

МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

УДК 629.423/.424.3.015:621.313.33

На правах рукопису

ІВЧЕНКО ЮРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

Динамічна навантаженість елементів
асинхронних тягових приводів при
ударних навантаженнях

05.22.07. Рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук



Дніпропетровськ 1994



00778480 (Y)

Робота виконана в Дніпропетровському залізничному транспортному університеті

Науковий керівник

- доктор технічних наук,
професор
Манашкін Л. А.

Науковий консультант

- кандидат технічних наук,
доцент
Бондарев О. М.

Офіційні опоненти

- доктор технічних наук,
професор
Дьомін В. В.кандидат технічних наук,
доцент
Гетьман Г. К.

Провідне підприємство

- НВО ДЕВЗ (м. Дніпропетровськ)

Захист відбудеться " 6 " ЛЮТОГО 1995р. о 14 год.
в ауд. 224 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д114.07.01 в
Дніпропетровському державному технічному університеті залізничного
транспорту за адресою :

м. Дніпропетровськ, 10, вул. Академіка Лазаряна, 2, ауд. _____

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці університету.

Автореферат розісланий " 6 " січня 1995р.

Відгуки на автореферат у двох екземплярах, завірені печаткою,
просимо надіслати до спеціалізованої ради університету Д114.07.01.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

кандидат технічних наук, доцент Петрович Л. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним з основних напрямків вирішення задач підвищення ефективності залізничного транспорту являється забезпечення його більш потужними, надійними і економічними локомотивами. Досвід вітчизняного та закордонного локомотивобудування свідчать про те, що при створенні високоефективних локомотивів найбільш перспективним є використання асинхронних тягових двигунів (АТД). Це дає можливість значно підвищити використання сцепної тяги, внаслідок жорсткості тягової характеристики АТД, збільшити питому потужність тягових двигунів, зменшити витрати на виробництво і обслуговування, скоротити кількість відмов з вини тягових двигунів. Високоякісні техніко-економічні показники тягових асинхронних двигунів підтверджуються результатами досліджень і випробувань в СНД: Петербургському державному університеті залізничного транспорту, Московському державному університеті залізничного транспорту, Московському енергетичному інституті, ВО "Луганськтепловоз", НДІ заводу "Електротяжмаш" та ін., - та за кордоном: у Німеччині, Фінляндії, Італії, Швеції, США та ін.

Під час випробувань макетного зразку локомотива ТЕ120 мали місце аварійні режими роботи асинхронних тягових приводів (АТП), що призводять до коротких замикань в колах живлення статорних обмоток АТД з короткозамкнутим ротором, внаслідок крізних коротких замикань в автономному інверторі напруги (АН). Струми короткого замикання залежать від запасу енергії, накопиченої в магнітних полях АТД, і значно перевищують їх значення при стаціонарному режимі руху. Це призводить до виникнення ударних навантажень в елементах механічної частини тягового приводу. Так під час випробувань макетного зразку тепловоза ТЕ120 спостерігалося руйнування резино-кордних муфт, через які тягові зусилля передаються колесу

колісної пари від порожнистого карданного валу, а при використанні досить жорстких муфт – поломка порожнистого карданного валу.

В зв'язку з цим задача дослідження електромеханічних процесів в АТП при аварійних режимах і виявлення шляхів зменшення динамічних навантажень в приводі набула актуальності і самостійне значення.

Мета роботи. Аналіз умов згинання ударних процесів в електромеханічних системах різних типів приводів локомотивів з асинхронними тяговими двигунами, оцінка навантажень елементів приводів, розробка способів запобігати ударам та знизити навантаженість елементів приводів.

Методи досліджень. Для досягнення поставленої мети були використані методи математичного моделювання на аналогових та цифрових обчислювальних машинах, чисельні методи розв'язання диференціальних рівнянь, теорія електромеханічних процесів в перетворювачах енергії.

Результати моделювання підтвердилися даними, які отримані експериментальними дослідженнями на виробничому об'єднанні "Луганськтепловоз".

Наукова новизна. В дисертації розроблені наступні математичні моделі: АТП з порожнистим карданним валом на осі колісної пари, АТП з карданним валом в порожнистому роторі, АТП з опорно-осьовим способом закріплення двигуна, взаємодії зубців зубчастої передачі з урахуванням неідеальності їх виготовлення (крючковий удар), привода з використанням асинхронного двигуна з подвійною обмоткою статора, плоских коливань двохосного візла у зв'язку з електромеханічними процесами.

Розроблено математичні моделі і програми для досліджень електромеханічних процесів в АТП. Запропоновані математичні моделі дозволяють урахувати нелінійності зв'язків між елементами АТП та взаємодії колії і коліс колісних пар.

Практична цінність. Розроблено комплекс програм на алгоритмічній мові ФОРТРАН для математичного моделювання стаціонарного руху і аварійних режимів роботи АТП, з допомогою яких визначено навантаження елементів приводів тепловозів ТЕ120, 2ТЕ137 і маневрового промислового електровозу. Робота виконувалася за участю автора дисертації, що пропонується до розгляду, у відповідності з загальноінститутським планом науково-дослідних робіт 91.59.89.90, яка є складовою частиною програми ДКНТ 0.54.01.07.І., та 37055 для ВО "Луганськ.єпловоз". Науково-дослідна робота 91.18.86.89 виконувалась для УЕЛНДІ згідно з замовленням Міністерства чорної металургії СРСР на розробку і створення промислового електровозу з асинхронними тяговими двигунами. У дисертації запропоновані рекомендації по використанню деяких видів захисту при аварійних режимах, проведені дослідження для різних варіантів АТП.

Впровадження результатів. Результати досліджень, які приведені в дисертації, були використані в роботі по створенню стенду для випробування систем живлення тягових двигунів і визначення навантаження приводів. Ці розробки захищені авторським свідоцтвом №1788454 "Испытательный стенд электропривода локомотива".

