_i – тривалість життєвого циклу лічильника, n_i – число ремонтів за час життєвого циклу (залежить від характеристик надійності конкретного лічильника), S_{pi} – вартість одного ремонту, m_i – число перевірок за час життєвого циклу, S_{hi} – вартість перевірки, S_{si} – вартість сервісного обслуговування (залежить від характеристик надійності конкретного лічильника), k_i – кількість сервісних обслуговувань у сервісних центрах (залежить від характеристик надійності конкретного лічильника), V_l – тариф на електроенергію для промисловості, l – кількість тарифних зон (за умови оплати за електроенергію по багатозонним тарифам), P_i – потужність споживана лічильником.

Для здійснення вибору лічильників за критерієм мінімуму вартості життєвого циклу знайшла свій подальший розвиток модель лічильників на основі марковських процесів (приведена на рис.1). Для створення моделі використано основні стани лічильника в процесі експлуатації – робота (W), перевірка (H), ремонт (R), сервісне обслуговування (S), вихід з ладу (O).

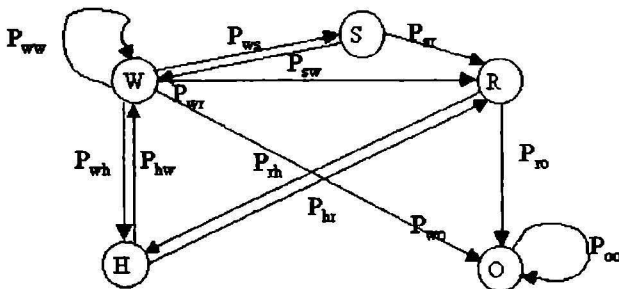


Рис.1. Ланцюг Маркова, що описує життєвий цикл лічильника

Таким чином, питому вартість життєвого циклу можна визначити, оцінивши для кожного типу лічильника змінні n_i , S_{pi} , m_i , S_{hi} , S_{si} , k_i , T_i (C_i , P_i відомі). Слід зазначити, що змінні n_i , S_{pi} , m_i , S_{hi} , S_{si} , k_i є випадковими величинами. Перехід лічильника з одного стану в інше – випадковий процес. За проведеними в дисертаційній роботі розрахунками лічильники сімейства „Альфа” мають найменшу величину питомої вартості життєвого циклу.

Структурна схема АСКОЕ дистанції електропостачання з такими лічильниками та новими функціями приведена на рис.2. При цьому прийняті наступні скорочення: ППД – пристрій передачі даних, ПЗД- пристрій збирання даних, ЦОП - центральний обчислювальний пристрій, ЕЧ – дистанція електропостачання, ЕЧЦ – енергодиспетчер, РРД – ремонтно-ревізійна дільниця, АРМ - автоматизоване робоче місце. Збирання інформації з лічильників здійснюється по інтелектуальним інтерфейсам типу „струмова петля”.

У другому розділі робиться опис запропонованої системи АСКОЕ та її поширених функцій. Запропоновано аналізувати АСКОЕ за допомогою апарата мереж Петрі з поширеними базовими примітивами. Створено мережні моделі апаратного та програмного забезпечення АСКОЕ. На рис.3 приводиться модель апаратного забезпечення АСКОЕ при циклічному опитуванні лічильників. Позиції P1...P8 позначають готовність лічильників передавати інформацію. Якщо лічильник готовий передавати інформацію, у даній позиції з'являється маркер. Позиція СЗЕ – система зовнішнього електропостачання. Переходи t1...t8 спрацьовують, коли лічильник передає повідомлення в ПЗД Переходи t9...t15- передача контрольного повідомлення в канал зв'язку (лічильник відключений від каналу зв'язку). Перехід t16 - вхід в ППД тягової підстанції по передачі даних. Маркер в позиції P17 позначає передачу інформації з лічильника в ППД. Позиція P18- ППД обробляє інформацію. Позиція P19- ППД вільний, маркер в цій позиції позначає готовність ППД передати дані. Перехід t17 – інформація в каналі зв'язку. Позиція P20 позначає передачу інформації з каналу зв'язку в центральний обчислювальний пристрій ЦОП. Перехід t18- інформація у ЦОП. P21- ЦОП обробляє інформацію. P22- ЦОП вільний, маркер в цій позиції позначає готовність ЦОП прийняти дані. Перехід t19 позначає готовність АРМа енергозбуту ЕЧ прийняти дані. На переходи t18 і t19 накладаються затримки часу 3 хв. і 0,5 с. відповідно, на перехід t17 також накладається імовірність відмовлення каналу зв'язку. Час спрацьовування переходу t18 є випадковою величиною. В середньому цей час дорівнює 3 хв. при передачі даних по каналах ТУ- ТС (цей час отриманий шляхом експериментальних вимірів, проведених при налагодженні системи АСКОЕ).

На цих моделях зроблено аналіз потоків інформації в системі обліку та обрані найбільш раціональні алгоритми опитування лічильників. Аналіз роботи АСКОЕ на мережних моделях показав, що АСКОЕ задовольняє вимогам до автоматизованих систем обліку і контролю електроенергії, а система може бути побудована на основі персонального комп'ютера Pentium 2 з оперативною пам'яттю не менш 64 Мб.

У третьому розділі вирішено задачі поширення функцій системи АСКОЕ, у тому числі вибір раціонального варіанту застосування диференційованих тарифів оплати за електроенергію для тижня потягів і стаціонарної енергетики.

