

Міністерство освіти і науки України  
Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»

**ЛИСЕНКО Олександра Геннадіївна**

УДК 622.62–83: 621.33

**РАЦІОНАЛЬНІ РЕЖИМИ РОБОТИ ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ ТРАНСПОРТУ З  
ІНДУКЦІЙНОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ ЕНЕРГІЇ**

05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2015

**Дисертацією є рукопис.**

Роботу виконано на кафедрі систем електропостачання Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** академік НАН України, доктор технічних наук, професор **Півняк Геннадій Григорович**, ректор, завідувач кафедри систем електропостачання Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, с.н.с.

**Павлов Віктор Борисович**, головний науковий співробітник відділу стабілізації параметрів електромагнітної енергії Інституту електродинаміки (м. Київ) Національної академії наук України.

кандидат технічних наук, доцент

**Сінчук Ігор Олегович**, доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті Державного вищого навчального закладу «Криворізький національний університет» Міністерства освіти і науки України.

Захист відбудеться ”18” грудня 2015 р. о 13<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 при Державному вищому навчальному закладі «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.

Автореферат розіслано ”12” листопада 2015 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 08.080.07,  
к.т.н., доцент

О.В. Остапчук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В умовах економічної та енергетичної кризи вугільні підприємства відіграють стратегічну роль у забезпеченні енергоресурсами об'єктів енергетики України. Їх ефективне функціонування неможливе без надійних транспортних комплексів для переміщення вугілля та породи, причому витрати електричної енергії на транспортування сировини складають близько 20 % у енергобалансі шахти. Одним з перспективних видів рудникового транспорту є безконтактні електровози, принцип дії яких ґрунтується на передачі енергії за допомогою електромагнітної індукції. Такий спосіб передачі енергії знаходить сьогодні все більш широке застосування за межами підземних гірничих виробок. Так, вже понад 10 років успішно експлуатуються безконтактні пристрої для зарядки акумуляторів муніципального електротранспорту мегаполісів Європи та США. Також перспективним вважається використання безконтактного транспорту в спеціальних промислових умовах (транспортні магістралі кар'єрів, збагачувальних фабрик, морських портів).

Транспорт з індукційною передачею енергії має низку переваг порівняно з акумуляторними та контактними електровозами. Експлуатація таких установок технологічно та економічно виправдана в особливих умовах вибухонебезпечного навколишнього середовища. Багато років комплекси транспорту успішно функціонували на вугільних шахтах, небезпечних за газом та пилом. Важливим ланцюгом системи безконтактного транспорту є тягова мережа. Її енергетичні показники залежать від режимів роботи системи в цілому і можуть бути підвищені завдяки вибору раціональних режимів. Вдосконалення розрахунку електричних режимів тягових мереж транспорту призводить до підвищення ефективності експлуатації комплексу.

Отже, виникає необхідність проведення комплексних наукових досліджень, спрямованих на пошук нових енергетично ефективних співвідношень режимних параметрів тягового перетворювача частоти та мережі.

Таким чином, **наукова задача** дисертаційної роботи полягає у встановленні закономірностей зміни режимів тягової мережі безконтактного транспорту та обґрунтуванні вибору необхідних параметрів режимів електроспоживання з урахуванням стану мережі живлення і тягового перетворювача, що забезпечує підвищення ефективності роботи транспорту за рахунок зниження рівня втрат і виключення перенапруг. Реалізація прийнятих рішень призводить до зниження ймовірності виходу з ладу електрообладнання від підвищення напруги.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, темами.** Дослідження за темою дисертації виконані відповідно планів науково-дослідних робіт Національного гірничого університету: «Підвищення коефіцієнта потужності тягового перетворювача частоти» (№ держреєстрації 0104U000773), «Розробка технологічного переобладнання передньоприводного автомобіля в повноприводний гібрид» (№ держреєстрації 0115U002299).

**Мета й завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення енергетичної ефективності роботи тягових мереж підвищеної частоти і забезпечення допустимих значень напруги. Для досягнення цієї мети поставлені і вирішені наступні завдання:

- розробити математичну модель режиму напруги при варіації довжин між компенсаційними пунктами і ємності конденсаторів;
- дослідити параметри режиму роботи тягової мережі в пускових і ненавантажених режимах;
- вирішити задачу вибору раціональних режимів електроспоживання комплексу;
- розробити математичну модель пошуку варіанту рішення для обґрунтування ефективних режимів пуску тягового перетворювача;
- розробити методику вибору раціональних режимів роботи комплексу з урахуванням типових для даного виду транспорту параметрів пуску тягового перетворювача та мережі;
- провести дослідження електромагнітної сумісності та іскробезпеки транспортно-го комплексу в умовах підземної системи електропостачання вугільної шахти;
- перевірити адекватність і достовірність отриманих результатів моделювання порівнянням з експериментальними даними.

**Об'єкт досліджень** – процеси передачі і споживання електроенергії в системі «тяговий перетворювач частоти - тягова мережа підвищеної частоти» в пускових і ненавантажених режимах мережі.

**Предмет досліджень** – режимні параметри тягової мережі для оцінки енергетичної ефективності функціонування комплексу, зв'язок цих показників з параметрами режиму роботи тягового перетворювача частоти.

**Методи досліджень.** Для розв'язання поставлених завдань використано: чисельні методи рішення диференціальних рівнянь у часткових похідних - при моделюванні електричних режимів тягової мережі, методи послідовної поступки, головного критерію та згортки - при знаходженні оптимальних режимів роботи тягового перетворювача, метод найменших квадратів - для розрахунку втрат потужності в тяговій мережі при пуску.

**Наукові положення, що виносяться на захист:**

1. Інтегральні значення втрат потужності та рівень напруги в тяговій мережі при пуску тягового перетворювача частоти визначаються особливостями зміни хвильового опору лінії і залежать від співвідношення первинних параметрів струму і часу його наростання.
2. Відстань між пунктами поздовжньої компенсації залежить від рівня напруги, що визначається власними параметрами лінії і внесеного електровозами опору з урахуванням ЕРС, що індукується в лінію при проходженні електровоза.

**Наукові результати дослідження:**

1. Розроблено математичну модель визначення параметрів режимів тягової мережі транспорту з індукційною передачею енергії, яка враховує, на відміну від існуючих моделей, вплив параметру активної провідності кабелів.

Це дозволяє визначити залежності струму та напруги в тяговій мережі в перехідних та усталених режимах.

2. Теоретично обґрунтовано раціональні режими тягової мережі за рахунок визначення вихідних параметрів режиму тягового перетворювача частоти в пусковому режимі, які призводять до зниження втрат активної потужності і виключають перенапруги.

3. Встановлено залежність між швидкістю наростання вихідного струму ТПЧ і довжиною тягової мережі, що дозволяє визначати гранично допустимі значення цього параметра для забезпечення необхідних рівнів напруги при пуску ТПЧ.

4. Розроблено метод визначення допустимої відстані між пунктами компенсації, що на відміну від відомих, враховує ЕРС, яка наводиться при русі електровоза, що дозволяє підвищити надійність компенсаційних пунктів.

5. Запропоновано оцінювати рівні електромагнітної сумісності за допомогою коефіцієнта передачі перешкоди, особливістю якого є врахування перешкоди ТПЧ у встановленні залежності загасання нелінійних викривлень кривої напруги в системі електропостачання шахти.

#### **Практичні результати дослідження:**

1. Розроблено алгоритм визначення раціональних параметрів пускового режиму тягових частотних перетворювачів з урахуванням характеру протікання електромагнітних процесів в лініях з розподіленими параметрами.

2. Запропоновано методику розрахунку допустимої відстані між компенсаційними пунктами з урахуванням внесеного електровозом опору.

3. Встановлені зони гранично допустимих значень швидкості наростання вихідного струму ТПЧ при різних довжинах тягової мережі, що виключають перенапруги.