Впровадження результатів досліджень на ВО "Луганськтепловоз" при доробках макетного зразку тепловозу ТЕ120 і проектуванні електропередачі вантажного тепловозу 2ТЕ137, а також в УЕЛНДІ при проектуванні маневрового промислового електровозу дало можливість коректно врахувати особливості використання АТД.

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідались на Всесоюзній науково-технічній конференції "Создание и техническое обслуживание локомотивов большой мощности" (м. Луганськ, 1985 р.), Республіканській науково-технічній конференції "Функционально ориентированные вычислительные системы" (м. Харків, 1986 р.), VI Всесоюзній науково-технічній конференції "Состояние и

перспективи розвитку електровозостроєння в країнах" (м. Тбілісі, 1987р.), Всесоюзній конференції "Проблеми механіки залізничного транспорту" (м. Дніпропетровськ, 1988 р.), II Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми створення подвійного складу з асинхронними тяговими двигачами" (м. Рига, 1990р.), III Всесоюзній науково-технічній конференції "Проблеми розвитку локомотивостроєння" (м. Луганськ, 1990 р.), VIII конференції "Проблеми механіки залізничного транспорту" (м. Дніпропетровськ, 1992 р.), семінарі кафедри "Теоретична механіка" (м. Дніпропетровськ, 1994р.), міському семінарі з механіки (м. Дніпропетровськ, 1994 р.).

Публікації. По темі дисертації опубліковано 18 друкованих робіт, 12 з котрих приведені в авторефераті.

Структура та об'єм роботи. Дисертація виконана на 160 листах машинописного тексту, складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (54 назви), додатків, рисунків та таблиць в тексті дисертації.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У першому розділі (вступ) обґрунтована актуальність досліджень динамічного навантаження елементів асинхронних тягових проводів від ударних навантажень, зроблено огляд літератури та досвіду вітчизняного та закордонного локомотивобудування, досліджень динаміки залізничного рухомого складу. Сформульована мета і основні напрями роботи, методи досліджень.

За кордоном найуспішніше в області створення локомотивів з асинхронними тяговими електродвигачами працюють локомотивобудівники Німеччини, Швейцарії, Італії, США, Чехословаччини та ін. Значних успіхів у створенні локомотивів досягли такі фірми: Brown Boveri, Siemens AG, General Motors.

Наукові роботи радянських вчених Алексєєва А.Є., Костенка М.П., Лабунцова Є.А., Толстова Ю.Г. спряjali тому, щоб на рухомому складі як тягові електроприводи використовувалися безколекторні машини. В останні роки найбільш активно проблемами тягових приводів займалися Бєляєв А.І., Бірюков І.В., Бурков А.Т., Іньков Ю.М., Литовченко В.В., Манашкін Л.А., Ротанов Н.А. та ін. Математичному моделюванню та експериментальним дослідженням динамічних процесів в локомотивах, коли останні розглядаються як нелінійні механічні системи, приділено багато уваги в роботах Фєляєва А.І., Бірюкова І.В., Блохіна Є.П., Бурчака Г.П., Голубенка А.М., Дановича В.Д., Дєміна Ю.В., Камєєва А.А., Камєєва В.А., Конєєва А.А., Коротєєва М.Л., Куценка С.М., Лазаряна В.А., Львова А.А., Манашкіна Л.А., Меделєва В.Б., Павленка А.П., Плєксї А.В., Савоськіна А.А., Спїрягїна І.К., Тартаковського Є.Д., Тїбілова Т.А. Статистичними аспектами, пов'язаними зі створенням та експлуатацією локомотивів і рухомого складу, займалися Бірюков І.В., Савоськін А.Н., Ушкалов В.Ф., Фєдорєць В.А.

У другому розділі запропоновані математичні моделі механічних та електричної частини асинхронних тягових приводів як єдиної електромеханічної системи. У розрахункових схемах кльивань оберту АТП всі елементи приводів уявляються сконцентрованими масами з відповідними моментами інерції, а з'єднання між елементами - еквівалентними зв'язками жорсткості.

Запропоновані математичні моделі механічних частин, які забезпечують передачу моменту оберту від АТП до колісної пари, для трьох типів тягових приводів: опорно-рамне закріплення двигуна та порожнистий карданний вал на осі колісної пари; опорно-рамне закріплення двигуна та карданний вал у порожнистому роторі; опорно-осьове закріплення двигуна та двостороння зубчаста передача.

Модель електричної частини складається з автономного інвертора напруги (АН) і асинхронного тягового двигуна. Розглядаються

особливості моделювання тягового приводу, до якого входять АТД з подвійними обмотками статора.

У диференціальних рівняннях для всіх трьох типів приводів, що розглядаються у даній роботі, використовуються такі означення: V, m - швидкість руху та маса локомотива; $M_{эм}$ - електромагнітний момент, що виробляється АТД, S_a - стаціонарне зусилля, відповідне швидкості руху, діюче на локомотив з боку автозчипу; r_1, r_2 - радіуси шестерні та зубчастого колеса редуктора; ω_1, \mathcal{Z}_1 - кутова швидкість та момент інерції 1-ого елемента привода; M_0 - момент зусиль, які виникають у вузлі закріплення двигуна під час коливань його корпусу відносно рами візка локомотива; $M_{i, i+1}, \varphi_{i, i+1}$ - моменти та відносні кути повороту в з'єднаннях між i -тим та $(i+1)$ -шим елементами привода; r_k - радіус кола кочення колеса колісної пари; F_{ki} - поведомні складові сил взаємодії 1-го колеса з колією, які моделювались у відповідності з експериментальними даними, викладеними у роботі Хлебникова В.Н., як функція відносного просковзування ε_{k1} , яка визначалась таким чином: $\varepsilon_{k1} = 1 - V/(\omega_{k1} \cdot r_k)$, $\dot{V} = (4 \cdot F_{k1} + 4 \cdot F_{k2} - S_a)$, (1)

де ω_{k1} - кутова швидкість 1-го колеса.

