

Міністерство транспорту України

Дніпропетровський державний технічний університет залізничного транспорту

Землянов Володимир Борисович

УДК 621.331.1

**ЕНЕРГООПТИМАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ АНАЛІЗУ ТА РЕГУЛЮВАННЯ
ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ НА ТЯГУ ПОЇЗДІВ**

05.22.09 Електротранспорт

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

м. Дніпропетровськ, 2000р.

**НТБ
ДНУЗТ**

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Дніпропетровському державному технічному університеті залізничного транспорту Міністерства транспорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор Доманський Валерій Тимофійович, завідувачий кафедрою електропостачання залізниць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор Пушинін Володимир Миколайович,
професор кафедри електропостачання залізниць Московського державного університету шляхів сполучень, Росія,

кандидат технічних наук, доцент Гетьман Геннадій Кузьмич,
доцент кафедри електрорухомого складу залізниць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту.

Провідна організація:

Харківська державна академія залізничного транспорту Міністерство транспорту України,

іданні

сому

зргу за адресою:

2.

ровського державного технічного



Костін М.О.

НТБ
ДНУЗТ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

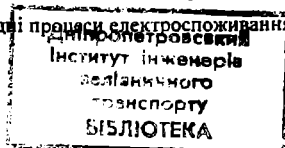
Актуальність теми. Ефективність використання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) в різних галузях нашої країни у три рази нижче ніж в промислово розвинутих країнах Західної Європи та США. Потенціал енергозбереження в економіці, на транспорті, в соціальній сфері України оцінюється на рівні 42 – 48% від обсягу споживання ПЕР. Разом з тим власне виробництво ПЕР в країні не перевищує 50%. Основою енергетичної політики залізничного транспорту України являється стимулювання енергозбереження і підвищення ефективності споживання енергії. Указом президента України № 662/99 від 16 червня 1999 року всім державним підприємствам, в тому числі залізницям, необхідно забезпечити скорочення енергоспоживання на 3 – 6 % щорічно з досягненням загальної економії енергії 25 % порівняно до базового 1998 року. На цей період енергетична політика, вироблена Міністерством України, орієнтована на стабілізацію та зниження питомих витрат, на введення в дію нових систем управління процесом перевезень, стандартів і сертифікатів на енергообладнання, на вирівнювання навантажень тягових підстанцій з метою економії електроенергії та зниження втрат в електротягових мережах і мережах енергосистем, на перехід до диференційованих тарифів по часовим зонам доби, що передбачає впровадження автоматичних систем аналізу та регулювання електроспоживання, потребує зміни підходів до організації руху поїздів з урахуванням необхідності оптимізації електроспоживання.

Вказані задачі в значній мірі можуть бути вирішені шляхом застосування інформаційних технологій аналізу та регулювання електроспоживання електротягових мереж, реалізації енергооптимальних планів формування і графіків руху поїздів, зниження обсягів маневрової роботи, ефективного застосування диференційованих тарифів оплати за електроенергію.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Представлена дисертаційна робота виконана відповідно до програми енергозбереження залізничного транспорту України на 1996 – 2010 роки (розділ “Розробка і впровадження експертної системи з розподіленням інтелектом для управління процесом перевезень”), розглянуті дослідження включені в плани робіт країн Організації співробітництва залізниць (розділ 10.1. Підвищення енергетичної ефективності систем електроспоживання залізниць), а також за темою 2301.98.99 “Інтелектуальні задачі та алгоритми рішення їх для управління приладами електропостачання електрифікованих залізниць”, номер держреєстрації №0199U001432.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є розробка інтегрованих енергооптимальних технологій аналізу і регулювання електроспоживання електротягових систем залізничного транспорту для зменшення енергетичних витрат процесу перевезень.

Об'єктом даного дослідження є процеси перевезень електричним транспортом на залізницях України і відповідні процеси електроспоживання.



НТБ
ДНУЗТ

6076a

Предметом дослідження виступають інформаційні системи аналізу і регулювання режимів роботи електротягових мереж залізничного транспорту.

Методи досліджень: результати дисертації одержані за допомогою методів математичного моделювання, використання мереж Петрі, методів регресійного аналізу та математичної статистики, нелінійного програмування, а також методів побудови баз даних і баз знань.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язані наступні задачі:

обґрунтовано актуальність і розроблено рекомендації щодо концептуальних засад, структури, обсягів інтегрованої системи управління електропостачанням залізничного транспорту;

виконано експериментальні дослідження процесів електроспоживання на тягу поїздів, створено алгоритми аналізу та регулювання електроспоживанням, які можуть використовуватися в рамках енергооптимальної технології процесу перевезень;

розроблено моделі регулювання електроспоживанням на тягу поїздів в умовах застосування диференційованих тарифів оплати;

розроблено інтегровану інформаційну технологію регулювання процесу перевезень за критерієм мінімуму втрат електроенергії в системах тягового і зовнішнього електропостачання;

розроблено методики і алгоритми формування інформаційних баз експертних систем, які автоматизують функції підтримки процесів регулювання електроспоживанням.

- обґрунтовано комплекс технічних і програмних засобів, реалізовано елементи інтегрованої технології аналізу і регулювання електроспоживанням електротягових мереж.

Наукова новизна одержаних результатів дисертації полягає в наступному:

- на основі експериментальних досліджень процесів електроспоживання встановлено енергетичні закономірності та розроблено інформаційні технології регулювання електроспоживанням на тягу поїздів, які відрізняються інтегруванням інформації в процесі прийняття рішень і дозволяють мінімізувати експлуатаційні витрати при здійсненні перевезень на електрифікованих лініях залізниць;

запропоновано багаторівневу систему регулювання електроспоживанням тяги поїздів, відмінність якої полягає в перетворенні поточних даних в бази знань експертних систем, що забезпечує енергетичну ефективність прийняття оперативних рішень в умовах неповної інформації;

- виконано подальший розвиток інформаційної моделі процесу перевезень, який полягає в урахуванні енергетичних складових витрат при формуванні поїздопотоків, а також в можливості застосування диференційованих тарифів оплати електроенергії;

- розроблені наукові положення щодо зменшення витрат процесу перевезень, які ґрунтуються на інформаційній вагонній моделі процесу перевезень і відрізняються урахуванням енергетичних складових витрат при формуванні поїздопотоків, а також умовами застосування диференційованих тарифів оплати;

НТБ
ДНУЗТ

- для організації раціонального перевезу тягових підстанцій на диференційований тариф оплати за електроенергію розроблено нові моделі одно- і двокритеріальних оптимізаційних задач.

Практичне значення одержаних результатів визначається наступним

- розроблено рекомендації Р612/4 щодо розробки інтегрованої системи управління електропостачанням залізничного транспорту країн Організації співробітництва залізниць(ОСЗ).

розроблені технології енергозбереження при здійсненні процесу перевезень включені в міжнародну програму розвитку залізничного транспорту країн ОСЗ.

- математичне, інформаційне та програмне забезпечення створеної технології частково реалізоване в якості програмних підсистем, які входять у склад автоматизованої системи оперативного управління перевезеннями що експлуатується на Укрзалізниці.

реалізована підсистема сумісного збору оперативної інформації про процеси перевезень і електроспоживання, яка розв'язує першочергові задачі формування енергетичної моделі залізниць.