4. Розроблено методику оцінки електромагнітної сумісності тягових перетворювачів частоти і шахтної системи електропостачання з урахуванням віддаленості точки підключення перетворювача до мережі.

5. Виконано розрахунок економічної ефективності застосування раціональних режимів пуску перетворювача при мінімізації втрат потужності й кількості пусків ТПЧ, при цьому втрати електричної енергії при запропонованому алгоритмі пуску зменшуються на 30%.

**Достовірність** наукових положень, висновків і рекомендацій зумовлена відповідністю припущень, прийнятих у математичних моделях, завданням моделювання та умовам експлуатації тягової мережі, вибором прийнятних методів моделювання електромагнітних процесів і підтверджується результатами співставлення теоретичних і експериментальних досліджень, де похибка розрахунку параметрів режиму не перевищує 10 %.

**Апробація результатів дисертаційної роботи.** Основні матеріали і результати, одержані в дисертаційній роботі, доповідались і були схвалені на науково-технічних конференціях: науково-технічна конференція проблем електромеханічних систем в гірничо-металургійному комплексі (м. Дніпропетровськ, 2004 р.); друга міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження в Україні: законодавство, теорія, практика»

(м. Київ, 2004 р.); «Кадрове забезпечення та новітні технології у сфері енергозбереження гірничої та металургійної промисловості» (м. Дніпропетровськ, 2005 р.); «Проблеми сучасної електротехніки – 2006» (м. Київ, 2006 р.); VI міжнародна науково-технічна конференція «Эффективность и качество электроснабжения промышленных предприятий» (м. Маріуполь, 2008 р.); четверта науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Наукова весна – 2013» (м. Дніпропетровськ, 2013 р.).

**Публікації.** Основні положення й результати роботи опубліковано в 14 друкованих працях, з них 8 – статті у фахових виданнях (з них 1 – стаття у виданні з високим індексом цитування), 3 – статті у закордонних виданнях, 3 – матеріали наукових конференцій.

**Структура і обсяг роботи.** Повний обсяг дисертації становить 168 сторінки друкованого тексту, до складу яких входять 145 сторінок основної частини, що складається зі вступу, 5 розділів і 9 висновків роботи; список використаних джерел з 81 найменувань на 9 сторінках, 4 додатків на 13 сторінках, 32 рисунків, 6 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, визначено об'єкт та предмет дослідження, сформульовано наукову задачу, визначено наукову новизну та практичну цінність, наведено відомості щодо апробацій роботи і публікацій.

У **першому розділі** розглянуті особливості режимів системи транспорту з індукційною передачею енергії для вугільних шахт. Проаналізовані наукові здобутки стосовно розробки тягових перетворювачів підвищеної частоти, тягових електричних мереж та систем керування приводом тягових електровозів.

Принцип дії та структура даного типу транспорту має низку особливостей та має принципове значення при моделюванні режимів та пошуку оптимальних енергоефективних режимів. Такими особливостями є:

- підвищена частота струму в тяговій мережі 5000 Гц;
- режим стабілізованого струму 150 А незалежно від навантаження;
- наявність пунктів поздовжньої ємнісної компенсації;
- безконтактний зв'язок тягової мережі з електровозом.

Складність моделювання тягової мережі обумовлена тим, що в ній присутні два види неоднорідностей: зосереджені в конкретних перетинах лінії ємності поздовжньої компенсації та опори, що вносяться приймачами енергії (електровозами і т.д.). Необхідність аналізу режимів тягової мережі на математичній моделі викликана тим, що експериментальні дані параметрів режиму свідчать про часті перенапруги в тяговій мережі, особливо при проходженні електровозу. Основна увага дослідників була приділена моделюванню режимів ліній при виході з ладу конденсаторів, а також холостим і навантаженим режимам роботи. Практично не приділялося уваги питанням

розробки енергетично ефективних режимів пуску з урахуванням параметрів лінії і перетворювача частоти.

При розгляданні характерних режимів транспорту були виділені три основні режими роботи системи: пусковий, холостий та навантажений. Існуючі моделі розрахунку перехідних процесів тягових перетворювачів частоти (ТПЧ) та тягових мереж дозволяють визначати параметри елементів живлення системи транспорту для забезпечення точного резонансного налаштування мережі, що є найважливішою умовою передачі електроенергії індукційним способом. Формування пускових режимів відбувається з умови виключення перенапруг на тяговій мережі. Розробка енергоефективних режимів пуску з мінімальними втратами потужності та одночасно забезпечення режиму напруги не проводилася. Проаналізовані математичні моделі електричних режимів тягової мережі в стаціонарних та перехідних режимах, а також фундаментальні роботи з передачі енергії індукційним способом. Розглянуті наукові роботи Бунька В.А., Випанасенка С.І., Вейсса К.Г., Волотковського С.А., Гончарова В.Б., Довганя В.П., Долгова Б.Г., Ерліха Є.В., Жирова Л.В., Зражевського Ю.М., Павлова В.Б., Півняка Г.Г., Рогози М.В., Рибалка А.Я., Свістельніка О.А., Староскольського Н.А., Хованської О.І., Худолєєва Г.Б., Шедловського І.А.

Аналізуючи роботи, присвячені дослідженню режимів передачі та перетворення енергії в системі ТПЧ – тягова мережа – електровоз, можна визначити, що недостатньо досліджені засоби формування раціональних, з точки зору забезпечення допустимих рівнів напруги, режимів для нормального функціонування комплексу.

У **другому розділі** виконано аналіз особливостей протікання електромагнітних процесів в тягових мережах підвищеної частоти.

Тягова мережа розглядається як лінія з розподіленими параметрами і складається з однорідних ділянок з розміщеними між ними зосередженими неоднорідностями (конденсаторами повздовжньої компенсації). Падіння напруги на конденсаторах вважається еквівалентним наявності джерел ЕРС, підключених в місцях знаходження компенсаційних пунктів. Дані експлуатації дослідного зразка комплексу з безконтактними електровозами свідчать, що в тяговій мережі спостерігаються значні перенапруги, які призводять в деяких випадках до спрацьовування захисту, а в інших - до виходу з ладу компенсуючих конденсаторів. Така ситуація насамперед може бути обумовлена неузгодженістю деяких параметрів тягової мережі і приймального контуру електровоза. Все це призводить до погіршення енергетичних показників та надійності функціонування системи безконтактного транспорту.

Система телеграфних рівнянь, яка описує зміну режимних параметрів тягової мережі має вигляд:

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \cdot \frac{\partial i}{\partial t} + R_0 \cdot i + \sum_{k=1}^m u_k \cdot \delta(x - x_k); \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + G_0 \cdot u, \end{cases} \quad (1)$$

де  $R_0, C_0, L_0, G_0$  - первинні параметри тягової мережі.

При складанні математичної моделі тягова мережа була представлена у вигляді ділянок лінії з розподіленими параметрами з послідовно включеними зосередженими неоднорідностями (місця включення пунктів компенсації). Розподіл напруги уздовж лінії визначався для виключення режиму перенапруг в мережі при включенні електровозу.

Результати, отримані за допомогою такої моделі, свідчать про залежність зміни напруги в тяговій мережі від параметрів компенсуючих пристроїв і місць їх встановлення (рис. 1). Дані результати використані в дослідженнях режимів тягової мережі для визначення перенапруг на компенсаційних пунктах та розробці рекомендацій щодо їх виключення.