Диференціальні рівняння, які описують рух елементів привода з опорно-рамним закріпленням двигуна та порожнистим карданним валом на осі колісної пари, мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_0 &= (-M_0 - M_{эм} + M_{23} \cdot (1 + r_2/r_1)) / \mathcal{Z}_0, & \dot{\varphi}_0 &= \omega_0, \\ \dot{\omega}_1 &= (M_{эм} - M_{12}) / \mathcal{Z}_1, & \dot{\varphi}_{1-1} &= \omega_{1-1} - \omega_1 - \delta_2 \cdot \omega_0 \cdot (1 + r_2/r_1), \\ \dot{\omega}_i &= (M_{i-1, i} - M_{i, i+1} - \delta_i \cdot F_{ki} \cdot r_k) / \mathcal{Z}_i, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\delta_1 = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i=6,7 \\ 0, & \text{якщо } i=6,7 \end{cases}, \quad \delta_2 = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i=3 \\ 0, & \text{якщо } i=3 \end{cases}, \quad j = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i=6 \\ 2, & \text{якщо } i=7 \end{cases}, \quad (i=2,7).$$

i приймає значення: 0 - для корпусу електродвигуна разом з редуктором; 1 - для ротора АТД; 2 - для шестерні редуктора, насадженої на вал ротора; 3 - для зубчастого колеса редуктора; 4,5 - для

половини порожнистого валу з фланцями та з'єднучими муфтами, що прилягають до нього; 6,7 - для коліс з прилягаючими до них половинами осі колісної пари.

Закручення валу ротора (M_{12}), пустого карданного валу (M_{45}) та осі колісної пари (M_{67}) були прийняті за пружнов'язкою моделлю як

$$M_{i,i+1} = K_{i,i+1} \cdot \varphi_{i,i+1} + \beta_{i,i+1} \cdot \dot{\varphi}_{i,i+1}$$

де $K_{i,i+1}$ - еквівалентна жорсткість з'єднання i -го та $(i+1)$ -го елементів; $\beta_{i,i+1}$ - коефіцієнт в'язкого опору. В інших зв'язках розсіювання енергії приймається у вигляді сухого тертя.

✓ відповідності з розрахунковою схемою тягового привода локомотива з опорно-рамним закріпленням та карданним валом у порожнистому роторі асинхронного тягового двигуна рівняння руху системи мають вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_0 &= (M_0 - M_{эм}) / J_0, & \dot{\varphi}_0 &= -\omega_0, \\ \dot{\omega}_1 &= (M_{эм} - M_{12}) / J_1, & \dot{\varphi}_{1-1,i} &= \omega_{1-1} - \omega_1 - \delta_2 \cdot \omega_0 \cdot (1 + \gamma_2 / \gamma_1), \\ \dot{\omega}_i &= (M_{1-1,i} - M_{i,i+1} - \delta_1 \cdot F_{Kj} \cdot \gamma_K) / J_i, & & (3) \\ \dot{\omega}_7 &= (M_{34} \cdot (1 + \gamma_1 / \gamma_2) - M_7) / J_7, & \dot{\varphi}_7 &= \omega_7, \end{aligned}$$

$$\delta_1 = \begin{cases} 1, \text{ якщо } i=5,6 \\ 0, \text{ якщо } i=3,4 \end{cases}, \quad \delta_2 = \begin{cases} 1, \text{ якщо } i=4 \\ 0, \text{ якщо } i=6 \end{cases}, \quad j = \begin{cases} 1, \text{ якщо } i=5 \\ 2, \text{ якщо } i=6 \end{cases}, \quad (i=2, \overline{6}).$$

i приймає такі значення: 0 - для корпусу двигуна; 1 - для порожнистого ротора; 2 - для карданного валу та частини муфти з'єднання, що прилягає до нього; 3 - для шестерні редуктора та частини муфти з'єднання; 4 - для вінця зубчастого колеса редуктора; 5 - для маточини зубчастого колеса редуктора з колесом та частиною осі колісної пари, що прилягає до нього; 6 - для частини осі колісної пари та другого колеса; 7 - для корпусу редуктора.

M_7 - момент, що виникає у вузлі закріплення корпусу редуктора, розраховуємо по формулі:

$$M_7 = [a + (\gamma_1 + \gamma_2) \cdot \cos \alpha] \cdot K_7 \cdot \varphi_7$$

де a - відстань між точкою закріплення корпусу редуктора до рами

візка та віссю шестерні; α - кут нахилу прямої, що з'єднує центри шестерні та зубчастого колеса редуктора; K_7 - еквівалентна жорсткість зв'язку, визначається умовами закріплення редуктора до рами візка; ϕ_7 - кут закручення еквівалентного зв'язку.

У розрахунковій схемі коливань оберту елементів приводів одного двохосного візка локомотива тяговий привод можна вважати симетричним відносно поведовжньої площини та обмежитися розглядом тільки однієї його половини при умовах, що маємо опорно-осьове закріплення тягових двигунів та двосторонню зубчасту передачу, що нехтуємо коливаннями оберту осі колісної пари та вважаємо, що на колеса передаються через тягові редуктори однакові моменти при однакових силах тяги, які реалізуються.