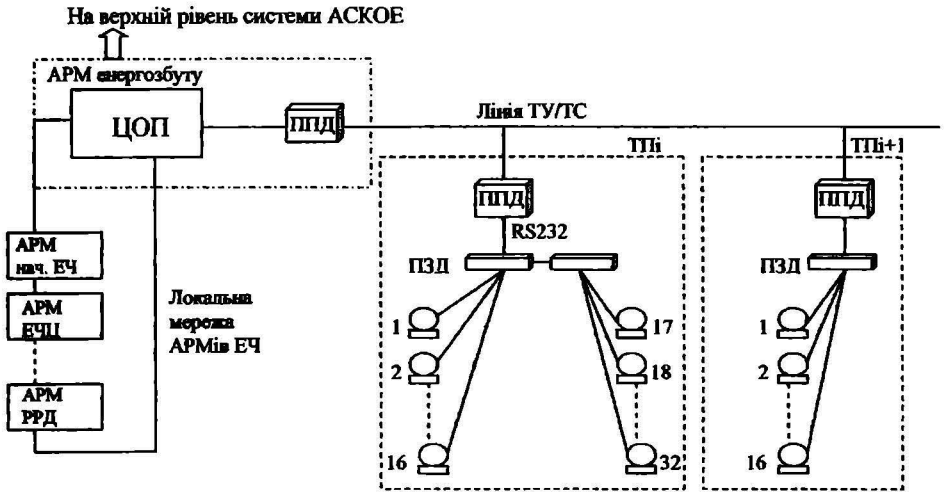


Рис.2. Структурна схема АСКОЕ дистанції електропостачання

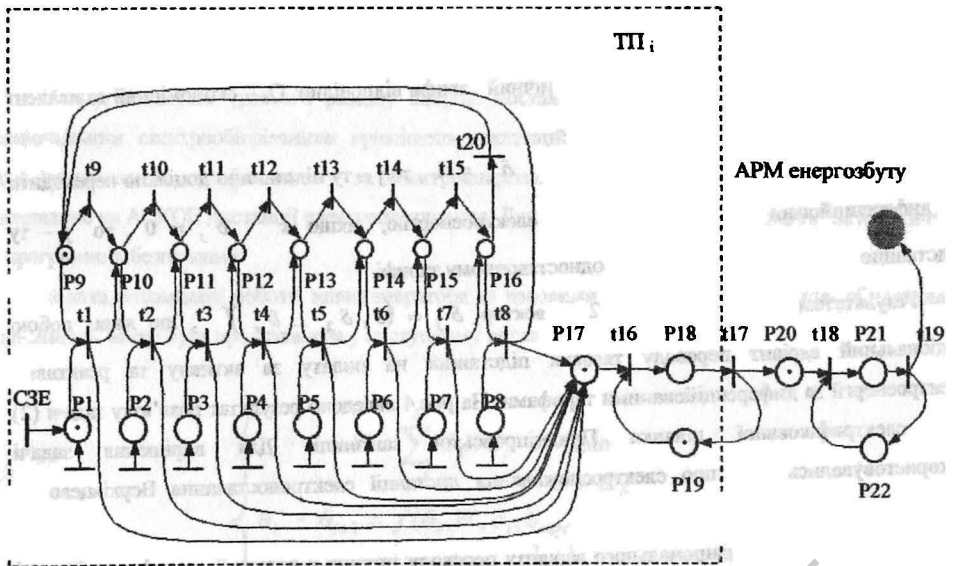


Рис.3. F-мережна модель апаратного забезпечення АСКОЕ при циклічному опитуванні лічильників

У першій частині цього розділу поставлена і вирішена задача раціонального перевodu тягових підстанцій дистанції електропостачання на диференційовані тарифи. У відмінності від запропонованої раніше методики перевodu ТП на диференційовані тарифи, раціональний варіант перевodu розраховується з урахуванням вартості як активної, так і реактивної енергій. Представимо задачу перевodu ТП на диференційовані тарифи по оплаті за активну та реактивну електроенергію у наступному вигляді:

$$\begin{cases} F = \sum_{j=1}^n (\sum_{i=1}^3 (WP_{ij} + WQ_{спij} \cdot Q_{ej}) \cdot C_i + \sum_{j=1}^n C_{одн} \cdot (WP_{ij} + WQ_{спij} \cdot Q_{ej}) (1 - \delta_j)) \rightarrow \min_{\delta \in D_\delta} \\ D_\delta = \{ \delta_j, \delta_j \in \{0; 1\} \} \\ j = \overline{1, N_m} \end{cases} \quad (2)$$

де WP_{ij} , $WQ_{спij}$ – витрати активної та спожитої реактивної електроенергії j -тою тяговою підстанцією в i -тій тарифній зоні ($i = \overline{1, \dots, 3}$); δ_j – двоїчні змінні. Кількість цих змінних дорівнює кількості тягових підстанцій; $C_{одн}$ – вартість 1 Квт*год активної електроенергії за одноставочним тарифом; $C_i = (C_1 \ C_2 \ C_3)^T$ – вектор – рядок тарифів; C_1, C_2, C_3 – вартість 1 Квт*год електроенергії в піковий, напівпіковий і нічний тарифи відповідно; Q_e – економічний еквівалент реактивної потужності.

Умовимося вважати також, що якщо $\delta_j = 1$, то j -ту підстанцію доцільно переводити на диференційовані тарифи по оплаті за електроенергію, якщо ж $\delta_j = 0$, то j -ту підстанцію раціонально залишити на одноставочному тарифі.