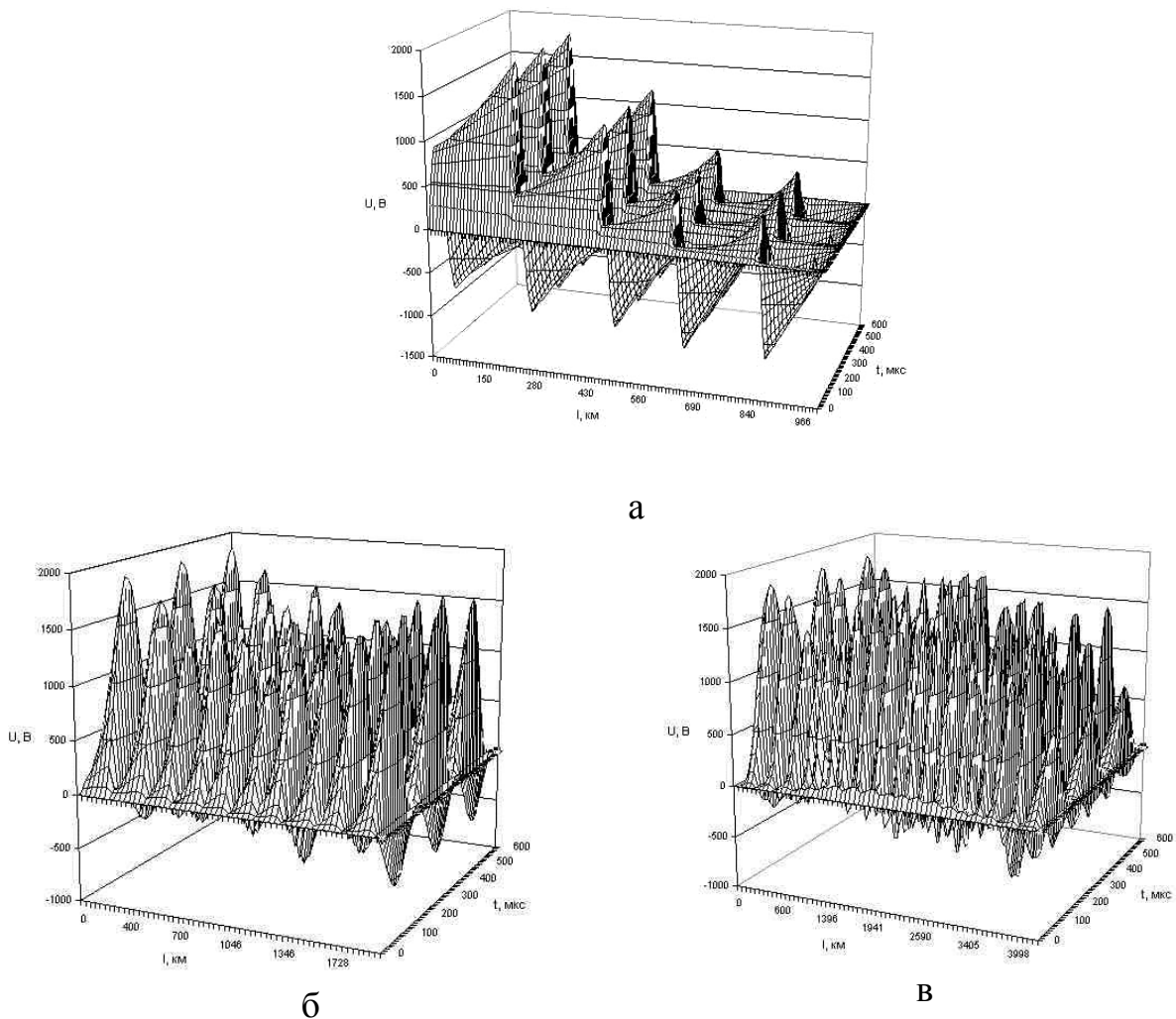


Рис. 1. Розподіл напруги вздовж тягової мережі довжиною:

а – 1 км; б – 2 км; в – 4 км

Аналіз залежності напруги вздовж тягової мережі довжиною 1 км (рис. 1, а) протягом трьох періодів показує, що найбільші значення напруги припадають на перший компенсаційний пункт. Отже, ставиться питання про необхідність уточнення розташування цього компенсаційного пункту з метою недопущення виникнення перенапруг при включенні навантаження. Розподіл напруги уздовж тягової мережі при довжині виробки 2 і 4 км (рис. 1, б, в) дещо



складніший, однак, явище найбільшої напруги на першому компенсаційному пункті зберігається. Це підтверджує висновок про те, що найбільша ймовірність виходу з ладу від перенапруг у конденсаторів першого компенсаційного пункту.

Перехідні процеси в лініях з розподіленими параметрами описуються телеграфними рівняннями. Для їх рішення були розглянуті наступні математичні підходи: метод набігаючих хвиль Бьюлея, аналітичний метод з дискретним перетворенням Лапласа, метод табличного моделювання, метод синтетичних схем, метод часових затримок та еквівалентів Нортона.

Критичний аналіз методів розрахунку перехідних процесів в лініях з розподіленими параметрами, що мають зосереджені неоднорідності, показує, що операторні рішення і методика набігаючих хвиль не дозволяє врахувати всі компенсаційні пункти вздовж тягової мережі. Це пояснюється технічними особливостями даного класу мереж, унікальними режимами роботи на розподілене навантаження при передачі енергії.

Для ефективного розрахунку параметрів пускового режиму безконтактного електричного транспорту, враховуючи особливості протікання електромагнітних процесів, найбільш доцільно застосовувати чисельний метод прогонки. Цей метод практично завжди дає стійке рішення і прийнятну для розрахунків похибку при незначних витратах часу.

Математична модель рішення системи (1) має наступний вигляд:

$$\xi^2 \cdot (u_{i-1,k+1} + u_{i+1,k+1}) - a \cdot u_{i,k+1} = -F_{k,i}; \quad (2)$$

$$F_{k,i} = \xi^2 \cdot (u_{i-1,k+1} + u_{i+1,k-1}) - c \cdot u_{i,k-1} + d \cdot u_{i,k} + e, \quad (3)$$

де  $\xi^2 = \tau^2 / h^2$ ;  $a = 2 \cdot \gamma^2 + \tau \cdot R_0 \cdot C_0 + 2 \cdot L_0 \cdot C_0 + G_0$ ;

$c = 2 \cdot \xi^2 - \tau \cdot R_0 \cdot C_0 + 2 \cdot L_0 \cdot C_0 + G_0$ ;  $d = 4L_0C_0$ ;  $e = 2\xi^2 \sum_{k=1}^m (f_1 - 2f_2 + f_3) \cdot u_{i,k}$ ;

$\tau$ ,  $h$  – крок інтегрування за змінною  $t$  та  $x$  відповідно,  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  – узагальнені функції.

Таким чином, в результаті перетворення та дискретизації системи диференціальних рівнянь в часткових похідних отримано лінійні рівняння в кінцево-різницевої формі, які дозволяють розраховувати нові співвідношення режимних параметрів при різних комбінаціях вихідних даних.

**У третьому розділі** проведено моделювання пускових та ненавантажених режимів роботи тягової мережі, враховуючи усі можливі комбінації параметрів лінії та перетворювача.

Область функціонування розглянутої математичної моделі обмежена наступними, прийнятими при її розробці, припущеннями:

- тягова мережа розглянута як однорідна лінія з послідовно-періодично включеними зосередженими неоднорідностями;
- спадання напруги на конденсаторах поздовжньої компенсації вважається еквівалентним наявності джерел ЕРС, підключених в місцях знаходження компенсаційних пунктів;

- активна провідність витоку в конденсаторах поздовжньої компенсації не враховується через її незначний вплив на похибку розрахунку при реальних довжинах тягових мереж.

Для розрахунку параметрів режимів тягової мережі пропонується наступний алгоритм.