Розглянуто механічну систему, яка складається із двох колісно-моторних блоків. Диференціальні рівняння руху елементів приводів мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_{0j} &= [2 \cdot F_{зj} \cdot (r_1 + r_2) - M_{эмj} + (-1)^j \cdot F_{01} \cdot a] / \mathcal{C}_{0j}, & \dot{z}_j &= (-1)^{j+1} \cdot \omega_{01} \cdot a, \\ \dot{\omega}_{1j} &= (M_{эмj} - 2 \cdot M_{ршj}) / \mathcal{C}_{1j}, & \dot{\phi}_{ршj} &= \omega_{1j} - \omega_{2j}, \\ \dot{\omega}_{2j} &= (M_{ршj} - F_{зj} \cdot r_1) / \mathcal{C}_{2j}, & \dot{\omega}_{зj} &= (F_{зj} \cdot r_2 - F_{кк} \cdot r_к) / \mathcal{C}_{зj}, \\ \dot{\phi}_{шккj} &= \omega_{2j} \cdot r_1 / r_2 - \omega_{зj} - \omega_{0j} \cdot (1 + r_1 / r_2), \end{aligned} \quad (4)$$

де ω_{1j} - кутова швидкість 1-го елемента j-того КМБ (j=1,2).

i приймає такі значення: 0 - для корпусу двигуна; 1 - для ротора АТД; 2 - для шестерні редуктора і частини вала ротора; 3- для зубчастого колеса редуктора та половини колісної пари; F_{0j} - зусилля, що виникає у вузлі спирання корпусу j-того АТД на раму візка; $M_{ршj}$ - момент, що виникає у з'єднанні між елементами (шестерня редуктора) j-того привода; $F_{зj}$ - сила взаємодії зубчастих коліс редуктора j-того привода; a - горизонтальна проекція відстані між вузлом закріплення корпусу АТД до рами візка та віссю колісної пари; z_j - вертикальна складова деформації еквівалентного зв'язку вузла спирання корпусу j-того АТД на раму візка; ϕ - відносний кут

закручення в еквівалентному з'єднанні елементів привода.

При математичному моделюванні вважаємо, що електрична частина АПІ складається з автономного інвертора напруга (АІН) та асинхронного тягового двигуна (АТД). Різні напруги (U_{iS}) еквівалентного симетричного трифазного джерела напруги формуються у відповідності з функцією переключення АІН (150° управління). Під час програмної реалізації даної моделі необхідні вихідні напруги АІН обчислювати як середню величину напруг на попередньому і даному кроці розрахунок.

Для створення математичної моделі, яка описує динамічні процеси в електричних колах статорних і роторних обмоток АТД, прийняті наступні припущення: фазні обмотки АТД однакові і мають ідентичні параметри; зазор в магнітному колі рівномірний по колу розточка статора; магнітне поле розподіляється по колу синусоїдально; обмотки статора з'єднані зіркою, а їх середня точка не з'єднана з нулем і може мати відносно нуля потенціал; насичення магнітопроводу двигуна до уваги не приймається.

Для спрощення математичної моделі струми і потокозчеплення розглядаються в осях координат α , β і γ , нерухомих відносно обмоток статора. Струми в роторних обмотках в системах координат, рухомій і нерухомій відносно обмоток статора, зв'язані співвідношеннями:

$$[I_{1r}, I_{2r}, I_{3r}]^T = B \cdot [I_{\alpha}, I_{\beta}, I_{\gamma}]^T, \quad (5)$$

де діагональні елементи b_{ij} матриці B (3x3) дорівнюють $\cos\varphi_p$, $b_{1,3} = b_{2,1} = b_{3,2} = -\sqrt{3}/3 \cdot \sin\varphi_p$, $b_{1,2} = b_{2,3} = b_{3,1} = \sqrt{3}/3 \cdot \sin\varphi_p$.

Кут φ_p повороту ротора відносно статора дорівнює:

$$\varphi_p = p \cdot \int_0^t (\omega_p \cdot dt + \varphi_0), \quad (6)$$

де p - кількість пар полюсів, ω_p - кутова швидкість ротора.

Вектори зведених потокозчеплень ψ і струмів I зв'язані через матрицю A : $[\psi_{1s}, \psi_{2s}, \psi_{3s}, \psi_{\alpha}, \psi_{\beta}, \psi_{\gamma}]^T = A \cdot [I_{1s}, I_{2s}, I_{3s}, I_{\alpha}, I_{\beta}, I_{\gamma}]^T. \quad (7)$

Елементи матриці A (6x6) дорівнюють:

$$a_{1,1} = L_{1s}, \quad a_{1,3} = a_{3,1} = L_T, \quad a_{1,1+3} = a_{1+3,1} = L_m, \quad a_{1,j} = \frac{1}{3} \cdot L_j \quad (i = \overline{1,3}, j = \overline{1,3}).$$

Диференціальні рівняння зміни зведених потокозчеплень мають вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_{1S} &= U_{1S} - R_{1S} \cdot I_{1S} + \frac{1}{3} \cdot (R_2 \cdot I_{2S} + R_3 \cdot I_{3S}), \\ \dot{\psi}_{2S} &= U_{2S} - R_{2S} \cdot I_{2S} + \frac{1}{3} \cdot (R_1 \cdot I_{1S} + R_3 \cdot I_{3S}), \\ \dot{\psi}_{3S} &= U_{3S} - R_{3S} \cdot I_{3S} + \frac{1}{3} \cdot (R_1 \cdot I_{1S} + R_2 \cdot I_{2S}), \\ \dot{\psi}_\alpha &= -R_T \cdot I_\alpha + p \cdot \omega_p \cdot (\psi_\gamma - \psi_\beta) \cdot \sqrt{3}/3, \\ \dot{\psi}_\beta &= -R_T \cdot I_\beta + p \cdot \omega_p \cdot (\psi_\alpha - \psi_\gamma) \cdot \sqrt{3}/3, \\ \dot{\psi}_\gamma &= -R_T \cdot I_\gamma + p \cdot \omega_p \cdot (\psi_\beta - \psi_\alpha) \cdot \sqrt{3}/3. \end{aligned} \quad (8)$$

Електромагнітний момент АТД обчислюємо по формулі:

$$M_{\text{эм}} = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot p \cdot L_m \cdot [I_{1S} \cdot (I_\gamma - I_\beta) + I_{2S} \cdot (I_\alpha - I_\gamma) + I_{3S} \cdot (I_\beta - I_\alpha)]. \quad (9)$$

L_T, L_{1S}, L_m, R_{1S} - параметри електричної схеми замкнення.