Результатом розв'язку задачі (2) є вектор $\delta_j = (\delta_1 \ \delta_2 \ \dots \ \delta_n)^T$, що являє собою раціональний варіант перевodu тягових підстанцій на оплату за активну та реактивну електроенергії за диференційованими тарифами. На рис.4 наведено результат розв'язку задачі (2) для електрифікованої ділянки Придніпровської залізниці. Для вирішення задачі використовувались дані про електроспоживання дистанції електропостачання Верхівцево за 2000 р.

Аналогічний вибір раціонального варіанту перевodu тягових підстанцій на диференційовані тарифи оплати за електроенергію зроблено для всіх дистанцій електропостачання Придніпровської залізниці. Виходячи із зроблених розрахунків, пропонується зменшити експлуатаційні витрати дистанцій електропостачання в середньому на 3-6% завдяки вибору раціонального варіанта перевodu тягових підстанцій на диференційовані тарифи.

Комплексне розв'язання питань застосування різних тарифів оплати за електроенергію, економічності роботи електротягових систем при здійсненні перевізного процесу можливо буде при інтегруванні АСКОВ з системою керування пристроями електропостачання з розподіленням інтелектом і експертною системою прийняття рішень.

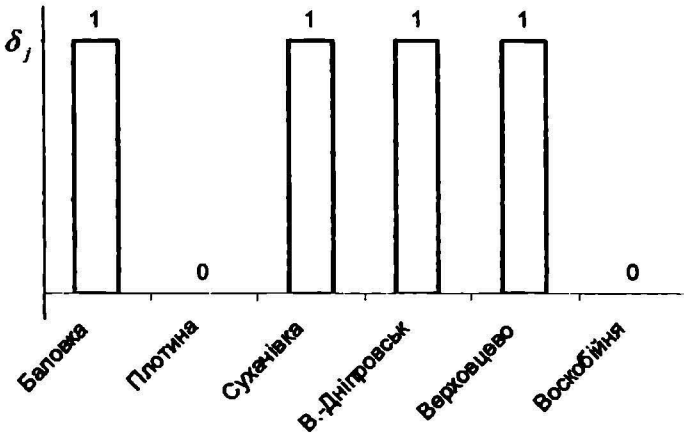


Рис.4. Результат розв'язання задачі (3) для електрифікованої ділянки Придніпровської залізниці

У другій частині третього розділу вперше поставлена і вирішена задача контролю за раціональним електрообігріванням приміщень дистанцій електропостачання при застосуванні диференційованих тарифів оплати за електроенергію. Причому, вперше рішення цієї задачі покладено на АСКОВ дистанцій електропостачання. Для цього розроблено відповідне математичне і програмне забезпечення.

Задача оптимізації роботи теплогенератора за часовими тарифними зонами при обігріванні приміщень може бути представлена у наступному вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} F = \sum_{i=1}^n C_i W \delta_i \rightarrow \min \\ \delta \in D_\delta \\ \theta_i^- \leq \theta_{i+1} = f(\theta_i, W, \delta_i, \theta_{опт}, M, R_s) \leq \theta_i^+, \\ D_\delta : \{ \delta_i : \delta_i \in \{0, \frac{1}{5}, \frac{2}{5}, \dots, 1\} \}, \\ i = 1, 2, 3, \dots, n, \end{array} \right. \quad (3)$$

де θ_i - середня температура повітря у середині приміщення; $\delta = \{\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n\}$ є вектором керуючих впливів ("ввімкнути" теплогенератор при $\delta=1$ на повну потужність чи "вимкнути" - при

$\delta=0$, включити на будь-яку доступну проміжну потужність - $\delta=1/5, 2/5..$); $\theta_{окр i}$ – температура навколишнього середовища.

Розіб'ємо добовий процес електрообігрівання будинку на n часових інтервалів. Процес декомпозиції електрообігрівання приміщень наведено на рис.5.

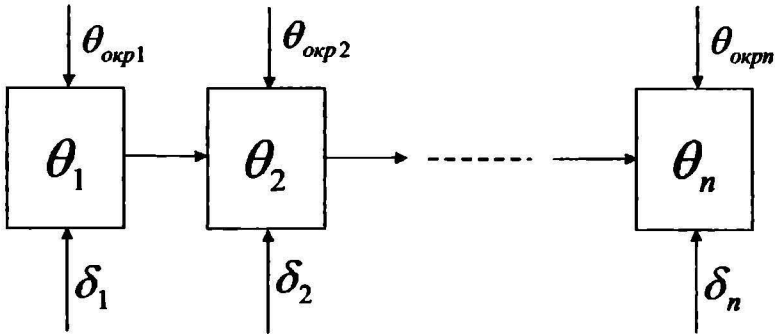


Рис.5. Процес декомпозиції електрообігрівання приміщень на окремі кроки

У загальному випадку θ_{i+1} залежить від попередньої температури θ_i , спожитої електроенергії теплогенератором від мережі W , управління δ_i , температури навколишнього середовища $\theta_{окр i}$, маси повітря в приміщенні M , деякого еквівалентного теплового опору R_e . Величини θ_i^+ і θ_i^- вибираються виходячи з технологічної доцільності, у загальному випадку вони не є постійними величинами, а залежать від часу t .

На кожнім i – тім кроці керування δ_i приносить "виграш":

$$F_i = C_i W \delta_i, \quad (4)$$

де C_i – діючий на інтервалі Δt_i тариф оплати за електроенергію. W – спожита за час Δt_i електроенергія з мережі змінного струму.