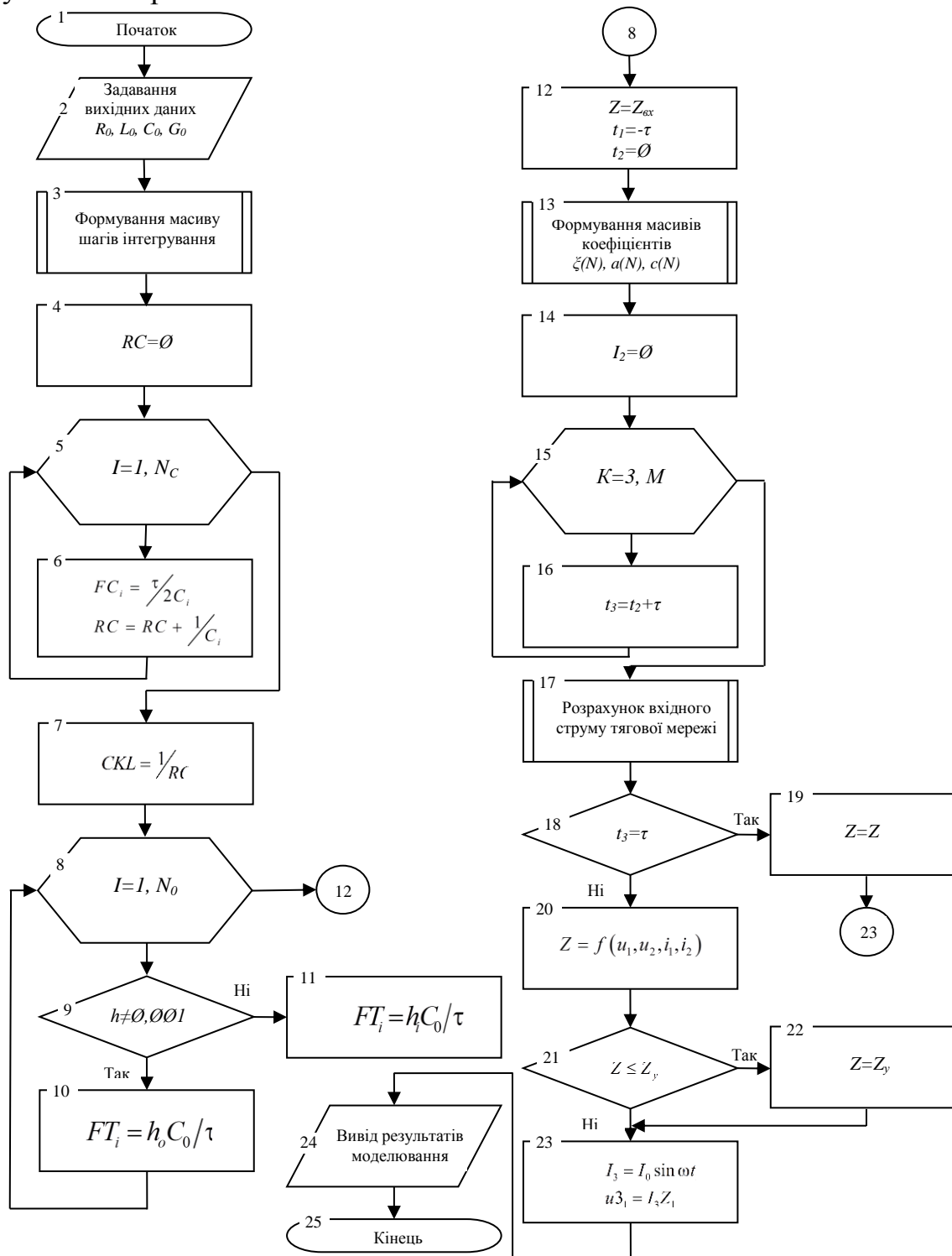


Рис. 2. Алгоритм програми розрахунків перехідних режимів тягової мережі

Модель розроблена у середовищі MathCad та відрізняється від існуючих можливістю врахування у розрахунках активної провідності лінії та здатністю вираховувати значення струму та напруги у будь-якому перетині мережі.

Результатом моделювання є отримані залежності режимних параметрів тягової мережі, які дозволяють якісно оцінити можливість виникнення перенапруг на компенсаційних пунктах (рис. 3, 4).

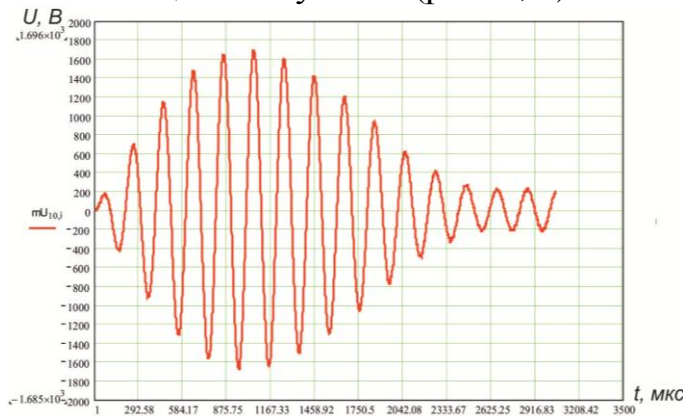


Рис. 3. Залежність напруги від часу у пусковому режимі

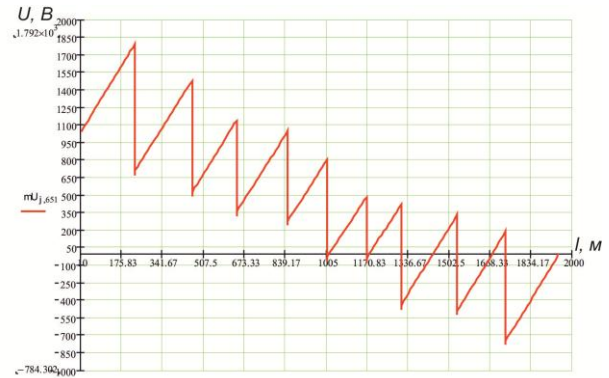


Рис. 4. Залежність напруги від довжини лінії при  $t=650$  мкс в усталеному режимі

Адекватність результатів моделювання оцінювалось при порівнянні отриманих моделей з експериментальними даними. Значення відносної похибки для розглянутих моментів часу коливається в межах 1,14 - 9,8%. За контрольні приймаються перетини, в яких встановлені компенсаційні пункти, і перший перетин лінії. Розрахунок відносних похибок показав, що найменше значення похибки спостерігається для значення напруги в першому перетині лінії. Тенденцій зміни похибки значення напруги в залежності від довжини лінії, моментів часу, режиму не спостерігається.

Причиною виникнення перенапруг на компенсаційних пунктах (КП) є ЕРС самоіндукції, яка індукується в тяговій мережі через вплив електровоза. Напруга в будь-якій точці тягової мережі є геометричною сумою напруги джерела і ЕРС самоіндукції, що необхідно враховувати для безаварійного функціонування комплексу. Існуючі методи визначення місця розташування не дають задовільних результатів з позиції виключення перенапруг. У роботі розроблена методика визначення допустимої відстані між КП, яка враховує динаміку руху електровозу. Допустима напруга визначається залежністю:

$$U_{дон} \geq I_l \cdot r_0 \cdot l + jI_l \cdot x_{L0} \cdot l + I_l \cdot R_{вн}, \quad (4)$$

де  $r_0$ ,  $x_{L0}$  - власні параметри тягової лінії;  $I_l$  - стабілізований струм лінії;  $R_{вн}$  - опір електровозу, що вноситься в лінію.

Звідси відстань між компенсуючими конденсаторами:

$$l_{дон} \leq \frac{U_{дон} - I_l \cdot R_{вн}}{I_l (\sqrt{r_0^2 + x_{L0}^2})}. \quad (5)$$

Вихід з ладу конденсаторів призводить до появи реактивної складової опору тягової мережі, а, отже, викликає за собою появу додаткових реактивних втрат потужності, що негативно позначається на енергоефективності роботи системи транспорту. Таким чином, отримана залежність значення втрат реактивної потужності від кількості конденсаторів, що вийшли з ладу (рис. 5).



Рис. 5. Залежність втрат реактивної потужності від пошкоджених конденсаторів

Отримані на рис. 5 залежності дозволяють оцінити значення втрат реактивної потужності від числа пошкоджених конденсаторів. Це суттєво впливає на енергоефективність функціонування транспорту. Показано, що граничне значення додаткових втрат реактивної потужності сягає 2000 кВАр.