Для зменшення рівня пульсацій електромагнітного моменту АТД, які пов'язані з неідеальністю (несинусоїдальністю) фазних напруг живлення статорних обмоток, можна використати двигун з двома здвигнутими на 30 електричних градусів обмотками, кожна з яких живиться від окремого інвертора. Результати моделювання показали, що використання АТД з подвійними статорними обмотками дозволить не тільки зменшити, майже вдвічі, рівень пульсацій електромагнітного моменту, який раніше переважував його середнє значення на 35%, а й не збільшити навантаження в електромеханічній системі АТД під час зварійних коротких замикань в колах живлення статорних обмоток.

В межах моделі АТД з опорно-рамним закріпленням АТД і порожистим карданим валом на осі колісної пари запропонована модель взаємодії зубчастих коліс тягової передачі, яка враховує неідеальність їх виготовлення (кромочний удар). Враховується зміна жорсткості між взаємодіючими зубцями (однопарне і двопарне зачеплення).

При моделюванні кромочного удару було прийнято припущення, що на кожному кроці зачеплення радіус початкового кола відрізняється від радіуса на величину $\gamma_2 \cdot D_r$ в межах кута γ , а відносна кутова швидкість $\dot{\psi}_{2,3}$ при цьому обчислюється не по формулі (2), а за допомогою виразу:

$$\dot{\psi}_{2,3} = \omega_2 \cdot (1 + D_r) - \omega_3 \cdot (1 + \gamma_2 / \Gamma_1) \cdot \omega_0 \quad (10)$$

При цьому використовувались такі співвідношення:

$$a = (\rho_1 + \rho_2) \cdot \rho_2 / \rho_1, \quad \delta = \lambda + \lambda_0, \quad \gamma = \sqrt{2 \cdot a \cdot \delta / \rho_2},$$

$$D_T = \rho_2 \cdot [(\gamma - \Phi_3) \cdot \sigma_0 (\gamma - \Phi_3)] / \Gamma_2, \quad (11)$$

де ρ_1, ρ_2 - радіуси кривизни профілів зубців зубчастих коліс.

В розрахунках зведена помилка зубців δ визначалась тільки точністю виготовлення зубчастих коліс тягової передачі, тобто найбільшою різницею основних кроків λ . Результати моделювання свідчать про те, що динамічна навантаженість в зубчастій передачі 8-го ступеня точності в 2,5, а 7-го майже в 2 рази перевищує динамічну навантаженість в передачі 5-го ступеня точності при швидкості руху 50-100 км/год. Збільшення точності на одиницю може дати зменшення динамічної навантаженості при взаємодії зубчастих коліс до 25%. Отримані результати моделювання відрізняються не тільки, як на 25% від результатів отриманих іншими авторами експериментально.

Третій розділ. Здійснено аналіз частот і форм власних коливань механічних частин АТП трьох типів, що відповідають математичним моделям (2), (3), (4). Для розрахунків використовувалась стандартна програма що реалізує QR-алгоритм. Частоти і форми власних коливань визначені в різних умовах взаємодії колії та коліс колісної пари:

а) режим тяги; б) зрушення з місця; в) буксування.

Розрахунки показали, що для перших двох випадків частоти та форми власних коливань практично співпадають. Величини власних частот і відношення амплітуд моментів в реактивній тязі та порожньому валі (АТП з опорно-рамним закріпленням АТД і пустим карданним валом на осі колісної пари) по першій і третій формах коливань повністю попадають в діапазон злачень, що спостерігался під час дослідів.

На основі аналізу частот і форми вільних коливань механічних частин АТП, а також динамічних процесів в ньому, запропонована методика спрощування математичних моделей приводів.

Четвертий розділ. Пропонуються два способи реалізації математичних моделей АТП: - електронне моделювання на аналоговій обчислювальній машині; - чисельне інтегрування на ЦОМ диференціальних рівнянь, які описують рух електромеханічної системи.

Для отримання більш точних результатів були розглянуті дві системи диференціальних рівнянь, які описують процеси в еквівалентній двофазній машині. Виявилось, що слід віддати перевагу електронному моделюванню з використанням рівнянь, які описані через потокозчеплення, тоді, що система диференціальних рівнянь через струми занадто чутлива до зміни коефіцієнтів.

Чисельне інтегрування диференціальних рівнянь при $0 < t < h$ (h - крок інтегрування по часу) виконується методом Рунге-Кутта 4-го порядку, а потім з використанням методу Адамса-Бамфорта.

П'ятий розділ. Розглянуто динамічну навантаженість елементів трьох типів АТП під час коротких замикань у колах живлення статорних обмоток (з опорно-рамним закріпленням АТД і порожнистим карданним валом на осі колісної пари; з опорно-рамним закріпленням АТД і карданним валом у порожнистому роторі; з опорно-осьовим закріпленням АТД і двосторонньою зубчастою передачею). Відхилення результатів розрахунків від результатів випробувань не перевищало 15%.

Проведені дослідження на різних швидкостях руху локомотива, з різними параметрами жорсткості і можливими зазорами в з'єднаннях.

Розглянуто навантаженість елементів АТП з опорно-осьовим закріпленням АТД і двосторонньою зубчастою передачею під час руху локомотива у режимі буксування. Дослідження показали, що під час зриву зчеплення коліс з колією і відновлення зчеплення виникають ударні процеси в тяговому приводі, які викликають затухаючі коливання елементів приводу з частотами, близькими до 5 Гц і 160 Гц. Частота 5 Гц зумовлена коливаннями корпусу АТД відносно осі колісної пари, а частота 160 Гц - близька до однієї з частот власних

коливань елементів привода з режимі буксування.