Основне рекурентне рівняння динамічного програмування, що виражає умовний оптимальний виграш F_i на i - тім кроці, можна записати в наступному виді:

$$F_i = \min_j \{C_i W \delta_i + C_{i+1} W \delta_{i+1}\}. \quad (5)$$

Зробимо умовну оптимізацію n -го, $(n-1)$ -го, $(n-2)$ -го кроків і для кожного кроку розрахуємо умовне оптимальне керування δ_i , при якому досягається мінімум цільової функції в (3). Після процедури безумовної оптимізації керування теплогенератором одержимо вектор

$\delta^* = (\delta_1^*, \delta_2^*, \dots, \delta_n^*)$, що забезпечує оптимальну зміну температури θ . Дана задача відноситься до задач динамічного програмування і для її розв'язання розроблений спеціальний алгоритм, що є модифікацією алгоритму Дейкстри. Для розв'язання задачі використана теплова модель «Будинкою», що враховує всі основні фізичні процеси при електрообігріванні приміщень – теплопровідність, сонячну радіацію, інфільтрацію. Будинок замінюється еквівалентними тепловим опором і теплоємністю.

У четвертому розділі приводяться вимоги, яким повинна відповідати прийнята модель прогнозу електроенергії, як важлива функція системи АСКОЕ. На основі приведених вимог з використанням методів самоорганізації прогнозуючих моделей виконується вибір найбільш придатної моделі прогнозу місячних витрат електроенергії для оперативного керування та для вирішення задачі раціонального переходу на диференційовані тарифи оплати за електроенергію. Приведено аналіз можливості застосування для прогнозу витрат електроенергії авторегресійних моделей, що мають у своїй основі теорію аналізу часових рядів. Для прогнозу місячних витрат електроенергії розглядаються метод сезонної хвилі і метод, відомий у літературі за назвою «Гусениця». У роботі дається оцінка розмірності задачі, показується, що для побудови робастних, рекурсивних прогнозів місячних витрат електроенергії необхідна база прогнозу (для обраних дистанцій електропостачання) складає 2 роки. Вибрано раціональні структури моделей. Нехай $X_1, X_2, \dots, X_p$ - часовий ряд, що описує зміни місячних витрат електроенергії, $t = \overline{1, p}$ і нехай $X(t)$ – передбачувана теоретична залежність, що відповідає експериментальній. Функцію $X(t)$ у досліджуваному інтервалі часу можна при виконанні деяких умов представити нескінченним рядом синусоїдальних і косинусоїдальних функцій (гармонік), наприклад, якщо функція кусочно-монотонна й обмежена (умови Дирихле). Тоді рівняння прогнозу за методом сезонної хвилі можна записати в наступному виді:

$$X(p+1) = A^{(0)} + \sum_{i=1}^r \left[A^{(i)} \sin\left(\frac{2\pi}{p} i(p+1)\right) + B^{(i)} \cos\left(\frac{2\pi}{p} i(p+1)\right) \right]. \quad (6)$$

Коефіцієнти $A^{(0)}$ і $B^{(i)}$, $A^{(0)}$ оцінюються за методом найменших квадратів.

Крім того, у четвертому розділі приводиться аналіз можливості застосування для прогнозу місячних витрат електроенергії дистанції електропостачання методу «Гусениця». Метод «Гусениця» (друга назва методу – метод виділення головних компонентів ряду) полягає в розкладанні заданого часового ряду місячних витрат електроенергії $X_1, X_2, \dots, X_n$ по векторах

$$V^{(0)} = (V_1^{(0)}, V_2^{(0)}, \dots, V_M^{(0)}), \quad (7)$$

де $1 \leq j \leq g$. g - ранг ряду місячних витрат електроенергії, M - довжина "гусениці"

Центральним моментом в методі "Гусениця", від якого залежить успіх прогнозування, є вибір довжини "гусениці", або інтервалу згладжування M . В дисертаційній роботі вибрано раціональний інтервал згладжування. Прогнозування місячних витрат електроенергії за методом "Гусениця" полягає в рішенні наступної системи рівнянь:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^r h_j V_1^{(j)} = \tilde{x}_{N-M+k+1} \\ \sum_{j=1}^r h_j V_{M-1}^{(j)} = \tilde{x}_{N+k-1}, \quad 1 \leq k \leq l \end{cases} \quad (8)$$

де $h_1^*(k), h_2^*(k), \dots, h_r^*(k)$ - рішення системи (8), k - інтервал прогнозування.

Тоді

$$\tilde{x}_{N+k} = \sum_{j=1}^r h_j^*(k) V_M^{(j)} \quad (9)$$

На рис.6 приведені результати прогнозування місячних витрат електроенергії за методом «Гусениця», та за методом сезонної хвилі для Павлоградської дистанції електропостачання на 1999-2000р.р. Для прогнозу використані дані за 1997-1998р.р. При цьому середня за 2 роки помилка прогнозу для метода сезонної хвилі складає 3,17%, а для метода "Гусениця" - 2,23%.