У **четвертому розділі** поставлена та вирішена задача визначення раціональних режимних параметрів тягової мережі в пусковому режимі. При цьому використовувався відомий алгоритм пуску ТПЧ, при якому струм плавно наростає від нульового значення до деякого проміжного (початкового) значення, а потім до усталеного. Зростання струму до початкового значення відбувається за інтервал часу, який може змінюватися в межах 200...2000 мкс (рис. 6). Подальше наростання вихідного струму перетворювача частоти до сталого значення розглядається за час 200000 мкс, виходячи з умов забезпечення нормальних режимів електрообладнання комплексу. Вихідний струм ТПЧ є вхідним параметром для тягової мережі і, отже, впливає на її параметри режиму.

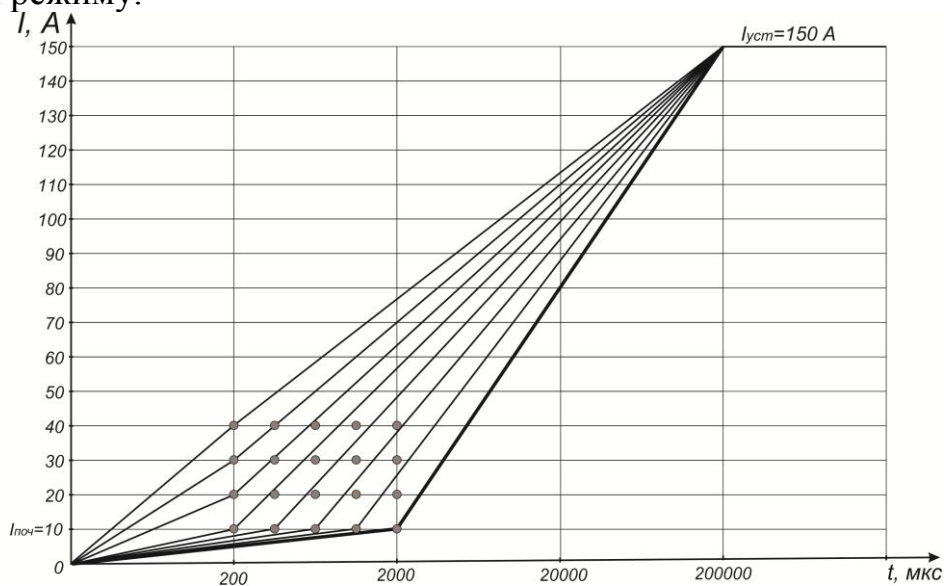


Рис. 6. Вихідний струм ТПЧ при пуску на ненавантажену лінію

Для отримання функціональних залежностей струму і напруги тягової мережі, необхідних для вирішення задачі, застосовані методи регресійного

аналізу. За результатами моделювання отримані набори значень вхідної напруги для різних варіантів поєднання вихідних параметрів ТПЧ і побудовані регресійні моделі. Найбільш доцільним є використання експоненційної апроксимації, оскільки апроксимація поліномами другого і третього ступеня при значеннях аргументу, що виходять за межі діапазону 0,2 ... 2 мс, спотворює реальну картину зміни вхідної напруги в силу особливостей електромагнітних процесів, що протікають в тяговій мережі. Залежності вхідної напруги тягової мережі від пускових параметрів ТПЧ за допомогою експоненційної апроксимації зображено на рис. 7.

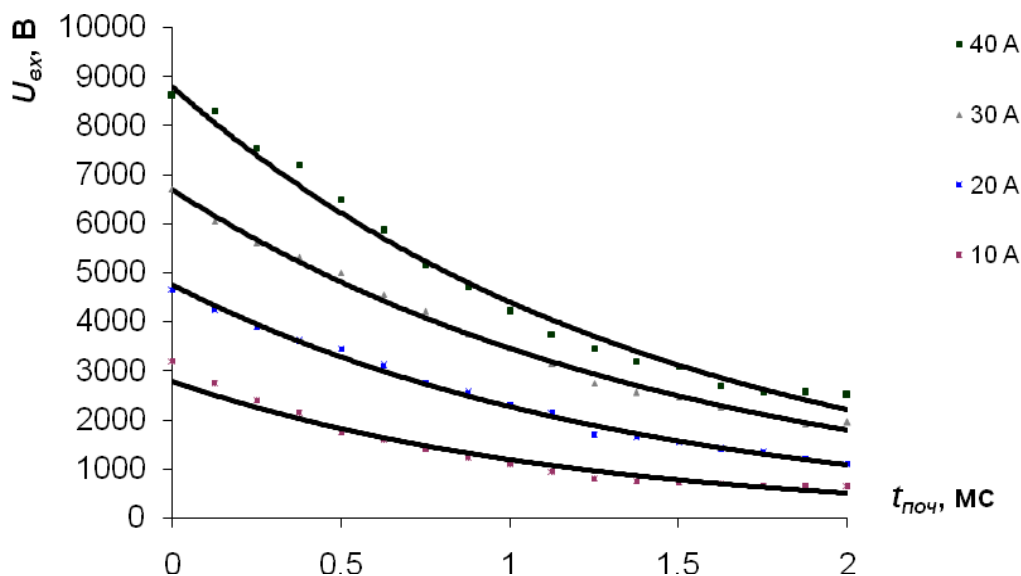


Рис. 7. Залежності напруги  $U_{вх}$  від часу  $t_{поч}$  для  $I_{поч} = 40$  А, 30А, 20А и 10А

Аналіз змін параметрів напруги при пуску показує, що поки тягова мережа не заряджена і відсутні відображені і заломлені хвилі відбувається наростання її вхідної напруги, а потім у міру поширення енергії електромагнітних хвиль лінія заряджається, зменшується її вхідний опір і вхідна напруга починає знижуватися. Такий характер процесу спостерігається при зростанні вихідного струму перетворювача частоти до значення  $I_{поч}$  за 2 мс. При збільшенні швидкості наростання струму ТПЧ (зменшенні значення  $t_{поч}$  до 0,2 мс) зростання вхідної напруги тягової мережі більш різке і відбувається значно швидше, ніж при меншій швидкості наростання струму перетворювача. Пояснюється це тим, що вхідний струм змінюється швидше, ніж відбувається зміна вхідного опору, обумовлене хвильовими процесами в лінії.

При розробці раціональних режимів тягової мережі враховувалися різні поєднання початкових умов і визначено, що зі зміною довжини лінії гранична швидкість наростання первинного струму, виходячи з умови забезпечення допустимої напруги, змінюється. На рис. 8 проілюстровано характер зміни струму ТПЧ від довжини мережі. При цьому отримані нові області допустимих значень напруг, які враховують швидкість наростання вихідного струму перетворювача (рис. 9).

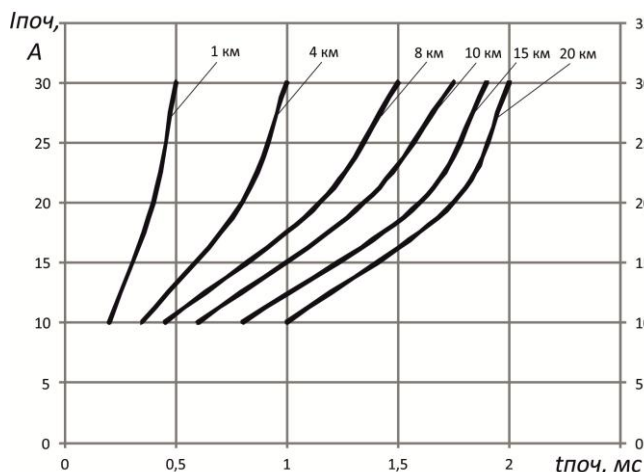


Рис. 8. Залежності вихідного струму ТПЧ від часу його наростання для різної довжини тягової мережі

В рамках вирішення наукової задачі проведено дослідження рівнів втрат активної потужності в тяговій мережі при пуску. Вихідні масиви даних для розрахунку втрат сформовані на підставі відомої залежності зміни вихідного струму ТПЧ (рис. 6).