Особистий внесок здобувача. В статтях [1-4, 6] здобувачу належить визначення напрямків розвитку інформаційних технологій забезпечення перевезень, формулювання моделей і основних висновків, вибір методів дослідження та аналіз отриманих результатів. Науковий внесок автора складає: встановлення напрямків удосконалення та розробка складових частин сучасних інформаційних технологій забезпечення перевезень [1]; - аналіз можливостей енергозбереження, пов'язаних з новими технологіями [2]; - розробка процедур розрахунків, які враховують структуру та реальні обсяги даних про процес перевезень, відображених в інформаційній моделі [3]; - постановка задачі та пропозиції щодо розробки математичних моделей переходу на диференційований тариф оплати [4]; визначення структури моделі оперативного регулювання електроспоживанням на тягу поїздів [6].

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертації доповідались і обговорювались на міжнародній науково-практичній конференції "Інформаційні технології на транспорті. Стан і напрямки розвитку" (1998, м. Київ); 5th, 7th International Scientific Conference of Railway Experts. ЈУЖЕЛ-98, ЈУЖЕЛ-2000 (Yugoslavia, Vrnjaska Banja, october 28 – 30, 1998; october 4 – 6, 2000); на міжнародних науково-методичних нарадах "Електропостачання залізничного транспорту" (1998, 2000. м. Дніпропетровськ), на міжнародних конференціях "Комп'ютерне моделювання" (1999, 2000. м. Дніпродзержинськ), на раді експертів щодо пристроїв електропостачання і електричної тяги ОСЗ, пункт 5 проект "Рекомендацій з інтегрованої системи управління електроспоживанням залізничного транспорту"(с. Штрба, Словачька республіка, 23 – 25 травня 2000); на нараді Главку ЦШЕОТ Укрзалізниці (09 – 10 вересня 1999, м. Дніпропетровськ); на наукових семінарах кафедр електропостачання електрифікованих залізниць і комп'ютерних інформаційних технологій ДНІГу (1998, 1999, 2000. м. Дніпропетровськ).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 10 науково-технічних робіт.

НТБ
ДНУЗТ

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, містить 176 сторінки друкованого тексту, має 34 рисунки, список використаних літературних джерел зі 114 найменувань, має 3 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дисертації подано обґрунтування актуальності теми досліджень, встановлюються напрямки розвитку інтегрованих систем управління електропостачанням залізничного транспорту, що пов'язуються з реалізацією енергооптимальної технології процесу перевезень на базі створення вагонної та енергетичної моделей залізниць, розглянуто загальну характеристику та основні результати роботи..

В першому розділі зроблено огляд літератури з питань аналізу електроспоживання на тягу поїздів в інформаційних системах залізничного транспорту, а також щодо оцінки можливостей регулювання електроспоживанням. Подано наступні напрямки досліджень: аналіз і регулювання електроспоживання, облік електроенергії в пристроях електропостачання залізниць як складова частина інформаційних технологій, проблема управління електроспоживанням тяги поїздів. При цьому висвітлено комплексний характер проблеми зменшення електроспоживання, що потребує системного підходу до її розв'язання з урахуванням засобів перевезень, сучасного стану ринку енергоресурсів, головних організаційних структур відповідних інформаційних систем. Встановлено, що вдосконалення інформаційних технологій аналізу та регулювання електропостачанням при відносно незначних додаткових витратах дає змогу розробки і реалізації енергооптимальних планів формування та графіків руху поїздів, ефективного застосування диференційованих тарифів оплати за електроенергію, інтеграції систем управління процесом перевезень і систем управління електропостачанням.

Задача створення інтегрованої інформаційної технології аналізу і регулювання електроспоживання являється складовою частиною формування енергооптимальної технології перевезень залізничного транспорту. В розробку цієї технології значний вклад внесли вчені: Бадер М.П., Бикадоров О.Л., Бурков А.Т., Григорьев В.Л., Ісаєв І.П., Котельников О.В., Мамошин Р.Р., Марквардт К.Г., Марквардт Г.Г. Мірошніченко Р.І., Овласюк В.Я., Пушинін В.М., Фігурнов 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., Доманського В.Т., Жаркова Ю.І., Железко Ю.С., Праховника О.В., Кохановича В.С., а також інших вчених.

Важливим сучасним напрямком розвитку інформаційних систем залізничного транспорту постає задача зменшення постійно зростаючих питомих витрат на спожиті енергоресурси, для електрифікованих залізниць це обсяги та вартість електроенергії. Зменшення обсягів електроспоживання на тягу поїздів і вартості спожитої електроенергії зараз являються одними з

НТБ
ДНУЗТ

найактуальних задач залізничного транспорту України. При цьому сучасний напрямок вдосконалення інформаційних технологій полягає в підвищенні їх інтелектуальності, створенні і застосуванні методів експертних і партнерських систем.

Представлений аналіз показав актуальність робіт, направлених на побудову багаторівневих інтегрованих інформаційних технологій підвищення ефективності процесу перевезень, які включають вагонну і енергетичну моделі залізниці, а також систему математичних моделей, методик і алгоритмів їх реалізації в умовах застосування диференційованих тарифів оплати, які призначені для інформаційних систем регулювання процесами електроспоживання на тягу поїздів.

У другому розділі проведено розробку енергооптимальних технологій інтегрованих систем управління пристроями електропостачання тяги поїздів. Досліджено мету та основні задачі створення інтегрованої інформаційної технології для систем управління електропостачанням (ІТУЕ), розроблено концепцію побудови інтегрованих систем управління електропостачанням залізничного транспорту, рекомендовану для країн Організації співробітництва залізниць. В розділі розглянуто комплекс задач, пов'язаних з формуванням структури та визначенням функцій ІТУЕ, створенням багаторівневих інформаційних структур диспетчерського регулювання процесів перевезень і електроспоживання.

На рис.1 наведено структуру і функції інтегрованої інформаційної технології процесу перевезень (ІТП), яка розробляється на Придніпровській залізниці і має відмінність використанням двох джерел даних – повагонного відображення процесу перевезень в реальному масштабі часу, а також даних про відповідне електроспоживання на тягу поїздів. Формування структури і основних функціональних можливостей ІТП виконано відповідно до запропонованої методики побудови інтегрованих систем. На рис. позначено: ПП – процес перевезень, ПЕ – процеси електроспоживання, ВМД – вагонна модель залізниці, ЕМД – енергетична модель, СТЕ – система тягового електроспоживання, ТП – тягові підстанції, БД, БЗ – бази даних і знань, АСКУЕ – система комерційного обліку електроенергії.

Передбачена трьохрівнева структура управління системою: – 1) інформаційне, математичне і програмне забезпечення рівня управління тяговими підстанціями та контактною мережею (У1);

2) рівня управління дистанцією електроспоживання (У2); –3) рівня управління служби електропостачання залізниці (У3). На рис.1 показано, що інформація про процеси перевезень (вагони, поїзди, контейнери, інші.) формується на основі повідомлень АСОУП, які організуються у вигляді оперативних і архівних баз даних (БД АСОУП) як одного з важливих компонентів ІТП. Інформаційне і програмне забезпечення ІТП розміщується в структурах main frame, які зв'язані за допомогою глобальних і локальних комп'ютерних мереж з іншими інформаційно-керуючими підсистемами ІТП. В main frame розміщені дані і програмні системи ВМД, ЕМД, інші моделі ІТП. Повідомлення з першоджерел (процеси перевезень – АСОУП та електроспоживання – лічиль-