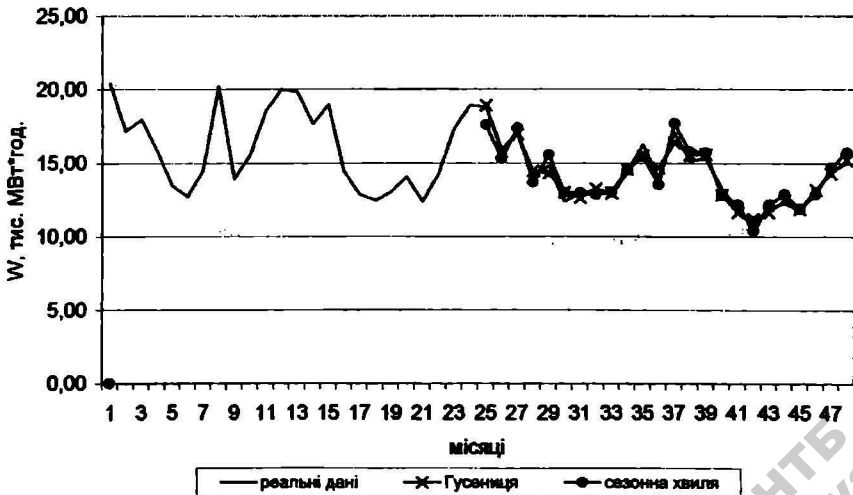


Рис.6. Прогнозування місячних витрат електроенергії за методами "Гусениця" та "Сезонна хвиля" для Павлоградської дистанції електропостачання.

Порівняння методів сезонної хвилі і «Гусениця» дозволяє зробити висновок, що метод «Гусениця» цілком можливо застосовувати для прогнозування місячних витрат електроенергії дистанції електропостачання. При цьому середні помилки прогнозу менші, ніж за методом сезонної хвилі.

У п'ятому розділі дисертаційної роботи розроблено інформаційну технологію контролю спрацювання ресурсу тягових трансформаторів на базі інформації від АСКОЕ. Відомі два підходи до проблеми забезпечення необхідної надійності пристроїв. Перший заснований на тому, що необхідна надійність пристроїв на весь період експлуатації забезпечується при його конструюванні, проектуванні і виготовленні. Другий підхід передбачає проведення в ході експлуатації робіт профілактичного характеру, що входять у систему технічного обслуговування пристроїв.

Варто мати на увазі, що в умовах експлуатації процеси старіння, викликані різними зовнішніми навантаженнями, протікають одночасно, складним образом впливаючи один на одного. Для організації серйозного експлуатаційного контролю і прогнозу залишкового ресурсу доцільне створення загальної моделі спрацювання ресурсу обмоток трансформатора з урахуванням взаємного впливу цих процесів один на одного. Завдяки застосуванню в пропонованій автоматизованій системі обліку високоінтелектуальних лічильників електроенергії стало можливим зберігати в пам'яті лічильників інформацію зі споживаної електроенергії, про струми, що мали місце у фазах трансформаторів, напруги з прив'язкою до реальних міток часу. Цей факт і був покладений в основу пропонованої інформаційної технології моніторингу спрацювання ресурсу тягових трансформаторів за даними від АСКОЕ. Вихідними даними для розрахунку є струми у фазах трансформатора, одержані від АСКОЕ і зафіксовані реєстраторами ударних струмів струми короткого замикання. Моніторинг спрацювання ресурсу тягових трансформаторів заснований на узагальненій моделі. Відносне старіння ізоляції тягових трансформаторів за деякий відрізок часу l складе:

$$F_{об} = K_D F_D + K_T F_T = \frac{K_D \sum_{j=1}^I i_{\mathcal{U}}^2}{n_o^2 u_o} + K_T \cdot 2 \frac{\theta_{нтт} - \theta_{нтт0}}{\Delta} \quad (10)$$

де K_D і K_T - вагові коефіцієнти теплового і динамічного старіння трансформатора (у загальному випадку між ними існує функціональна залежність. Для точної їх ідентифікації вимагаються подальші дослідження); $\theta_{нтт}$ - температура найбільш нагрітої точки трансформатора, що залежить від температури навколишнього середовища і температури масла (для її обчислення використовуються фазні струми трансформатора, отримані від АСКОЕ);

$\theta_{ннтб}$ - базова температура обмотки; $\Delta = 6^{\circ}\text{C}$; i_{yo} - найбільший ударний струм глухого короткого замикання на вторинній стороні, що допускається даним трансформатором; n_o - число коротких замикань максимальної кратності зі струмом i_{yo} , що допускається трансформатором без утрати динамічної стійкості; i_{yj}^2 - ударний струм j -го короткого замикання у процесі експлуатації; $j=1,2,\dots,l$ - число коротких замикань за розглянутий період. На рис.7 приведена структурна схема запропонованого пристрою контролю спрацьовування ресурсу тягових трансформаторів.