Для вивчення динамічної навантаженості елементів АТП під час зрушення поїзда з місця запропонована розрахункова схема локомотива масою m , поїзд із n вагонів. Тягове зусилля передається через автотяг, який обладнано вбиральним апаратом, розташованим між локомотивом і першим вагоном поїзду. Цей зв'язок має нелінійний характер, а деформація в ньому σ_0 . Не приймалися до розгляду коливання рухомих один відносно одного вагонів. Враховувалось, що величина змінної маси поїзду M наростає в залежності від шляху x , який пройшов локомотив, таким чином:

$$M = m + \sum_{j=1}^n m_j \cdot \sigma_0(x - \delta - \sum_{i=1}^j \delta_i), \quad x = \int_0^t V dt \quad (12)$$

$$\dot{q}_0 = V - V_0, \quad \dot{\varphi} = \varepsilon_0/M,$$

де m_j - маса j -го вагону, який рухає з місця, δ - зазор в зв'язку між локомотивом і першим вагоном, δ_i - зазор між i -тим та $(i+1)$ -шим вагонами, $\sigma_0(\dots)$ - одинична функція Хевісайда, V_0 - швидкість руху поїзду, яка коректується в момент ступінчастого збільшення маси поїзда M на величину m_j . Нехтуємо тривалість процесів ударного приєднання j -го вагона до поїзда в момент t_j , коли зазор перед даним вагоном є вибраним, і вважаємо, що частина поїзда, яка зрушилась з місця, являє собою одне тверде тіло.

$$V_0(t_j) = V_0(t_j - h) \cdot M(t_j - h) / M(t_j), \quad (13)$$

де h - крок інтегрування по часу.

Було прийнято припущення, що при зрушенні поїзда з місця і наборі тяги величина кутової швидкості оберту магнітного поля статора відносно поля ротора, яке обертається, зростає по експоненціальному закону: $\omega_T(t) = \omega_{Tm} \cdot [1 - \exp(-\gamma_T \cdot t)]$. (14)

Частота ω_S зміни фазних напруг живлення обмоток статора АТД визначалась по формулі: $\omega_S = n \cdot \omega_1 + \omega_T(t)$. (15)

Локомотив, як електро механічна система, складається з таких

структурних елементів: джерело живлення, перетворювач частоти, АТД, механічна частина тягового привода. В системі управління напруженою живленням двигуна може здійснюватися зворотний зв'язок шляхом виміру швидкості ω_1 оберту ротора або шляхом виміру швидкості V руху локомотива і обчислення величини $\omega_1^* = c \cdot V / r_k$, де c - передаточне відношення редуктора.

Проведені дослідження показали, що зворотний зв'язок першого типу при швидкому наростанні сил тяги до величин, близьких до межі по зчепленню, сприяє зриву тяги в режим буксування. Управління зі зворотним зв'язком другого типу призводить до більш згладженого перехідного процесу і забезпечує в тих же умовах більш сталу реалізацію сил тяги.

Шостий розділ. Розроблена математична модель руху у вертикальній площині чотириосного локомотива з урахуванням електромеханічних процесів в індивідуальному тяговому приводі з асинхронним двигуном, що має опорно-осьове закріплення. Використ зується тяговий привод з двосторонньою зубчастою передачею. Рух кузова локомотива розглядається спрощено, без урахування інерції його повороту. Припустимо, що маса кузова розподілена вздовж його довжини рівномірно, а обидва двохосних візка рухаються однаково і взаємодіють з кузовом однаковими повздовжніми силами. Такі припущення дозволяють розглядати рух тільки половини маси кузова і половину статичного зусилля, яке діє на кузов з боку з'єднання (автозчепу) локомотива з складом вагонів. Цей рух зв'язаний з рухом одного візка локомотива під дією сил тяги, які виникають на контактах коліс цього візка і колії. Розрахункова схема відповідає одному з локомотивів, який розробляє УЕМД.

Окрім перелічених припущень, приймемо наступні спрощення:

- динаміка поїзду до уваги не приймається;
- колія вважається пружною і безінерційною.

Розглянемо динамічні процеси руху у вертикальній площині візка локомотива і елементів привода. Диференціальні рівняння руху механічної частини локомотива відносно положення статичної рівноваги складаємо при умові, що розвантаження коліс, ресор, п'ятників не відбувається.

Горизонтальні проєкції сил взаємодії коліс з кол'єю моделюються по формулам (1). Електромагнітні процеси в обмотках асинхронних тягових двигунів і електромагнітні моменти описуються диференціальними і алгебраїчними рівняннями, які приведені в (5) - (9). Живлення трифазних обмоток АТД відбувається від АН.

Есть виконані розрахунки для визначення динамічної навантаженості елементів тягових приводів і візка при аварійних режимах коротких замикань в колах живлення асинхронних двигунів. Моделювались такі варіанти (швидкість руху локомотива 20 км/год):

1) живлення першого і другого АТД здійснюється від різних автономних інверторів, а трифазне коротке замикання відбувається в колах живлення другого АТД;

2) живлення обох АТД здійснюється від одного АН, і трифазне коротке замикання відбувається одночасно в колах живлення обох двигунів.

Результати розрахунків (варіант 1) показали, що при виникненні, у випадку короткого замикання, тормозного електромагнітного моменту, величина якого в 5,6 разу перевищує його значення у стаціонарному режимі руху, ударні навантаження діють, в основному, на елементи другого приводу. Так сила взаємодії зубців зростає в 2,2 разу, а сила в вузлі опрацювання другого двигуна - в 3,5 разу. При цьому аналогічні сили в першому АТД зростають не більш, як в 1,3 разу. Ці ударні процеси, практично, не впливають на горизонтальну і вертикальну складові сили між кузовом і візком. Відбувається навантаження ресорних комплектів - сила в першому

зростає в 1,6 разу, а сила в другому в -1,4 разу. Зусилля в першій поводковій буксі збільшується в 1,7 разу. Значення вертикальних складових сил в місцях контактів коліс з колією збільшується, відповідно, в 1,7 та 1,6 разу.