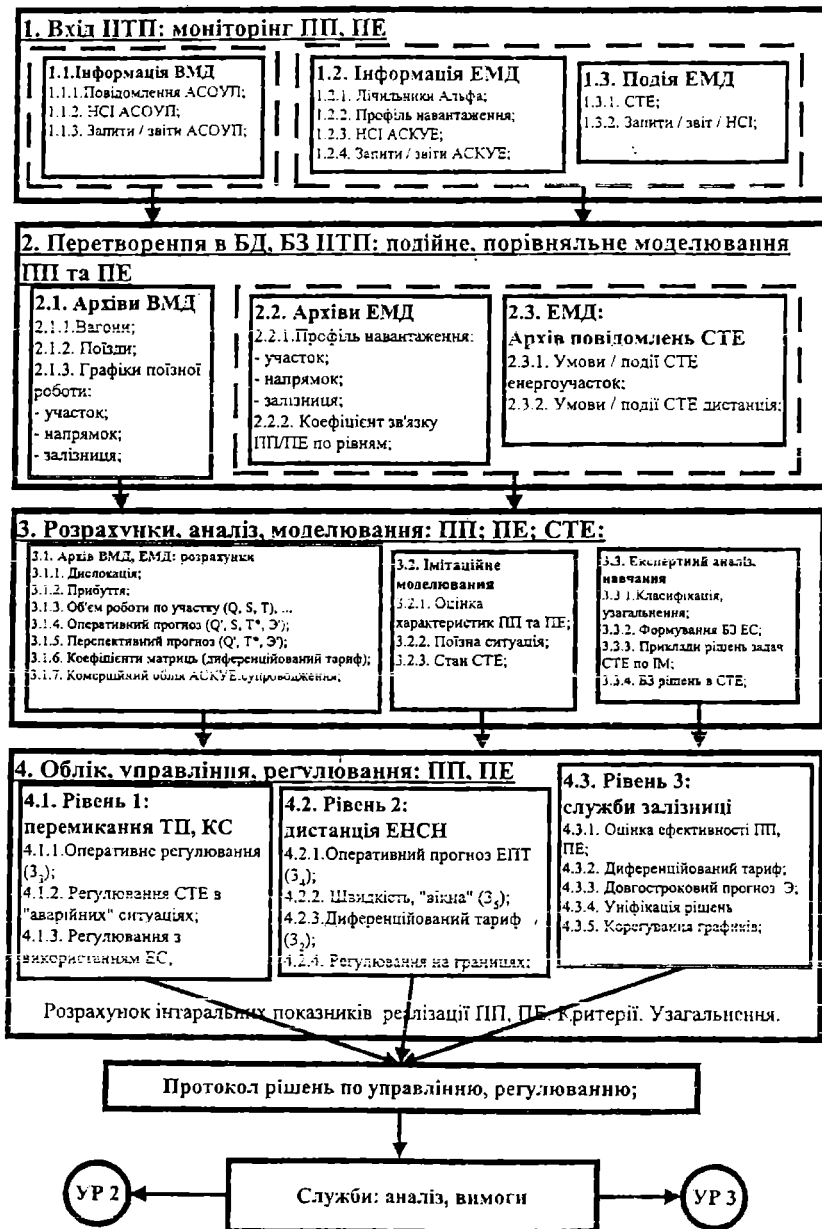


Рис.1 Структура та функції інтегрованої інформаційної технології

Альфа ПП) надходять до інформаційних структур моделей в перетвореному вигляді відповідні входи (входи ВМД, ЕМД, управління, регулювання, експертного аналізу імітаційного моделювання). В складі ІТПП передбачені програми дискретного моделювання і спеціалізовані програми імітаційного моделювання СТЕ. Споживачі інформації ІТПП: управління та служби залізничні, вантажевідправники, автоматизована система управління вагонним парком України (АСК ВП УЗ), системи АСУ СС, інші.

Структурна схема організації передачі даних від лічильників Альфа в main frame, що показана на рис.2, забезпечує отримання наступної інформації. Дані щодо реалізованих профілей споживання електроенергії на тягу поїздів від ТП, які надходять в концентратори, передаються локальною мережею в персональні комп'ютери служби енергопостачання. Надалі формуються повідомлення для входу ЕМД. Повідомлення про профілі навантаження для всіх споживачів електроенергії являються базовими для автоматизованої системи АСКУЕ. Оперативні повідомлення про стан СТЕ за допомогою локальних обчислювальних мереж передаються на входи ЕМД.

метою обґрунтування методик щодо забезпечення запропонованих технологій допомогою моделей Петрі з пріоритетом побудовано модель для дослідження підсистеми збору первинної інформації про процеси електроспоживання електротягових мереж. В кінці розділу запропоновано варіант програмно-технічних засобів для реалізації ІПТУЕ.

В третьому розділі дисертації подано дані експериментальних досліджень процесів електроспоживання на тягу поїздів з урахуванням часових зон диференційованих тарифів оплати, проведених на Придніпровській залізниці за допомогою мікропроцесорних лічильників Альфа, а також на основі моделювання процесу перевезень в рамках ВМД. В результаті аналізу визначені основні характеристики і закономірності процесів електроспоживання в різні періоди часу диференційованих тарифів, встановлена актуальність задачі регулювання цими процесами за критерієм мінімуму вартості електроенергії, а також обґрунтовано економічну ефективність перевезу окремих ТП на багатотарифну оплату за електроенергію (по зонам нічного, напівнічного, пікового тарифів).

Іспити щодо визначення характеристик електроспоживання на розроблених програм у версії жовтні 1998 р. на ділянці Нікополь – Марганець, а в 1999 – 2000 роках в більшості ТП залізниці. Вони дозволили одержати варіації, точкові та інтервальні оцінки статистичних характеристик процесів, встановити досить високу кореляцію між результатами моделей ВМД та ЕМД ($r_{\text{дл}} = 0.843$), показали недосаток використання можливостей диференційованих тарифів для зниження вартості спожитої електроенергії. Визначено, що споживання електроенергії в піковій зоні являється найбільш нестабільним, а перехід на диференційовані тарифи на дослідженій ділянці Нікополь – Марганець дозволив би зменшити вартість електроенергії на 6,5%. Типові профілі добового електроспоживання за місяць підстанцій ЕЧ Залоріж