Вплив часу досягнення початкового значення струму на втрати потужності при незмінному початковому збільшенні вихідного струму ТПЧ показано на рис. 10 (а-в).

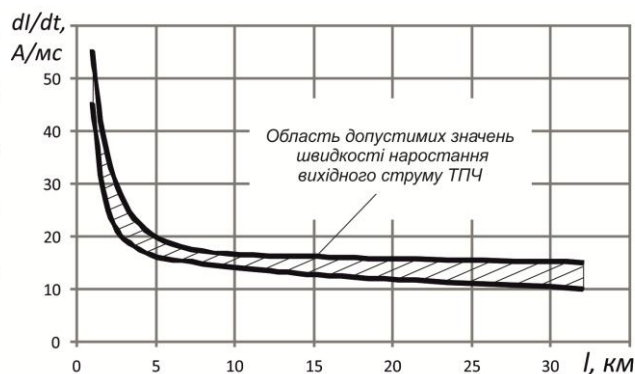
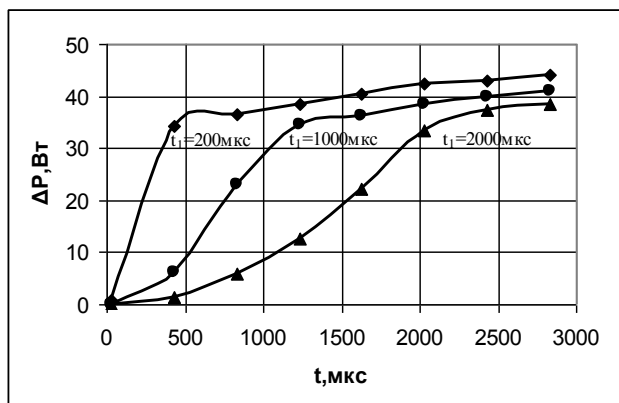
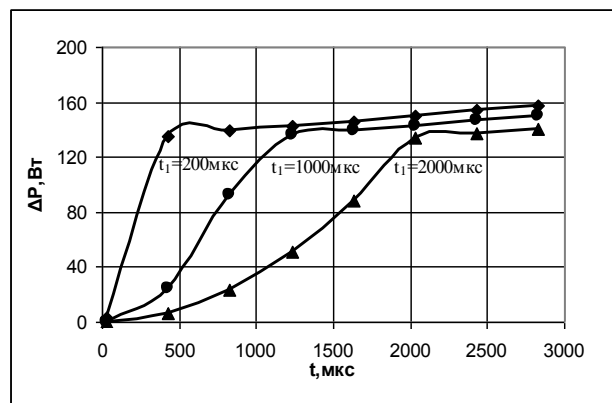


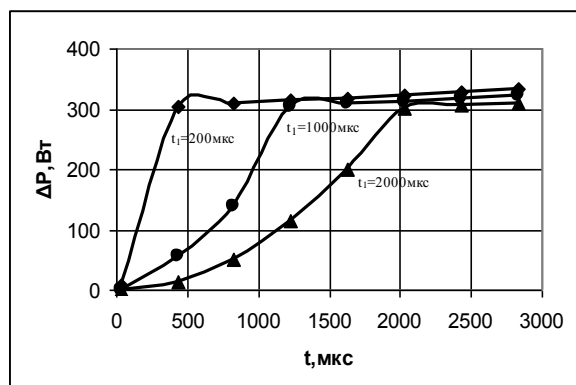
Рис. 9. Область допустимих значень швидкості наростання струму для різної довжини тягової мережі



а



б



в

Рис. 10. Втрати потужності в тяговій мережі при пуску при зміні часу наростання вихідного струму ТПЧ для  $I_{noch} = 10\text{A}$  (а),  $I_{noch} = 20\text{A}$  (б),  $I_{noch} = 30\text{A}$  (в)

Такий характер кривих втрат потужності пояснюється хвильовими властивостями лінії, оскільки струми в перетинах тягової мережі при пуску ТПЧ залежать від характеру зміни хвильового опору тягової мережі. Тому для забезпечення мінімуму втрат потужності в тяговій мережі необхідно використовувати раціональні вихідні параметри ТПЧ (початкове збільшення струму і час наростання), які забезпечували б реальні ефективні експлуатаційні режими системи ТПЧ - тягова мережа.

У п'ятому розділі розглянуті питання електромагнітної сумісності тягових перетворювачів частоти та іскробезпека сторонніх провідників у перехідних режимах тягової мережі. Дані дослідження доповнюють рішення поставленої наукової задачі та працюють на єдиний науковий результат забезпечення енергоефективних режимів функціонування шахтного транспорту з індукційною передачею енергії. На основі отриманих результатів розроблена методика наближеної оцінки показників якості напруги в підземній шахтній електромережі та визначені області електромагнітних збитків у електрообладнанні від неякісної електроенергії (рис. 11).

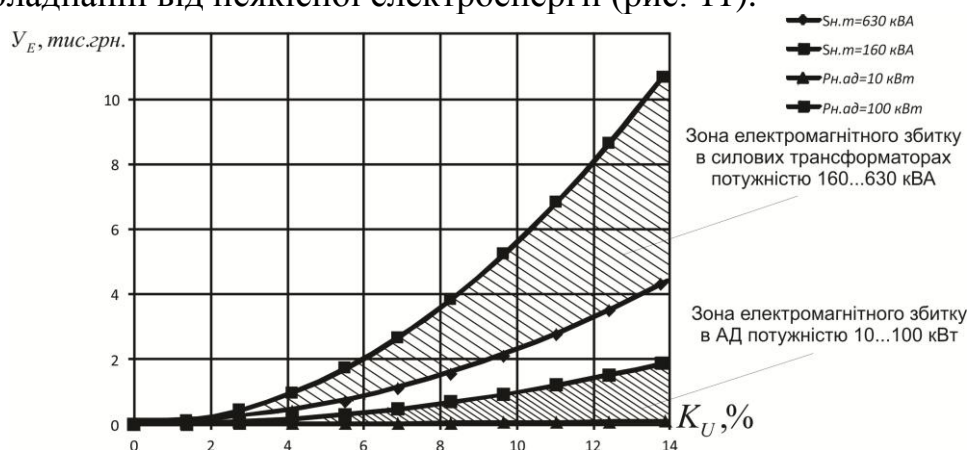


Рис. 11. Залежності річного електромагнітного збитку у трансформаторах та асинхронних двигунах

Економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи забезпечується за рахунок зниження втрат потужності у пускових режимах в тяговій мережі, зменшенні кількості пусків тягового перетворювача частоти та забезпечення умов електромагнітної сумісності перетворювача з шахтною системою електропостачання.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, що є завершеною науково-дослідною роботою, наведено вирішення наукової задачі, яка полягає у встановленні взаємозв'язків зміни пускових режимів в тяговій мережі безконтактного транспорту та обґрунтуванні вибору необхідних параметрів режимів електроспоживання з урахуванням стану мережі живлення та тягового перетворювача, що призводить до підвищення ефективності роботи транспорту за рахунок зниження рівнів втрат та виключення перенапруг.

При вирішенні задачі отримані наступні результати:

1. Експлуатація шахтного безконтактного транспорту пов'язана з частими пусками ТПЧ, що сильно впливає на енергетичні показники в цілому, тому в роботі розроблено комплексний підхід підвищення енергетичної ефективності та безпеки роботи тягової мережі транспорту з індукційною передачею енергії, заснований на формуванні оптимальних моделей енергетичних процесів при пуску тягового перетворювача частоти.