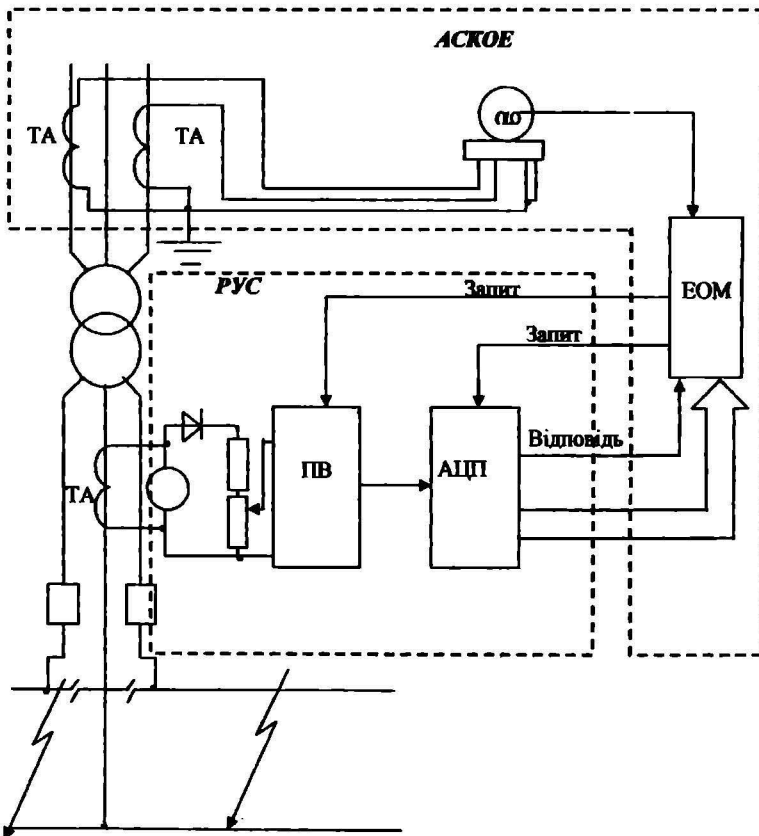


Рис.7. Структурна схема пристрою контролю спрацьовування тягового трансформатору:
 ЕОМ - електронна обчислювальна машина;
 РУС - реєстратор ударних струмів;
 ПВ - піковий вольтметр;
 АЦП - аналогово-цифровий перетворювач.

Мікропроцесорний лічильник «Альфа» фіксує витрату електроенергії (чи струми у фазах трансформаторів при наявності лічильників Євроальфа чи Альфа+), а автоматичний реєстратор ударних струмів короткого замикання (РУС) вимірює величину ударних струмів. Ця інформація передається в ЕОМ, де виконується розрахунок ступеня спрацювання ресурсу трансформатора.

РУС складається з пікового вольметра (ПВ) і аналогово-цифрового перетворювача (АЦП). Піковий вольметр включається в ланцюг трансформатора струму (ТА) через дільник напруги. ТА включений у відсмоктуючу фазу дозволяє фіксувати ударні струми коротких замикань у тяговій мережі обох під'їзів живлення. Для забезпечення нормального режиму роботи ТА до нього підключений амперметр (А). Величина струму в тяговій мережі контролюється ПВ. Коли струм зростає до значення, що перевищує максимально припустиму величину, ПВ класифікує це як виникнення короткого замикання, цей параметр запам'ятовується і передається в АЦП. АЦП по команді процесора перетворює цей сигнал і передає інформацію в ЕОМ. Для синхронізації роботи пристрою ЕОМ постійно веде опитування ПВ і АЦП.

Розглянута методика може з успіхом застосовуватися для нових трансформаторів, що вводяться в експлуатацію. Тоді разом із введенням трансформатора в експлуатацію необхідно організувати контроль вироблення його ресурсу. Це дозволить надалі перейти від системи нормованого технічного обслуговування трансформаторів до більш прогресивної системи обслуговування по фактичному стану.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена задача підвищення економічності роботи електрифікованих ліній залізниць шляхом створення систем АСКОВЕ дистанцій електропостачання з новими функціями. Виконані в дисертації дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. Розроблена та впроваджена нова система АСКОВЕ дистанції електропостачання, що відрізняється від попередніх систем розширеними функціями, реалізація яких дасть змогу позитивно впливати на економію експлуатаційних витрат дистанції електропостачання.

2. Показано, що при виборі мікропроцесорних лічильників електроенергії доцільно крім вартісних показників керуватися ще й характеристиками надійності. Запропоновано комплексний критерій вибору таких лічильників – мінімум вартості життєвого циклу. При цьому знайшла свій подальший розвиток модель мікропроцесорних лічильників на базі ланцюгів Маркова. Показано, що для нових систем АСКОВЕ раціонально застосовувати мікропроцесорні лічильники сімейства „Альфа”.

3. Для аналізу роботи АСКОВЕ дистанції електропостачання розроблено F-мережні моделі апаратного та програмного забезпечення системи АСКОВЕ з розширеною номенклатурою базових

примітивів, що відбивають функціональні властивості системи АСКОЕ. На цих моделях проаналізовано алгоритми роботи АСКОЕ. Це дало можливість вибрати раціональні протоколи опитування лічильників для задоволення вимогам енергопередавальних компаній.

4.Вдосконалено математичну модель раціонального перевodu тягових підстанцій на диференційовані тарифи оплати за активну та реактивну електроенергію, яка базується на інформації, що надходить від АСКОЕ дистанції електропостачання. Модернізована модель враховує вартість реактивної енергії в цільовій функції. Показано, що при застосуванні методики раціонального перевodu тягових підстанцій на диференційовані тарифи можна знизити експлуатаційні витрати в дистанціях електропостачання в середньому на 3-6%.

5.Вперше запропоновано за допомогою системи АСКОЕ (окремим програмним модулем) вирішувати задачу раціонального електрообігрівання приміщень дистанцій електропостачання. Створено відповідне математичне, алгоритмічне, інформаційне забезпечення. Це дозволяє сьогодні вести електрообігрівання приміщень по раціональній технології, враховуючи специфіку оплати за електроенергію по диференційованим тарифам, заощаджуючи 5-13% коштів.

6.Для оперативного керування та вирішення задачі раціонального перевodu підстанцій на диференційовані тарифи в дисертаційній роботі аналізується доцільність та можливість застосування при прогнозуванні місячних витрат електроенергії методів сезонної хвилі та "Гусениця" Виконані дослідження показали, що цілком доцільно використовувати метод "Гусениця" Досліджено раціональні структури моделі. Вирішено питання про необхідну величину бази прогнозу. При цьому помилка прогнозування знаходиться у межах інженерної точності - 2-4%.