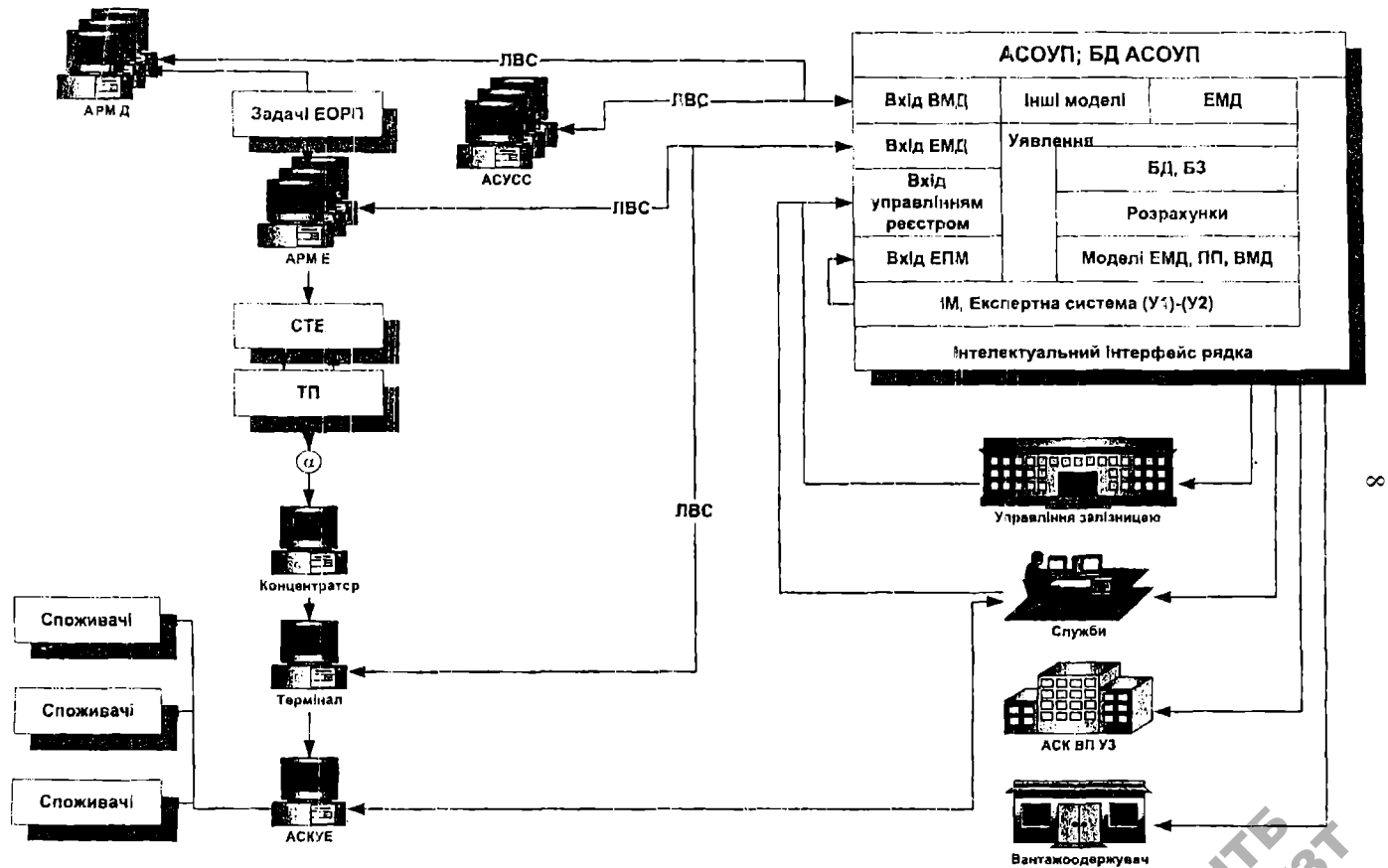


Рис. 2. Структура системи формування баз та ІІТП

різних тарифних зонах, наведені на рис.3 і рис.4. Графіки нічного та пікпікового тарифів виділені різними маркерами, а графік “пікового” електроспоживання – не має маркерів. Дані табл.1 (стовбці 2-4) вміщують відносні показники електроспоживання (порівняно зі стовбцем 8) по тарифних зонах, відносну вартість спожитої за добу електроенергії (стовбці 5-7); обсяг спожитої електроенергії наведено в стовбці 8, а оцінку ефективності багатотарифної оплати – в стовбці 9.

Для ТП Федорівка (рис.3, рядки 4-6 табл.1) споживання в піковій зоні нижче, ніж в нічній, перехід до диференційованих тарифів зменшує вартість на 4-5%, але це не виконується для ТП Мелітополь (рис.4) де профілі розміщені довільно, перетинаються, і перехід є малофективним. Можна відзначити досить стабільні рівні електроспоживання на тягу по добам місячного періоду спостережень. Результати спостережень ТП Слав'янка наведені в рядках 1-3 табл. 1.

Таблиця 1

Аналіз електроспоживання тягових підстанцій Слав'янка, Федорівка

№	Термін	Нічний	Н/піковий	Піковий	Нічний	Н/піковий	Піковий	Енергія	Ефект
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	11.1999	0,2743	0,4899	0,2357	0,0685	0,4997	0,4244	1230455	0,9927
2	12.1999	0,2814	0,4852	0,2332	0,0703	0,4949	0,4198	1125335	0,9852
3	01.2000	0,2753	0,4975	0,2270	0,0688	0,5075	0,4086	1139712	0,985
4	11.1999	0,2269	0,5155	0,2574	0,0567	0,5258	0,4634	389598	1,0460
5	12.1999	0,2385	0,4909	0,2705	0,0596	0,5007	0,4869	448221	1,0474
6	01.2000	0,2140	0,5357	0,2501	0,0535	0,5465	0,4503	353913	1,0503

Аналіз експериментальних даних показав на значні можливості зменшення вартості електроенергії, спожитої на тягу поїздів, а також важливість дослідження задачі переходу на диференційовані тарифи, яка потребує різнобічного математичного моделювання.

У четвертому розділі розроблено моделі електроспоживання на тягу поїздів в умовах застосування диференційованих тарифів. Головною задачею розробок являлося обґрунтування методики часткового перевodu тягових підстанцій на багатотарифну оплату електроенергії таким чином, щоб за рахунок вирівнювання навантажень електротягових мереж забезпечити мінімізацію електроспоживання і вартості електроенергії. Запропоновано і досліджено наступні моделі: комбінаторна модель оптимального перевodu ТП на диференційовані тарифи, двокритеріальна модель, що враховує показники вартості спожитої електроенергії і характеристику умов функціонування електротягових мереж, модель оперативного управління системою тягового електроспоживання. При цьому розглянуто технологічні постановки, математичні формулювання оптимізаційних задач, інформаційне забезпечення вихідних даних моделей та вимоги до методів їх розв'язування.

Постановка довгострокових, статичних задач перевodu ТП на диференційовані тарифи (ДТ) оплати полягає в наступному. Дано N_T тягових підстанцій, $i = 1, 2, \dots, N_T$, підключених до систем зовнішнього енергопостачання, які необхідно віднести до $C = (C_i^{(k)}) = (C_1^{(k)}, C_2^{(k)}, \dots, C_k^{(k)})$ тарифів.

Електроспоживання ТП Федорівка

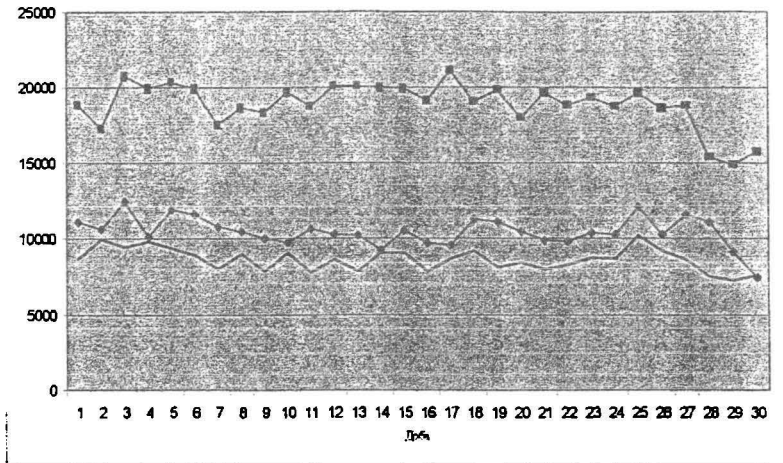


Рис. 3. Профіль електроспоживання за 12. 1999 р.