У випадку одночасних трифазних коротких замикань (варіант 2), навантаження елементів приводів аналогічні розглянутим раніше (варіант 1). Сила взаємодії зубців тягових передач збільшується в 2,2 разу. Сили у вузлах опирання двигунів зростають в 1,4 та 3,6 разу, відповідно. Значення вертикальних складових сил в місцях контактів коліс з колією збільшується, відповідно, в 2,2 та 1,5 разу.

Висновки.

В результаті досліджень одержані такі наукові та практичні результати:

1. Створена математична модель асинхронного тягового привода, який розглядається як електромеханічна система, для досліджень електромагнітних процесів АТД та навантаження елементів привода при стаціонарних та перехідних режимах руху (в тому числі при аварійних коротких замиканнях в колах живлення статорних обмоток). Модель дозволяє враховувати нелінійності та можливі зазори у зв'язках між елементами АТП. Запропоновано моделі механічної частини АТП трьох типів: 1) з опорно-рамним підвищенням АТД і порожнистим карданним валом на осі колісної пари; 2) з опорно-рамним підвищенням АТД карданним валом в порожнистому роторі; 3) з опорно-осьовим закріпленням АТД і двосторонньою зубчастою передачею.

Результати теоретично розрахованих частот власних коливань та відношень амплітуд моментів в реактивній тязі і порожнистому карданному валі повністю укладаються в інтервал значень, отриманих під час експериментів другими авторами (по першій та третій формах). Відхилення результатів розрахунків від результатів

досліджень при коротких замиканнях в колах живлення асинхронних тягових двигунів в контрольних випадках не перевищило 15%.

2. Запропонована методика спрощення математичної моделі АТП, на основі аналізу частот та форми власних коливань механічної частини приводу, а також динамічних процесів в ньому. Під час досліджень частот та форми власних коливань механічних частин тягових приводів одержані діапазони частот для відповідних типів АТП в режимі тяги:

1) 7,49 - 1171 Гц; 2) 112 - 1143 Гц; 3) 5,19 - 810 Гц.

3. Розроблена модель взаємодії зубчастих коліс, яка дозволяє врахувати вплив неідеальності виготовлення коліс на динамічні процеси в АТП. Результати теоретичних і експериментів підтверджені даними, отриманими іншими авторами під час іспитів. Різниця найбільших динамічних зусиль не перевищує 25%.

4. Розроблена математична модель, в якій АТД з короткозамкненим ротором представлений як трифазна узагальнена асинхронна машина, дозволяє моделювати процеси в несиметричних колах статорних обмоток, що дає можливість проводити дослідження електромеханічних процесів в АТД як при трифазних, так і при двофазних коротких замиканнях. Виявлено, що при трифазних коротких замиканнях і заданій швидкості локомотива максимальне значення електромагнітного моменту, який виробляє АТД, не залежить від фази замикання. Під час двофазних коротких замикань рівні ударних навантажень значно залежать від фази замикань (відрізняються майже в 2 рази).

5. Результати теоретичних досліджень показали, що незалежно від типу АТП, що розглядалися, найбільші ударні моменти при аварійних коротких замиканнях в колах живлення обмоток статора АТД виникають в діапазоні швидкостей 20-30 км/год.

6. Запропоновано з метою зменшення навантажень елементів ц. прова і струмів при коротких замиканнях використовувати для ефективного гашення енергії додаткові резистори та індуктивності. Приведені в

роботі графіка дозволяють підібрати величину додаткових резисторів та індуктивностей, щоб навантаження не перевищували допустимі.

7. Використання АТД з подвійними статорними обмотками дозволяє значно зменшити пульсації електромагнітного моменту.

8. Результати дисертаційної роботи використані при конструкторських розробках локомотивів ЗТЕ120 і ЗТЕ137 на ВО "Луганськтепловоз" і проектно-конструкторських розробках варіантів промислового маневрового локомотива, що проводилися УЕЛНДІ.

Основний зміст дисертації опублікований в таких роботах:

1. Бондарев А.М., Івченко Ю.Н., Пяцовский Р.В. О математическом моделировании процессов в тяговых приводах локомотивов с асинхронными тяговыми двигателями с двойными статорными обмотками // Динамика и прочность железнодорожного поезда: Межвуз. сб. науч. тр. / Днепропетр. ин-т инж. ж.-д. трансп. Днепропетровск, 1991. С.102-109.

2. Івченко Ю.Н. Электронное моделирование асинхронного тягового привода тепловоза с полым карданным валом // Динамика, прочность и надежность железнодорожного состава: Межвуз. сб. науч. тр. / Днепропетр. ин-т инж. ж.-д. трансп. Днепропетровск, 1987. С.149-157.

3. Івченко Ю.Н. Плоские колебания двухосной тележки с учетом электромеханических процессов в асинхронном тяговом двигателе // Проблемы механики железнодорожного транспорта: Тез. докл. 8 конф. Май 1992. Днепропетровск, 1992. С. 32-33.

4. Исследование нагруженности асинхронного привода при коротком замыкании статорных обмоток тягового двигателя / Л.А. Манашкин, А.М. Бондарев, Ф.Г. Вербер, Н.И. Грановская, Ю.Н. Івченко // Динамика, прочность и надежность транспортных машин: Сб. науч. тр. / Брянский ин-т транспортного машиностроения. Брянск, 1986. С. 146-152.