7.Розроблена на базі інформації від АСКОЕ технологія моніторингу спрацьовування тягових трансформаторів дозволяє перейти від системи нормованого технічного обслуговування трансформаторів до більш прогресивної системи обслуговування по фактичному стану.

8.Результати досліджень і розробок впроваджено на Павлоградській дистанції електропостачання Придніпровської залізниці у вигляді комплексу апаратних та програмних засобів. Економічний ефект від впровадження складає 15 тис. грн.

Основні положення та результати дисертації опубліковані у таких працях:

1.Цейтлин С.Ю., Кузнецов В.Г. Модели оперативного прогнозирования расхода электроэнергии на тягу по данным мониторинга и информационного моделирования процессов грузовых железнодорожных перевозок.//Транспорт. Математичне моделювання в інженерних та економічних задачах транспорту: Зб. наук. пр. – Дніпропетровськ: Січ. -1999. -С. 133-139.

2. Кузнецов В.Г. Анализ надёжности тяговых трансформаторов по данным микропроцессорных счётчиков "Альфа" // Транспорт. Повышение эффективности работы устройств электрического транспорта: 36. наук. пр. – Дніпропетровськ: Січ. -1999. –С. 52-58.

3. Кузнецов В.Г., Доманский В.В. Анализ эффективности применения дифференцированных тарифов оплаты за электроэнергию для потребителей транспорта // Транспорт. Выпуск 5: 36. наук. пр. – Дніпропетровськ: Наука і освіта. -2000. –С. 4-10.

4. Авохов И.В., Корниенко В.В., Доманский В.Т., Кузнецов В.Г., Кибиткин С.Л. Проблемы использования дифференцированных тарифов на железнодорожном транспорте // Залізничний транспорт України. -2000. -№3. –С. 36-40.

5. Корниенко В.В., Кузнецов В.Г., Доманский В.В., Сергатов А.Н. Контроль надёжности трансформаторов на основе обобщённой модели износа // 7 th International Scientific Conference of Railway Experts. Proceedings. ЛУЖЕЛ – 2000. Yugoslavia, Vrnjacka Banja. -P.249-251.

6. Кузнецов В.Г. Математическая модель выбора микропроцессорных счётчиков/Транспорт. Выпуск №7: 36. наук. пр. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, -2001. –С. 69-72.

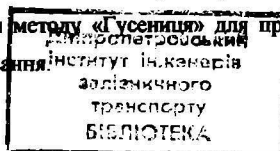
7. Доманский В.Т., Кузнецов В.Г. Автоматизированная система учёта и контроля электроэнергии дистанции электроснабжения // Труды междунар. симп. «Электрификация и развитие железнодорожного транспорта России. Традиции, современность, перспективы (Eltrans 2001). -Санкт-Петербург (Россия). -2001. - С. 79-80.

АНОТАЦІЯ

Кузнецов В.Г. Автоматизована система обліку та контролю електроенергії дистанцій електропостачання залізниць. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.22.09 – електротранспорт. Дніпропетровський державний технічний університет залізничного транспорту, Дніпропетровськ, 2002.

Створена нова система АСКОВЕ дистанцій електропостачання залізниць з новими функціями, що підвищують енергетичну ефективність електричної тяги, в числі яких - раціональний перевід тягових підстанцій на диференційовані тарифи оплати за активну і реактивну електроенергію, контроль за раціональним електрообігріванням приміщень дистанцій електропостачання, прогнозування місячних витрат електроенергії тягових підстанцій, непрямої контроль за спрацюванням ресурсу тягових трансформаторів. Для реалізації цих функцій розроблені моделі раціонального переведу тягових підстанцій на диференційовані тарифи оплати за активну і реактивну електроенергію, раціонального електрообігрівання приміщень, теоретично обґрунтована доцільність застосування методу «Гусениця» для прогнозування місячних витрат електроенергії дистанцій електропостачання.



Ключові слова: автоматизована система обліку і контролю електроенергії, F-мережі, Марковські процеси, диференційовані тарифи, аналіз часових рядів, динамічне програмування.

АННОТАЦИЯ

Кузнецов В.Г. Автоматизированная система учёта и контроля электроэнергии дистанций электроснабжения железных дорог. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – электротранспорт. Днепропетровский государственный технический университет железнодорожного транспорта, Днепропетровск, 2002.

Разработана новая автоматизированная система учёта и контроля электроэнергии дистанций электроснабжения железных дорог (АСКУЭ), отличающаяся расширенными функциями, позволяющими влиять на экономию электроэнергии. В числе дополнительных функций АСКУЭ – рациональный перевод тяговых подстанций на дифференцированные тарифы оплаты за активную и реактивную электроэнергию, контроль за рациональным электрообогревом помещений дистанций электроснабжения, прогнозирование месячных расходов электроэнергии тяговых подстанций, косвенный контроль за выработкой ресурса тяговых трансформаторов.

Указано, что при выборе микропроцессорных счётчиков для новых АСКУЭ необходимо руководствоваться не только их стоимостью, но ещё учитывать и надёжность счётчиков. Для выбора микропроцессорных счётчиков предложен комплексный критерий – минимума стоимости жизненного цикла счётчика. Нашла своё дальнейшее развитие модель счётчика на основе цепей Маркова. Усовершенствованная модель содержит дополнительную позицию и дополнительные переходы, более полно отражающие состояния микропроцессорных счётчиков в процессе эксплуатации. По проведенным расчётам для АСКУЭ дистанций электроснабжения железных дорог рекомендуются микропроцессорные счётчики семейства «Альфа».