2. Математична модель розрахунку перехідних процесів в тяговій мережі підвищеної частоти розроблена із застосуванням сучасних програмних засобів і є розвитком робіт з моделювання високодобротних скомпенсованих мереж. Особливістю розробленої моделі є врахування активної провідності кабельної лінії, що дозволило більш критично визначити припущення при моделюванні і підвищити точність результатів, що особливо важливо при розробці раціональних режимів пуску мережі і виключення перенапруг.

3. Шляхом перебору різних співвідношень параметрів тягової мережі і пускових режимів ТПЧ встановлено, що найбільше вірогідна поява небезпечних перенапруг при пуску тягового перетворювача на першому компенсаційному пункті. Це пояснюється особливостями зміни хвильового опору при зарядженні тягової мережі, що враховано при обґрунтуванні рівнів початкового струму при пуску і часу його наростання.

4. Точність визначення відстані між пунктами компенсації при проектуванні тягової мережі впливає на резонансну настройку ємності конденсаторів і індуктивності лінії і залежить не тільки від власних питомих параметрів, але і від ЕРС, яка індукується в мережу при проходженні електровоза. Тому уточнення моделі розрахунку допустимої відстані між пунктами компенсації розроблені з урахуванням найбільшої добавки напруги при проходженні потягом пунктів компенсації, що дозволяє відстежувати режим напруги в динаміці руху електровоза.

5. Враховуючи особливості скомпенсованої тягової мережі транспорту, визначені безаварійні режими роботи конденсаторів компенсаційних пунктів. Встановлені залежності дозволяють визначити раціональну відстань між компенсаційними пунктами і оцінити значення втрат реактивної потужності від числа пошкоджених конденсаторів. Це вирішує проблему максимального вирівнювання напруги вздовж тягової мережі і виключає режими перенапруг на пунктах компенсації.

6. Враховуючи недостатньо досліджені пускові режими ТПЧ, сформульована і вирішена задача пошуку раціонального режиму щодо пускового струму перетворювача і часу його наростання, в результаті рішення якої забезпечується мінімальне значення струму на допустимому інтервалі. При розробці раціональних режимів тягової мережі враховувалися різні поєднання початкових умов і визначено, що із зміною довжини лінії характер зміни швидкості наростання первинного струму змінюється. При цьому отримані нові області допустимих значень швидкості зростання вихідного струму перетворювача, які враховують довжину тягової мережі.

7. Перетворювач частоти як електроприймач з нелінійною вольт-амперної характеристикою є джерелом завад, крім того необхідною умовою



його надійної роботи є забезпечення достатньо високої якості напруги мережі. Для перевірки допустимості підключення ТПЧ в даній точці системи електропостачання, запропонований наближений спосіб визначення показників електромагнітної сумісності тягового перетворювача з електричною мережею, який полягає у використанні коефіцієнта передачі завади. Відмінною особливістю запропонованих коефіцієнтів є їх приведення до довжини кабельної лінії. Отримані значення додаткових втрат активної потужності від вищих гармонік приведені до 100 метрів кабелю, що є основою вирішення практичних завдань.

8. Порівняння отриманих моделей з даними експерименту доводять адекватність результатів при врахуванні як форми кривої струму і напруги, так і відхилення отриманих значень від відомих в контрольних точках. Контрольними параметрами є значення напруг на початку лінії і в місцях установки компенсаційних пунктів, а також значення струму на початку і в кінці лінії. Значення відносної похибки для розглянутих моментів часу знаходяться в межах 1,14 - 9,8%.

9. Реалізація запропонованих режимів пуску перетворювача призводить до підвищення енергетичної ефективності і зниження небезпечних перенапруг. Економічний ефект, який обумовлений зниженням втрат активної потужності в тяговій мережі, склав 35 тис. грн на рік для одного ТПЧ при використанні спеціальних режимів пуску перетворювача. При цьому зниження втрат - це один з позитивних результатів, основний ефект полягає в раціональному розподілі напруги вздовж тягової мережі та компенсаційних пунктів, що виключає вихід з ладу конденсаторів і пробій ізоляції кабельної лінії.

### **Основні положення і результати дисертації опубліковані у роботах:**

#### *Публікації у закордонних виданнях:*

1. Khovanskaya Ye. Rational modes of traction network operation of transport with inductive power transfer in the coal industry / Ye. Khovanskaya, A. Lysenko // CRC Press/Balkema – Taylor & Francis Group: Power Engineering Control and Information Technologies in Geotechnical Systems. – Leiden, The Netherlands, 2013 annual publication. – P. 79-84.

2. Pivnyak G. Advantages of application AC current thyristor converters in control circuits of electric traction drive of the no-contact electric mining locomotives / G. Pivnyak, M. Rogoza, Y. Papaika, A. Lysenko // Scientific Reports on Resource Issues (Volume 1). – International University of Resources. – Freiberg, Germany, 2014. – P. 184-192.

3. Pivnyak G. Traction and energy characteristics of no-contact electric mining locomotives with AC current thyristor converters / G. Pivnyak, M. Rogoza, Yu. Papaika & A. Lysenko // CRC Press/Balkema – Taylor & Francis Group: Power Engineering Control and Information Technologies in Geotechnical Systems. – Leiden, The Netherlands, 2015 annual publication. – P. 1-6.

*Публікації у фахових виданнях:*

4. Хованская Е.И. Особенности моделирования нестационарной нагрузки тяговой сети транспорта с индуктивной передачей энергии / Е.И. Хованская, А.Г. Лысенко // Науковий вісник НГУ. – №3. – Днепропетровск, 2004. – С.84-86.

5. Лысенко А.Г. Перспективы энергосбережения для комплекса рудничного бесконтактного транспорта путем оптимизации параметров режимов его электрооборудования / А.Г. Лысенко // Техническая электродинамика. – №3. – Киев, 2004. – С.68-69.

6. Хованська О.І. Вплив вихідних параметрів тягового перетворювача частоти на втрати потужності в мережі / О.І. Хованська, О.Г. Лисенко // Гірнична електромеханіка та автоматика. – №74. – Дніпропетровськ, 2005. – С.9-13.

7. Хованська О.І. Дослідження енергетичних показників пускового режиму тягової мережі / О.І. Хованська, О.Г. Лисенко // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – Частина 4. – Київ, 2006. – С.39-42.

8. Лысенко А.Г. Оптимизация пускового режима тяговой сети транспорта с индуктивной передачей энергии / А.Г. Лысенко, Т.И. Хованская // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2006. – Вип. 77. – С.22-27.

9. Папаика Ю.А. Анализ показателей графиков электрических нагрузок электропечей в несимметричных режимах / Ю.А. Папаика, А.Г. Лысенко // Гірнична електромеханіка та автоматика. – №82. – Дніпропетровськ, 2009. – С. 43-50.

10. Хованская Е.И. Искробезопасность электрических цепей при откатке бесконтактными электровозами / Е.И. Хованская, Ю.А. Папаика, А.Г. Лысенко // Науковий вісник НГУ. – №4, 2012. – С.128-132 (науково-метрична база Scopus).

11. Папаика Ю.А. Анализ режимов напряжения тяговой сети высокочастотного шахтного транспорта / Ю.А. Папаика, А.Г. Лысенко // Гірнична електромеханіка та автоматика. – №89. – Дніпропетровськ, 2012. – С.9-13.

*Матеріали конференцій:*

12. Лысенко А.Г. Исследование режима напряжения тяговой сети высокочастотного транспорта // Збірник матеріалів п'ятої всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації» – Кременчук. – 2007. – С.117.

13. Кігель Г.А. Дослідження перенапруг на реакторі з магнітопроводом в колі фільтра вищих гармонік / Г.А. Кігель, О.І. Хованська, О.Г. Лисенко, Ю.А. Папаїка // Матеріали VI міжнародної науково-технічної конференції «Эффективность и качество электроснабжения промышленных предприятий» Маріуполь. – 2008. – С.44-46.