Електроспоживання ТП Мелітополь

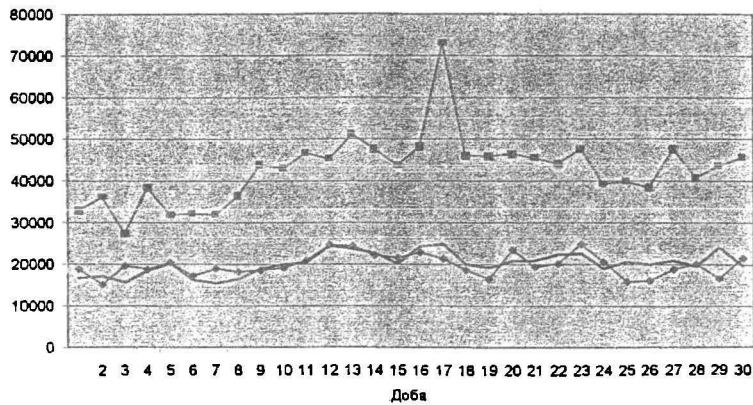


Рис. 4. Профіль електроспоживання за 11. 1999 р.

НТБ
ДНУЗТ

$C_j^{(k)}(t)$ – коефіцієнти відносної вартості електроенергії за тарифом ‘k’ на інтервалі доби (t) тарифної зони ‘j’, $I(k) = ((t_{11}^{(k)}; t_{12}^{(k)}), (t_{21}^{(k)}; t_{22}^{(k)}), \dots, (t_{r1}^{(k)}; t_{r2}^{(k)}))$ – границі термінів відповідних зон ‘j’ тарифу $C_i^{(k)}$. Для ТП вважаються відомими матриці $A^{(k)} = [\hat{a}_{ij}^{(k)}]$ розподілення потреби в електроенергії на тягу поїздів в тарифних зонах, де $\hat{a}_{ij}^{(k)}$ – оцінки електроспоживання підстанції ‘i’ в зоні ‘t = j’ тарифу ‘k’. Задана система обмежень щодо можливостей застосування ДТ різними ТП. Необхідно віднести кожну ТП до тарифів $C = C_i^{(k)}$ таким чином, щоби мінізувати прогнозовану сумарну вартість електроенергії на тягу поїздів.

Позначимо через X_{ik} бінарну змінну (значення 0, 1); $X_{ik} = 1$ коли підстанція ‘i’ проводить оплату за тарифом ‘k’. Тоді задача регулювання має вигляд: знайти $X^* = \{X_{ik}^*, i = 1, 2, \dots, N_T, k = 1, 2, \dots, L\}$, виходячи з наступного

$$K_i = S_{(L)} = \sum_{k=1}^L [\sum_{j=1}^n a_{ij}^{(k)} C_j^{(k)} X_{ik}] \Rightarrow \min_{X_{ik} \in D_X \cap D_T}, \quad (1)$$

$$D_X = \left\{ \sum_{k=1}^L X_{ik} = 1; i = 1, \dots, N_T \right\}, \quad X_{ik} \in \{0, 1\}, \quad (2)$$

$$D_P = \{(i, j) : i, j \in N_T; \sum_{(i,j) \in D_N} P(X_{ik}, X_{jk}) = 0; P(\alpha, \beta), \alpha, \beta \in \{0, 1\}; k \in L\}. \quad (3)$$

Рівняння (2) відносять кожну ТП лише до одного тарифу $C_i^{(k)}$; умови (3) встановлюють, що ТП з номерами $(i, j) \in D_N$ повинні належати до одного тарифу $C_i^{(k)}$, при цьому функція “сума за модулем два” дорівнює $P(X_{ik}, X_{jk}) = (X_{ik} \oplus X_{jk}) = 0$; $D_i \subseteq N_T \times N_T$ – множина ТП з умовами однаковості тарифів $C_i^{(k)}$ (3). Враховуючи, що для Придніпровської залізниці $N_T > 80$, (1) – (3) являє комбінаторну модель високого розміру, для реалізації якої розроблено генетичні алгоритми.

Двокритеріальна вартісно-технологічна модель задачі перевodu ТП на багатотарифну оплату враховує матриці $A^{(k)}$, а також додаткову інформацію про експлуатаційно-технологічну зв’язаність окремих ТП, представлену графом $G(U, V, W)$, в якому позначено: $U = (u_1, u_2, \dots, u_{N_T})$ – вектор вузлів, u_i – торгові підстанції; $V \subseteq U^{(2)} = U * U$ – задає ребра графа, що представляють зв’язки між ТП (елементи матриці $v_{ij} = 1$ при існуванні, $v_{ij} = 0$ при відсутності зв’язків); $W: V \rightarrow N$ – число-ва функція, що характеризує “вагу” зв’язків ТП u_i , доцільність встановлення однакового тарифу, ($w_{ij} \in [0, 1]$).

При моделюванні прийнято, що вузли графа U мають вагу Q , ребра – $w_{ij} \in W_p$, а обсяг сегментів, на які розподілюється $G(U, V, W)$, встановлює вектор $b = (b_1, b_2, \dots, b_s), s \leq N_T$. Для еле-

елементів матриць виконується: $Q > 0$, $b > 0$, $W_p \geq 0$. Двокритеріальна модель задачі дискретного програмування оптимальної сегментації графа та мінімізації вартості спожитої на тягу поїздів електроенергії представлена в наступному вигляді

$$\min_{U \in D_U} (K_1(X), K_G(U)), \quad (4)$$

$$K_G(U) = \sum_{(i,j) \in (1,k)} \sum_{l=1}^{N_T} w_{ij} u_{ij} \chi(l, k), \quad (5)$$

$$b_k^{(1)} \leq \sum_{j=1}^{N_T} q_j u_{kj} \leq b_k^{(2)}, \quad k = 1, 2, \dots, s; \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^s u_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, N_T; \quad (7)$$

$$u_{ij} \in \{0; 1\}, \quad i = 1, 2, \dots, s; \quad j = 1, 2, \dots, N_T. \quad (8)$$

В (6) $b_k^{(1)} < b_k^{(2)}$, $k = 1, 2, \dots, s$, числові коефіцієнти, які задають обсяг сегментів, підмножин графа G ; $\chi(l, k) = \{ 1 \text{ при } l \neq k; 0 \text{ при } l = k \}$ характеристична функція. Розв'язки оптимізаційних задач (4)–(8) при заданих значеннях параметрів визначає найбільш доцільний варіант перевезу ТП на оплату за диференційованим тарифом.

Для знаходження множини компромісно-оптимальних розв'язків задачі (4)–(8) застосовано метод параметризації за допомогою системи обмежень. Сімейство однокритеріальних задач, що залежать від параметру $\alpha \in [0; 1]$, має вигляд:

$$K_G^*(\alpha) = \min_{U \in D_U \cap D_K} K_G(U), \quad (9)$$

$$D_K = \{K_1(X) \leq K_1^*(\alpha), \quad K_1^*(\alpha) = K_1^{(\min)} + \alpha(K_1^{(\max)} - K_1^{(\min)}), \quad \alpha \in [0; 1]\}. \quad (10)$$

В моделі (9)–(10) константи $(K_1^{(\min)}, K_1^{(\max)})$ формують додаткові до D_U (6)–(8) обмеження, що задаються фіксуванням рівня показника вартості $K_1(X)$. Множину $\Pi^{\text{оп}}(\alpha)$ компромісно-оптимальних розв'язків задачі (9)–(10) складають пари, розраховані при різних α

$$\Pi^{\text{оп}}(\alpha) = \{(K_1^*(\alpha_k), K_G^*(\alpha_k))\}, \quad \alpha_k \in [0; 1], \quad (11)$$

а також відповідних наборів параметрів $U^*(\alpha)$, $X^*(\alpha)$, серед яких повинно прийматися рішення про перехід на диференційовані тарифи оплати.

Задачі оптимального переходу (1)–(3), (4)–(11) реалізуються за рахунок одноразового прийняття рішень, вони не розглядають можливості зменшення вартості спожитої електроенергії за рахунок оперативного регулювання перемиканням ТП, віднесених до різних тарифів оплати.