Предложена структурная схема АСКУЭ дистанций электроснабжения при использовании микропроцессорных счётчиков. Для анализа работы АСКУЭ в условиях дистанций электроснабжения предложены F-сетевые модели аппаратного и программного обеспечения, которые имеют расширенные базовые примитивы. В результате моделирования установлены работоспособность АСКУЭ в основных режимах работы (циклический опрос счётчиков, опрос одиночного счётчика по команде оператора) и отсутствие тупиковых ситуаций, выявлены рациональные интервалы опроса счётчиков.

Для реализации функции рационального перевода тяговых подстанций на дифференцированные тарифы оплаты за электроэнергию усовершенствована предложенная ранее модель перевода. Модернизированная модель при выборе рационального варианта расчётов за электроэнергию учитывает стоимость как активной, так и реактивной электроэнергии. На

электрифицированных линиях Приднепровской железной дороги проведены экспериментальные исследования процессов электропотребления подстанций в условиях применения дифференцированных тарифов оплаты. Полученные при этом результаты свидетельствуют о том, что при переводе тяговых подстанций на рациональные варианты расчётов за электроэнергию уже сегодня возможно на некоторых электрифицированных участках Приднепровской железной дороги снизить оплату за электроэнергию на 3-5%.

Впервые предложено с помощью АСКУЭ управлять электрообогревом помещений дистанций электроснабжения при применении дифференцированных тарифов. Для решения задачи помещение заменяется тепловой схемой замещения «Дом». В ней учитываются геометрические размеры помещения; материалы, из которых изготовлены стены, перекрытия, окна, двери, пол и т.д. Учитывается тепловая инерционность помещений, влияние солнечной радиации и инфильтрации воздушной массы внутри помещения. Формализована и решена задача рационального электрообогрева помещений, использующая алгоритм Дейкстры для поиска рационального варианта электрообогрева. Созданное математическое, программное и алгоритмическое обеспечение может быть использовано для программирования микропроцессорных устройств управления теплогенераторов типа «Экотеп», «Эко» и других.

Обоснованы модели прогнозирования месячных расходов электроэнергии. Прогноз месячных расходов электроэнергии необходим для решения задачи рационального перевода тяговых подстанций на дифференцированные тарифы оплаты за электроэнергию, для предупреждения уплаты штрафов за превышение лимита расхода электроэнергии, при оперативной работе. Показано, что при наличии постоянно функционирующей АСКУЭ дистанции электроснабжения наиболее целесообразно строить прогнозы месячных расходов электроэнергии на основе авторегрессионных моделей. В диссертационной работе рассматривается возможность применения методов «Сезонная волна» и «Гусеница». Прогнозируемые значения расходов электроэнергии тяговых подстанций Приднепровской железной дороги сравнивались с измеренными по микропроцессорным счётчикам «Альфа» в период с 1996г. по 2000г. Полученная средняя ошибка прогноза находится в пределах инженерной точности.

Создана информационная технология контроля выработки ресурса тяговых трансформаторов по информации от АСКУЭ. При этом используется информация от регистраторов ударных токов и от АСКУЭ о величинах токов в фазах трансформатора с привязкой к реальным меткам времени. Данная технология не требует установки дорогостоящего диагностического оборудования и позволит в дальнейшем перейти от системы нормированного технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) тяговых трансформаторов к более перспективной системе ТО и Р по фактическому состоянию.

Ключевые слова: автоматизированная система учёта и контроля электроэнергии, F-сети, Марковские процессы, дифференцированные тарифы, анализ временных рядов, динамическое программирование, выработка ресурса тяговых трансформаторов

ABSTRACT

Kuznetsov V.G. The automated system of record and control of the electric power of electrosupply distances of iron roads. - Manuscript.

Dissertation for a techniques candidate's degree inspeciality 05.22.09 – electric transport. Dnepropetrovsk state technical university of railway transport. Dnepropetrovsk, 2002.

The new automated system of the account and the control of the electric power of electrosupply distances of railways with new functions which raise power efficiency of electric draft among which - rational translation traction substations on multirates tariffs of payment for the active and jet electric power, the control for rational heating by electricity premises of distances of electrosupply, forecasting of monthly expenses of the electric power of traction substations, the indirect control of operation of a resource of traction transformers is created. For realization of these functions the developed models of rational translation of traction substations on multirates tariffs of payment for the active and jet electric power, rational heating by electricity the premises, theoretically proved expediency of application of a method "Caterpillar" for forecasting monthly expenses of the electric power of distances electrosupply.

Key words: the automated system of the account and control of power, F-network, processes of Markov, multirates tariffs, analysis of temporary lines, dynamic programming.

Кузнецов Валерій Геннадійович

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ОБЛІКУ ТА КОНТРОЛЮ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДИСТАНЦІЙ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦЬ

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Підписано до друку „4” *лютого* 2002р. Формат 60×84 1/16. Папір для множних апаратів. Гарнітура Times New Roman Суг. Ум. друк. арк. 1,0. Безкоштовно.

Тираж 100 прим.

Дніпропетровський державний технічний університет залізничного транспорту.

Адреса університету та дільниці оперативної поліграфії ДНТУ:

49010, Дніпропетровськ, 10, вул. Акад. В.А. Лазаряна, 2.

Сканувала Юнаковська В. В.

НТБ
ДНУЗТ