14. Лысенко А.Г. Оптимизация пусковых режимов тяговых электрических сетей высокой частоты // Матеріали четвертої науково-технічної

конференції студентів, аспірантів і молодих вчених НГУ «Наукова весна – 2013» ». – Дніпропетровськ. – 2013. – С.396-397.

**Особистий внесок автора.** Особистий внесок дисертанта в роботах, опублікованих в співавторстві полягає: робота [1] – встановлення залежностей втрат потужності при пуску ТПЧ на тягову мережу, роботи [2, 3] – моделювання тягових характеристик приводу та обґрунтування енергетичних коефіцієнтів, робота [4] – постановка задачі моделювання, робота [6] – розробка алгоритму розрахунку визначення втрат потужності, робота [7] – обґрунтування вихідних параметрів ТПЧ при пуску, робота [8] – рішення оптимізаційної задачі відносно втрат потужності, робота [9] – обґрунтування шагу транспозиції кабельної лінії, робота [10] – визначення показників графіку навантаження, робота [11] – моделювання режиму напруги тягової мережі, робота [13] – розрахунки вищих гармонік струму.

### АНОТАЦІЯ

**Лисенко О.Г. «Раціональні режими тягової мережі транспорту з індукційною передачею енергії». – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 - Електротехнічні комплекси та системи. - Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», Дніпропетровськ, 2015.

У дисертаційній роботі вирішена важлива наукова задача, яка полягає у встановленні закономірностей зміни режимів в тяговій мережі безконтактного транспорту та обґрунтуванні вибору необхідних параметрів режимів електроспоживання з урахуванням стану мережі живлення і тягового перетворювача, що забезпечує підвищення ефективності роботи транспорту за рахунок зниження рівня втрат і виключення перенапруг.

Розроблено математичну модель визначення параметрів пускового і сталого режиму тягової мережі транспорту з індукційною передачею енергії, яка враховує, на відміну від відомих моделей, активну провідність кабельної лінії. Вирівнювання напруги в високооборотних лініях з розподіленими параметрами є необхідним і має бути враховано при проектуванні тягових мереж. Для тягових мереж шахтного рейкового транспорту з індукційною передачею енергії нерівномірність розподілу напруг може бути усунена тільки завдяки раціональному розміщенню компенсуючих пристроїв та обґрунтуванню раціональних режимів пуску перетворювача.

Однією з умов надійної роботи комплексу транспорту з індукційною передачею енергії - це електромагнітна сумісність ТПЧ і іскробезпека сторонніх провідників при перехідних режимах тягової мережі. В роботі запропоновані оціночні способи аналізу якості напруги з урахуванням особливостей режимів тягових перетворювачів. Проведено порівняння результатів моделювання з експериментальними дослідженнями, які підтверджують достовірність отриманих в роботі наукових результатів.

*Ключові слова: транспорт з індукційною передачею енергії, тягова мережа, пусковий режим, перенапруги, втрати потужності.*

## **АННОТАЦІЯ**

**Лысенко А.Г. «Рациональные режимы тяговой сети транспорта с индукционной передачей энергии». – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. – Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Днепропетровск, 2015.

В диссертационной работе решена важная научная задача, которая заключается в установлении закономерностей изменения режимов в тяговой сети бесконтактного транспорта и обосновании выбора требуемых параметров режимов электропотребления с учетом состояния питающей сети и тягового преобразователя, что обеспечивает повышение эффективности работы транспорта за счет снижения уровня потерь и исключения перенапряжений.

Разработана математическая модель определения параметров пускового и установившегося режима тяговой сети транспорта с индукционной передачей энергии, которая учитывает, в отличие от известных моделей, активную проводимость кабельной линии. Для эффективного расчета параметров пускового режима, учитывая особенности протекания электромагнитных процессов, наиболее целесообразно применять численный метод прогонки. Этот метод практически всегда дает устойчивое решение и приемлемую для расчетов погрешность при незначительных затратах времени.

Выравнивание напряжений в высокооборотных линиях с распределенными параметрами является необходимым и должно быть учтено при проектировании тяговых сетей. Для тяговых сетей шахтного рельсового транспорта с индукционной передачей энергии неравномерность распределения напряжений может быть устранена только благодаря особому подходу к размещению компенсирующих устройств и обоснованию рациональных режимов пуска преобразователя.

Путем численного решения дифференциальных уравнений, положенных в основу разработанной модели, были отработаны возможные граничные значения режима напряжений тяговой сети при учете длины линии, числа компенсационных пунктов и начального времени. При подобной постановке задачи получены новые результаты, которые позволяют оценить и контролировать электрический режим тяговой сети при любых соотношениях начальных параметров, что было недоступно ранее.

Математическая модель расчета режимов работы тяговой сети в ненагруженных и пусковых режимах создана для отработки множества комбинаций исходных значений тока преобразователя и состояния тяговой сети. Учет активной проводимости кабеля при моделировании позволил доказать, что наиболее подвержены перенапряжениям конденсаторы первого компенсационного пункта, что должно быть учтено при эксплуатации комплекса.

При выборе рациональных режимов обрабатывался ряд условий, по которым возможна оценка энергетической эффективности функционирования комплекса. Это, прежде всего учет максимально возможного напряжения на элементах тяговой сети и минимального тока преобразователя. Решение поставленной в данной диссертационной работе научной задачи заключается в подборе оптимального сочетания пускового тока преобразователя и времени его нарастания.

Одним из условий надежной работы комплекса транспорта с индукционной передачей энергии – это электромагнитная совместимость ТПЧ и искробезопасность посторонних проводников при переходных режимах тяговой сети. В работе предложены оценочные способы анализа качества напряжения с учетом особенностей режимов тяговых преобразователей. Проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными исследованиями, которые подтверждают достоверность полученных в работе научных результатов.

**Ключевые слова:** транспорт с индукционной передачей энергии, тяговая сеть, пусковой режим, перенапряжения, потери мощности.

## SUMMARY

**Lysenko A.G. "Rational modes of power network of transport with inductive energy transfer." - Manuscript.**

Thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.09.03 - Electrotechnical complexes and systems. - State Higher Educational Institution "National Mining University", Dnipropetrovsk, 2015.

The dissertation solved important scientific task, which is to establish patterns of regime change in the power network of contactless transport and grounding chosen your settings mode power consumption in the light of the power supply and traction converter, which enhances the efficiency of transport by reducing losses and off surge.

The mathematical model of determining the parameters of starting treatment and sustainable power network of transport with induction energy transfer was created. It takes into account, in contrast to known models, active cable line conductivity. Alignment voltage lines in high-Q with distributed parameters are necessary and must be taken into account when designing the power network. For traction mine rail transport networks with induction energy transfer uneven distribution of stress can be eliminated only through rational allocation compensating devices and substantiation of rational modes start converter.

One of the conditions for reliable operation of complex transport of energy transfer induction - is electromagnetic compatibility and intrinsically safe TFC foreign leaders during the transition mode power network. The thesis proposed valuation methods as stress analysis allowing for the modes of traction converters. Comparisons of simulation results with experimental studies were made. They are confirming the reliability of the scientific results of the work.

**Key words:** transport with inductive energy transfer, power train, start mode, voltage, power loss.

**ЛИСЕНКО Олександра Геннадіївна**

**РАЦІОНАЛЬНІ РЕЖИМИ РОБОТИ ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ ТРАНСПОРТУ З  
ІНДУКЦІЙНОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ ЕНЕРГІЇ**

(Автореферат)

Підписано до друку 03.11.2015. Формат 60x90/16.

Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 0,9.

Обл.-вид. арк. 1,0. Тираж 100 прим. Зам. №334

Віддруковано в «Поліграфцентрі» ФО-П Кучугурний Ю.М.,  
свідоцтво про державну реєстрацію №2 224 000 0000 073863,  
м. Дніпропетровськ, вул. Леніна, 11, 49000,  
Тел.: (056) 735-50-08