Модель оперативного регулювання перемиканням ТП розглядає множину T_c – сукупність ТП, які за технічними характеристиками можуть обслуговувати електрифіковану ділянку U_c ; N_c – кількість ТП, віднесених до T_c , $J_c = (j_{1c}, j_{2c}, \dots, j_{N_c})$ – їх номери. Позначимо вартість електроенергії для ТП j_c як W_{j_c} , $j_c \in J_c$, а безрозмірну характеристику вартості $\omega_{j_c} = W_{j_c} / \bar{W}$, $\bar{W} = \sum_{j_c \in J_c} W_{j_c} / N_c$. Умова вибору ТП, яку необхідно підключити до електрифікованої лінії в період (t) , має вигляд

$$j_s^*(t) = \arg(\min_{j_c \in J_c} \{\omega_{j_c}(t) \times C_j^{(k)}(t)\}), \quad (12)$$

де функція $\arg(*)$ обчислює номер підстанції $j_s(t)$, що реалізує мінімум $\omega_{j_c}(t) \times C_j^{(k)}(t)$ в період (t) . Рівняння (12) визначає стратегію оперативних комутаційних перемикачів в системі тягового електропостачання, яка забезпечує мінімум вартості електроенергії, спожитої на тягу поїздів.

В розділі встановлено комплекс задач, які необхідно розв'язати для реалізації розроблених моделей регулювання СТЕ, що визначають формування інтегрованих інформаційних технологій управління процесом перевезень за рахунок поєднання даних АРМ-Е та даних повагонного моделювання вантажних перевезень.

У п'ятому розділі розглядаються реалізації компонентів енергооптимальної технології аналізу і регулювання електроспоживання. Розроблено методики, алгоритми і процедури обробки даних про процеси електроспоживання на тягу поїздів і функціонування СТЕ, які забезпечують реалізацію основних функцій аналізу, узагальнення і представлення даних в інтегрованій системі регулювання. При цьому: встановлено особливості задач інформаційного моделювання, розроблено новий генетичний алгоритм (ГА), призначений для реалізації оптимізаційних задач регулювання в умовах застосування диференційованих тарифів, а також задач агрегування даних про процеси електроспоживання на тягу поїздів на основі моделі умовної класифікації (УКД), запропонована методика автоматизованого формування баз знань експертних систем регулювання тягового електропостачання, розроблена методика регулювання на основі побудови комплексних оцінок ефективності функціонування систем СТЕ.

Відмінність розроблених ІА полягає, по-перше, у включенні в них з метою досягнення глобальних якостей точок найбільш рівномірних числових послідовностей, по-друге, у декомпозиції вектору параметрів на підмножини, на яких моделюються процеси взаємної еволюції змінних.

Автоматизоване формування продукційних баз знань експертних систем регулювання електроспоживання на тягу поїздів базується на моделі умовної класифікації даних ВМД та ЕМД. В розділі виконано вдосконалення моделі УКД за рахунок завдання нових метрик, які визначають якість класифікації, додаткових обмежень, властивих задачам електроспоживання, а також використання критеріїв визначення напрямків залежностей змінних, що входять до моделей.

НТБ
ДНУЗТ

При заданні базових змінних для визначення УКД і використанні метрик, які не потребують однорідності параметрів, наприклад, Журавльова, результати оптимальних класифікацій даних спостережень процесів електроспоживання перетворюють в правила продукцій баз знань вигляду

$$(\text{AND}[\text{OR}(x_{ij} \approx x_j^*), \text{AND}[(x_{ijk} \approx w_k^*)]] \Rightarrow [(y_{ijG} \approx w_{jG}^*)]), \quad (13)$$

$$\text{AND}[\text{OR}(\text{OR}(x_{ijk} \approx w_{jk}^*), B(x_{(i)} : j_i \in K) \geq B_i^*)] \Rightarrow (y_{ijG} \approx w_{jG}^*). \quad (14)$$

Алгоритм (14) встановлює, що при оцінці істинності відношень відповідно значень змінних-посилки перевіряються: -1) близькість значень опорних змінних до заданих еталонів $\{(x_{ijk}^* \approx w_{jk}^*)\}$, -2) перевищення рівня B_i^* за метрикою Журавльова для неопорних параметрів $\{B(x_{(i)} : j_i \in K) \geq B_i^*\}$. В разі виконання умов 1) або 2) для змінних $x_{(i)}$ відповідна частина посилки являється істиною; результатом виконання правила є очікувана оцінка w_{jG}^* досліджуваного параметра y_{ijG} . В розділі розглянуто приклад застосування алгоритмів (13) – (14) для задачі прогнозування вагонопотоків і відповідного споживання електроенергії, виходячи з поточного стану процесу перевезень, зафіксованого в моделі ВМД та інформації, накопиченої в базах знань системи управління.

Для оцінки ефективності функціонування багаторівневих систем управління тяговим електропостачанням (СТЕ) запропоновано методику формування комплексних показників $\Psi(W_{(k)}^{(r)})$, які використовують набори часткових оцінок підсистем $W_{(k)}^{(r)} = (w_{k1}^r, \dots, w_{kq}^r)$; індекс 'r' вказує рівень підсистеми СТЭ, а 'k' – номери підсистем на рівнях, які характеризуються показниками $\{w_{kj}^r\}$. При побудові характеристик $\Psi(W_{(k)}^{(r)})$ враховано особливості ієрархічних систем управління процесами перевезень і електропостачанням, що складаються з наступного:

П1) Залежність показників переваги характеристик $\{w_{kj}^r\}$ від варіантів рішень X. П2) Можливість безпосередньої оцінки (виміру) $\{w_{kj}^r\}$, використання абсолютних шкал важливості. П3) Існування відомих, нормативних оцінок показників важливостей.

На рис.5 подано модель багаторівневої системи регулювання процесами електроспоживання на тягу поїздів, яка використовує комплексні показники варіантів $X_p \in X = \{X_1, X_2, \dots, X_q\}$. Відмінність моделі полягає в двох додаткових механізмах розрахунків характеристик переваги $\{\alpha_{kj}^r\}$ часткових показників $\{w_{kj}^r\}$: -1) в алгоритмі сходження (напрямок указують стрілки); -2) у