5. Сравнительная оценка ударных нагрузок в двух типах тягового привода тепловоза при коротком замыкании в цепях статорной обмотки

асинхронного двигателя/ Л.А. Манашкин, А.М. Бондарев, Ф.Г. Вербер, Ю.Н. Ивченко// Конструирование и производство транспортных машин: Республ. межведомств. научно-техн. сб./ Ворошиловоград. машиностр. ин-т. Харьков, 1987. Вып. 19. С. 43-49.

6. Об упрощении математических моделей тяговых приводов локомотивов/ Л.А. Манашкин, А.М. Бондарев, Ф.Г. Вербер, Ю.Н. Ивченко// Динамика, прочность и надежность железнодорожного состава: Межвуз. сб. науч. тр./ Днепропетр. ин-т. инж. ж.-д. трансп. Днепропетровск, 1987. С.149-157.

7. Моделирование динамической нагруженности группового и индивидуального асинхронных тяговых приводов локомотивов в режимах буксований/ Л.А. Манашкин, А.М. Бондарев, Н.И. Грановская, Ю.Н. Ивченко, Р.В. Пацовский// Динамика, прочность и надежность транспортных машин: Сб. науч. тр./ Брянский ин-т транспортного машиностроения. Брянск, 1990. С.43-47.

8. Математическое моделирование динамических процессов в приводе тепловоза с опорно-рамным подвешиванием при неидеальной зубчатой передаче/ Л.А. Манашкин, А.М. Бондарев, Н.И. Грановская, Ю.Н. Ивченко// Динамика, прочность и надежность транспортных машин: Сб. науч. тр./ Брянский ин-т транспортного машиностроения. Брянск, 1990. С.59-64.

9. Математическое моделирование электромеханических процессов в асинхронных групповых и индивидуальных (с опорно-осевым подвешиванием) приводах локомотивов/ Л.А. Манашкин, А.М. Бондарев, Н.И. Грановская, Ю.Н. Ивченко, Р.В. Пацовский. Днепропетровск, 1990. С. 52. Деп. в ЦНИИТЭИ 30.05.91, № 5124.

10. Испытательный стенд электропривода локомотива: А.с. 1788454 СССР, МКИ G01M17/00/ Л.А. Манашкин, А.М. Бондарев, Р.В. Пацовский, Ю.Н. Ивченко (СССР). 10с.: ил.1.

11. Исследование динамической нагруженности асинхронных тяговых

приводов локомотивов при трогании с места поезда/ Л. А. Манашкин, А. М. Бондарев, Н. И. Грановская, Ю. Н. Ивченко, Р. Ю. Пацовский// Динамика и прочность железнодорожного поезда: Межвуз. сб. науч. тр./ Днепропетр. ин-т. инж. ж.-д. трансп. Днепропетровск, 1991. С. 71-79.

12. О частотах и формах колебаний индивидуального и группового приводов локомотивов с асинхронными тяговыми двигателями/ Л. А. Манашкин, А. М. Бондарев, Ю. Н. Ивченко, Р. Ю. Пацовский// Динамика поезда и подвижного состава железных дорог: Межвуз. сб. науч. тр./ Днепропетр. ин-т. инж. ж.-д. трансп. Днепропетровск, 1990. С. 52-59.

Ivchenko Y.N. Dynamical loading the elements asynchronous drive by blow loads.

Dissertation on academic degree candidate of technical science according to speciality 05.22.07 - rolling-stock and traction trains, Dnepropetrovsky state technical university railway transport, Dnepropetrovsk, 1995.

18 science works and 1 invention are defended, where analyze condition arise blow processes in electromechanical systems different type drive locomotives with induction motor, evaluation load elements drives, design way manner methods prevent blows and overing load elements drives. Establish from mathematical experience, what drive type-independent, most blow moments by repair short circuit stator windings in induction motor aris over the range speeds 20-30 km/h. It is advisable coupe an additional resistance or inductance, which select in accordance with results research into circuit for effective extinguish energy in order to overing loadings and currents with short circuit. Under development locomotives the results dissertation work was used.

Івченко Ю.Н. Динамічна навантаженість елементів асинхронних тягових приводів при ударних навантаженнях.

Дисертація на соискание ученої ступені кандидата технічних наук по спеціальності 05.22.07 - подвижний склад залізних доріг і тяга поїздів, Дніпропетровський державний технічний університет залізничного транспорту, Дніпропетровськ, 1995.

Захищається 18 научних робіт і 1 авторське свідчення, які містять аналіз умов виникнення ударних процесів в електромеханічних системах різних типів приводів локомотивів з асинхронними тяговими двигачами, оцінку навантаженості елементів приводу, розробку способів запобігання ударам і зниження навантаженості елементів приводу. В результаті математичного моделювання встановлено, що незалежно від типу розглянутих приводів, найбільші ударні моменти при аварійних коротких замиканнях в цепях живлення обмоток статора асинхронного тягового двигача виникають в діапазоні швидкостей 20 - 30 км/ч. Рекомендовано для ефективного гашення енергії в цепях живлення статорних обмоток, щоб навантаження не перевищували допустимі, використовувати додаткові опору або індуктивності, значення яких визначаються по графікам, приведеним в роботі. Результати дисертаційної роботи використані при конструкторських розробках локомотивів.

Ключові слова:

асинхронний тяговий привод, навантаженість, математичне моделювання.

Івченко Юрій Миколайович

ДИНАМІЧНА НАВАНТАЖЕНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ АСИНХРОННИХ
ТЯГОВИХ ПРИВОДІВ ПРИ УДАРНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

05 22.07. Рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Підписано до друку 07.12.94. Формат 60x84/16. Папір для розмножувальних апаратів. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 1,3. Обл.-вид. арк. 1,0. Тираж 100 прим. Зам. 761. Безкоштовно.

Дільниця оперативної поліграфії ДДТУЗТ

320700, ГСП, Дніпропетровськ, 10, вул. Акад. В. А. Ласаряна, 2

456474

AB 31.697

AB 31.697