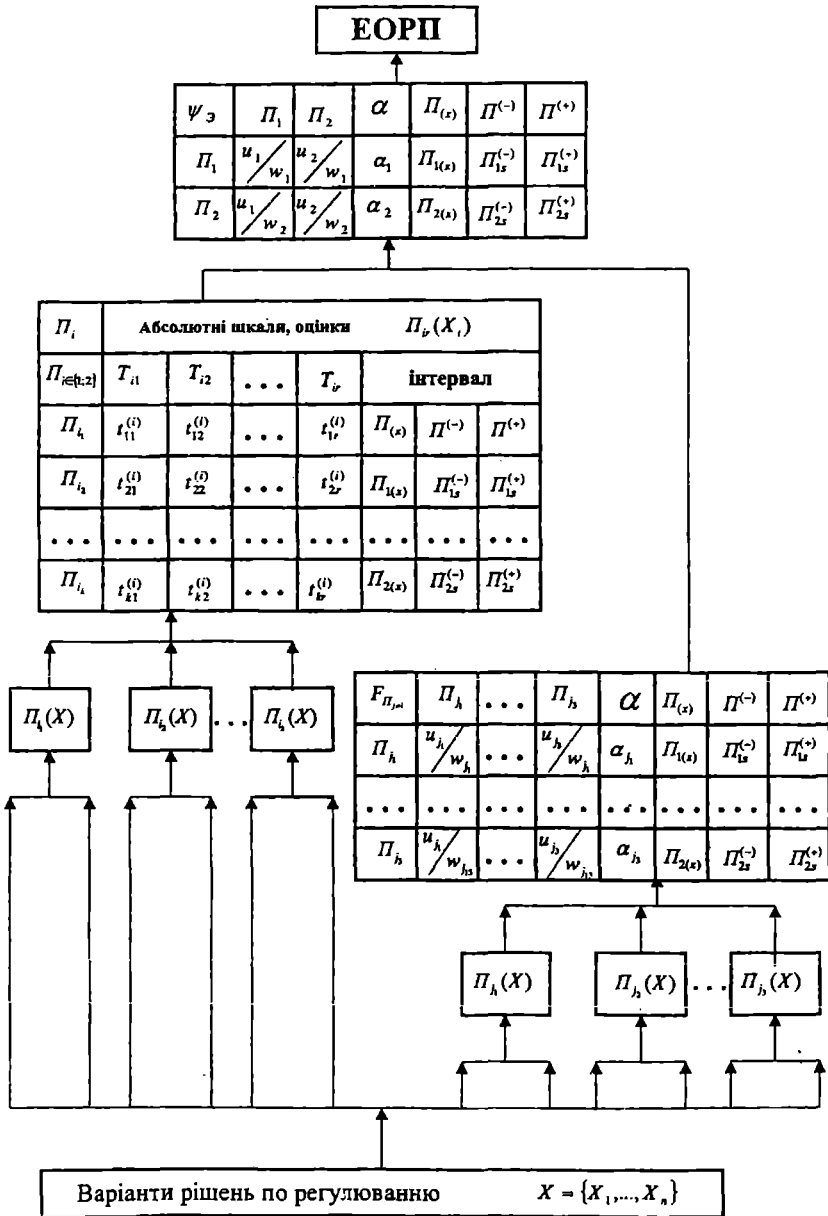


Рис. 5. Модель багаторівневого регулювання споживання електроенергії

виконанні контролю належності значень встановленим діапазоном $w'_{ij} \in [w^{(1)}_{ij}, w^{(2)}_{ij}]$, де межі $\{w^{(1)}_{ij}, w^{(2)}_{ij}\}$ встановлюються експертно, або за допомогою нормативів. На рис.5 також представлено дві методики завдання характеристик значимості: з використанням абсолютних шкал, на основі відносних шкал бінарних порівнянь. Таблиці порівнянь доповнюються стовбцями з інтервалами значень показників, для яких відомі відповідні оцінки важливостей $\{\alpha'_{ij}(w'_{ij}(X_p))\}$; якщо значення $\{w'_{ij}(X_p)\}$ виходять із інтервалів, тоді набори значень $\{\alpha'_{ij}(w'_{ij}(X_p))\}$ перераховують. На рис.5 опущено номери підсистем рівня 'k', а індекси 'i', 'j' показують безпосередні складові Π_{ik} , на які розкладаються показники $\Pi_{i(2)}$ (і всі нижчі в ієрархії). Через $\{u_{ij}\}$ позначено відносні коефіцієнти важливості показників Π_i та Π_j , а $t^{(i)}_{ij}$ – абсолютні оцінки компоненти Π_k критерія 'i' за відповідною шкалою. Приймається, що $t^{(i)}_{ij}$ можуть бути задані безпосередньо для кожної підсистеми Π_{ik} . Розроблена методика дозволяє реалізувати регулювання багаторівневими системами тягового енергопостачання за допомогою ефективних методів системного аналізу з урахуванням необхідності адаптації параметрів при функціонуванні системи.

Запропоновані у розділі методи використані для розв'язування задачі аналізу енергоефективності вагонопотоків в умовах застосування диференційованих тарифів на електрифікованій ділянці Нікополь – Марганець Придніпровської залізниці, а також для прогнозування вагонопотоків за допомогою методів експертних систем.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішені задачі розробки інтегрованих енергооптимальних систем залізничного транспорту, призначених для зменшення енергетичних витрат процесу перевезень. Виконані в дисертації дослідження дозволяють зробити наступні висновки та пропозиції.

1. Для зменшення енергетичних витрат процесу перевезень на електрифікованих ділянках залізниць розроблена інтегрована технологія аналізу і регулювання електроспоживання на тягу поїздів, яка має відмінність узагальненням інформації з різних джерел надходження, а також створені математичні, методичні, інформаційні та програмні засоби реалізації інформаційної технології.
2. Розроблені енергооптимальні технології використані в багаторівневій системі управління електропостачанням Придніпровської залізниці та покладено в основу методики Р 612/4 “Рекомендації з інтегрованої системи управління електропостачанням залізничного транспорту” для країн, що входять в міжнародну Організацію співробітництва залізниць.
3. Створено базу даних для підтримки енергетичної моделі залізниці та процедур аналізу процесів електроспоживання на тягу поїздів, за допомогою яких виконується збирання, ведення та ар-

хівання даних, а також обробка та аналіз інформації по відділкам залізниці і встановленим термінам часу.

4. Виходячи з побудованої інформаційної бази моделей процесів перевезень і енергетичної моделі залізниці запропонована методика розв'язання задачі прогнозування вагонопотоків за визначеними напрямками, яка використовує методи експертних систем.

5. За допомогою експериментальних досліджень з використанням мікропроцесорних лічильників Альфа систем електропостачання, а також систем передачі і аналізу інформації встановлено, що пропонуване енергосистемами економічне стимулювання вирівнювання навантажень підстанцій і зменшення втрат в мережах енергосистем шляхом застосування диференційованих тарифів дозволяє вже сьогодні на деяких ділянках знизити плату за електроенергію на 3 – 5 %. Для організації раціонального переводу тягових підстанцій на диференційований тариф оплати електроенергії розроблені нові моделі одно- і двокритеріальних оптимізаційних задач.

6. Розроблені методики та генетичні алгоритми формування інформаційних баз системи, а також перетворення їх в структури експертних систем, які автоматизують функції підтримки процесів регулювання електроспоживання. Поповнення інформаційних баз результатами моделювання і експериментів дозволяє вказати для всієї залізниці, або для основних напрямків проценти зниження втрат за рахунок оптимізації графіку руху поїздів, вибору раціональних схем живлення тягових підстанцій, зниження перетоків енергії в тягових мережах.

7. Результати досліджень і розробок впроваджені на Придніпровській залізниці в енергетичній моделі процесів перевезень, в методиці переводу тягових підстанцій залізниць України на диференційовані тарифи оплати спожитої електроенергії, в методиці Р 612/4 Організації співробітництва залізниць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ ВИСВІТЛЕНО АВТОРОМ В НАСТУПНИХ РОБОТАХ:

1. Доманский В.Т., Землянов В.Б., Цейтлин С.Ю. Проблемы совершенствования управления перевозочным процессом на основе развития информационных технологий // Залізничний транспорт. - 1998. - №1. - С. 23 – 27.
2. Доманский В.Т., Анохов И.В., Землянов В.Б., Портнов М.А. Энергосбережение при осуществлении перевозок на электрифицированных линиях железных дорог Украины // Транспорт. Повышение эффективности работы устройств электрического транспорта: Сб. науч. тр. ДИИТа, - Днепропетровск: Січ. - 1999. - С. 4 – 10.
3. Скалозуб В.В., Землянов В.Б., Михайлова В.А. Процедура автоматизированного формирования баз знаний информационных систем управления инженерными и технологическими объектами

Дніпропетровський
інститут інженерів
залізничного
транспорту
БІБЛІОТЕКА

НТБ
ДНУЗТ

6076a

// Транспорт. Математичне моделювання в інженерних та економічних задачах транспорту: 36. наук. пр. ДПТУ. – Дніпропетровськ: Січ. - 1999. - С. 155 – 168.

4. Землянов В.Б., Скалозуб В.В., Доманский В.В. Интегрированная информационная технология перевода тяговых подстанций на многотарифную оплату за потребленную электроэнергию // За- лізничний транспорт. - 2000. - №3. - С. 17 – 21.

5. Землянов В.Б. Информационно-управляющая система электроснабжения железнодорожного транспорта // Системні технології: 36. наук. пр. - Дніпропетровськ. - 2000. - Вип. 3 (11). - С. 63 – 71.

6. Землянов В.Б., Иванов В.В., Михайлова В.А. Модель оперативного регулирования системой тягового электроснабжения по стоимости электроэнергии // Транспорт. Математичне моделювання в інженерних та економічних задачах транспорту: 36. наук. пр. ДПТУ. – Дніпропетровськ: Січ. - 2000. - С. 35 – 44.

7. Пшинько А.Н., Доманский В.Т., Землянов В.Б., Скалозуб В.В. Модели и методы анализа сложных инженерно – технических и технологических объектов. // Proc. 5th International Scientific Conference of Railway Experts. ЮЖЕЛ – 98. Vrnjacka Banja (Yugoslavia). - 1998. - Р. 325 – 328.

8. Землянов В.Б. Моделирование процессов электропотребления на тягу поездов по экспериментальным данным. // Тез. доп. міжнародн. наук. - метод. конф. “Комп’ютерне моделювання”. - Дніпродзержинськ. - 1999. - С. 63 – 64.

9. Землянов В.Б., Пшинько А.Н., Доманский В.Т., Скалозуб В.В. и др. Интегрированная система управления электроснабжением железнодорожного транспорта. // Proc. 7th International Scientific Conference of Railway Experts. ЮЖЕЛ – 2000. Vrnjacka Banja (Yugoslavia). - 2000. - Р. 65 – 68.

10. Доманский В.Т., Землянов В.Б., Скалозуб В.В. Автоматизированное формирование баз знаний экспертных систем регулирования тягового электроснабжения // Тез. доп. міжнародн. наук.- метод. конф. “Комп’ютерне моделювання”. – Дніпродзержинськ. - 2000. - С. 34 – 35.

АНОТАЦІЇ

Землянов В.Б. ЕНЕРГООПТИМАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ АНАЛІЗУ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ НА ТЯГУ ПОЇЗДІВ. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.22.09 – електротранспорт. Дніпропетровський державний технічний університет залізничного транспорту, м. Дніпропетровськ, 2000 р.

Розроблено інтегровані енергооптимальні технології залізничного транспорту та багатокритеріальну систему регулювання реального виміру часу, що поєднує дані про процеси перевезень і електроспоживання на тягу поїздів, призначену для зниження енергетичних витрат, пов’язаних зі

НТБ
ДНУЗТ

здійсненню перевезень. Виконано експериментальні дослідження і розроблено одно- і двокритеріальні моделі регулювання електроспоживання в умовах застосування диференційованих тарифів. Розроблено методики і алгоритми формування інформаційних баз і перетворення даних в структури продукційних експертних систем, які автоматизують процеси регулювання електроспоживання. Створення математичні, методичні, інформаційні та програмні засоби реалізації інтегрованих технологій.

Ключові слова регулювання електроспоживання, багаторівнева інтегрована інформаційна система, реальний вимір часу, диференційовані тарифи, моделі і генетичні алгоритми оптимізації, продукційні бази знань.

Землянов В.Б. ЭНЕРГООПТИМАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АНАЛИЗА И РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – электрический транспорт. Днепропетровский государственный технический университет железнодорожного транспорта, г. Днепропетровск, 2000 г.

Разработаны интегрированные энергооптимальные технологии железнодорожного транспорта и многоуровневая система регулирования реального масштаба времени. Система объединяет данные о процессах перевозки и электропотребления на тягу поездов и предназначена для снижения энергетических затрат, связанных с реализацией перевозок. На электрифицированных линиях Приднепровской ж.д. проведены экспериментальные исследования процессов электропотребления на тягу поездов в условиях применения дифференцированных тарифов оплаты.

Разработана методика частичного перевода тяговых подстанций на многотарифную оплату электроэнергии, которая обеспечивает минимизацию электропотребления и суммарной стоимости электроэнергии. Предложены и исследованы комбинаторная и двухкритериальная модели оптимального перевода тяговых подстанций на дифференцированные тарифы, учитывающие показатели стоимости электроэнергии и условия функционирования электротяговых сетей. При этом рассмотрены технологические постановки, математические формулировки оптимизационных задач, информационное обеспечение исходных данных моделей и требования к методам решений.

Предложены методики, разработаны алгоритмы и процедуры обработки данных о процессах электропотребления на тягу поездов и функционирования систем тягового электроснабжения, которые обеспечивают реализацию основных функций анализа, обобщения и представления данных в интегрированной системе регулирования. При этом: установлены особенности задач информационного моделирования, разработан новый генетический алгоритм, а также задач агрегирования данных о процессах электропотребления на тягу поездов на основе модели условной классификации. Предложена методика автоматизированного формирования баз знаний экспертных систем ре-

НТБ
ДНУЗТ

гулирования управления тяговым электроснабжением, базирующаяся на комплексных оценках функционирования многоуровневых систем управления.

Ключевые слова : регулирование электропотреблением, многоуровневая интегрированная информационная система, реальный масштаб времени, дифференцированные тарифы, модели и генетические алгоритмы оптимизации, продукционные базы знаний.

Zemlianov V. B. ENERGY OPTIMIZING TECHNOLOGIES OF ELECTRIC CONCEPTION OF TRAINS TRACTION ANALYSIS AND CONTROL. – Manuscript.

Dissertation for a technics candidate's degree inspeciality 05.22.09 – electric transport. Dnipropetrovsk state technical university of railway transport. Dnipropetrovsk, 2000.

Integrated informational energy optimizing technologies of railway transport and the multilevel real-time control system, that synthesizes transportation and electric consumption of trains' traction data and is aimed at the reduction of the energetical expenditure for transportation, are developed. Experimental research is done and one- and two- criteria models of electric consumption control in conditions of usage of the differential taxes are developed. Methods and algorithms of informational databases' generation and transformation of data into structures of expert systems for automatization of electric consumption control processes, are developed. Mathematical, methodical, informational and software devices of realization of integrated technologies are created.

Key word: electrical consumption control, multilevel integrated informational system, real-time principle, differential taxes, models and genetic algorithms of optimization, knowledge rule base.

Землянов Володимир Борисович

**ЕНЕРГООПТИМАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ АНАЛІЗУ ТА РЕГУЛЮВАННЯ
ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ НА ТЯГУ ПОЇЗДІВ**

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Підписано до друку 21.02 2001. Формат 60×84 1/16. Папір для множних
апаратів. Гарнітура Times New Roman Сут. Ум. друк. арк. 1.0. Безкоштовно.
Тираж 100 прим. : *Зм. 130.*

Дніпропетровський державний технічний університет залізничного транспорту.

Адреса університету та дільниці оперативної поліграфії ДДТУ:

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

Сканувала Кам'янська Н.О.

НТБ
ДНУЗТ