

МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ
Українська державна академія залізничного транспорту

На правах рукопису

Ковальов Олександр Юхимович

УДК: 629.4.027:621.333

**Удосконалення методів розрахунків
та випробувань тягових електродвигунів
для рухомого складу нового покоління**

05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник:
Яцько Сергій Іванович
кандидат технічних наук,
доцент

Харків –2008

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| Вступ | 5 |
| Розділ 1 Аналіз досліджень по проблемі забезпечення динамічних та міцнісних характеристик тягових електродвигунів рейкового рухомого складу...16 | 16 |
| 1.1. Аналіз динамічних навантажень тягового електроприводу рухомого складу..... | 16 |
| 1.2. Дослідження особливостей конструктивного виконання тягових електродвигунів сучасного рухомого складу..... | 19 |
| 1.3. Огляд існуючих методів розрахунків та випробувань тягових електродвигунів по забезпеченню динамічних та міцнісних характеристик.. | 25 |
| 1.4. Висновки по першому розділу. Мета і завдання дослідження..... | 31 |
| Розділ 2 Удосконалення методів динамічних та міцнісних розрахунків тягових електродвигунів та їх випробувань..... | 35 |
| 2.1. Розробка скінченно-елементної моделі тягового електродвигуна з урахуванням анізотропії осердя статора для цілей динамічних і міцнісних досліджень..... | 35 |
| 2.2. Розробка моделі механічної вібрації тягових електродвигунів..... | 52 |
| 2.3. Удосконалення методу випробувань тягових електродвигунів..... | 67 |
| 2.4. Перевірка адекватності розрахункових моделей тягового електродвигуна..... | 86 |
| 2.5. Висновки по другому розділу..... | 92 |
| Розділ 3 Дослідження напружено–деформованого стану тягового електродвигуна..... | 96 |

| | |
|--|-----|
| 3.1. Визначення просторових складових вібронавантаження тягових електродвигунів в експлуатації..... | 96 |
| 3.2. Дослідження впливу анізотропії осердя статора і характеру зовнішнього навантаження на напружено–деформований стан тягового електродвигуна | 109 |
| 3.3. Дослідження опору стомленості несучих елементів тягового електродвигуна..... | 115 |
| 3.4. Висновки по третьому розділу..... | 117 |
| Розділ 4 Дослідження динамічних характеристик тягового електродвигуна..... | 120 |
| 4.1. Дослідження впливу анізотропії осердя статора на власні частоти та форми коливань..... | 120 |
| 4.2. Дослідження впливу конструктивних параметрів тягового електродвигуна на рівень сил в підшипникових опорах..... | 124 |
| 4.3. Дослідження залежності власного вібростану тягового електродвигуна від його конструктивних параметрів..... | 134 |
| 4.4. Експериментальні дослідження власного вібростану тягових електродвигунів..... | 139 |
| 4.5. Висновки по четвертому розділу..... | 143 |
| Висновки..... | 145 |
| Список використаних джерел..... | 150 |
| Додатки | 163 |
| Додаток А Алгоритм рішення задачі | 164 |
| Додаток Б Результати досліджень вібронавантаженості ТЕД локомотива в експлуатації | 167 |
| Додаток В Результати обчислень коефіцієнтів рядів Фур'є | 169 |

| | |
|--|-----|
| Додаток Г Результати вимірювання спектрів віброскорості | 178 |
| Додаток Д Техніко-економічна ефективність розробки вдосконалених методів механічних розрахунків та випробувань тягових електродвигунів | 184 |
| Додаток Е Акт впровадження результатів роботи в виробництво | 188 |
| Додаток Ж Акт впровадження результатів роботи у навчальний процес..... | 191 |

ВСТУП

В рамках «Комплексної програми оновлення залізничного рухомого складу України на 2006–2010 роки» передбачається створення рухомого складу нового покоління, з високим рівнем безпеки руху та якісно кращими експлуатаційними характеристиками. Однією з цілей є підвищення швидкості руху, що потребує зниження рівня динамічної взаємодії екіпажа і колії. Важливим напрямком вирішення цієї науково-технічної задачі є зниження маси ходової частини, як необресореної, так і маси всього візка. В першу чергу це можливо за рахунок поліпшення масогабаритних показників розміщеного на візках обладнання, такого як тяговий електродвигун (ТЕД), редуктор та іншого.

Щодо ТЕД, вже є практичний досвід їх створення без жорсткого масивного корпусу. Це дало значний виграш за масою та габаритами, але потягло за собою проблеми щодо забезпечення їх динамічних і міцнісних характеристик.

У зв'язку з цим, важливою задачею, що потребує вирішення при створенні ТЕД з поліпшеними масогабаритними показниками, є вдосконалення методів розрахунків та випробувань в плані підвищення їх точності і достовірності.

Актуальність теми. Аналіз даних експлуатації ТЕД свідчить про те, що до 50% відмов відбувається з механічних причин, що в першу чергу пов'язано із значними зовнішніми динамічними навантаженнями, які визначаються взаємодією рухомого складу і колії та взаємним впливом елементів тягового електропривода під час руху. Остання обставина диктує необхідність визначення міцнісних та динамічних характеристик, зокрема власних частот та форм коливань ТЕД з урахуванням його підвішування.

Велике значення мають також внутрішні збудники механічних коливань ТЕД, узагальненою характеристикою яких є рівень власної вібрації

ТЕД. Підвищений рівень вібрації призводить до суттєвого зниження ресурсу як основних елементів, так і ТЕД в цілому. Наприклад, відомо, що зростання віброшвидкості ТЕД з 5 до 10 мм/с знижує ресурс якірних підшипників на 70%. Тому допустимий рівень власної вібрації ТЕД досить жорстко обмежується нормативними документами та контролюється при його виготовленні.

Зовнішні і внутрішні динамічні навантаження сприймаються несучими елементами ТЕД, зокрема корпусом, який може бути традиційним суцільнометалевим, виготовленим з литва або звареним з прокату, або каркасного типу (безкорпусне виконання ТЕД). Безкорпусні ТЕД вигідно відрізняються за питомою матеріаломісткістю від виготовлених з застосуванням традиційної конструкції. Зазначені двигуни використовуються як на рухомому складі зарубіжного виробника, так і на рухомих одиницях нового покоління вітчизняного виробництва, а саме на дослідних зразках локомотивів ДСЗ, ТЕП-150 та дизель-поїздів ДЕЛ-02.

У зв'язку з суттєвими відмінностями ТЕД безкорпусного виконання, пов'язаними з відсутністю суцільнометалевого корпусу, виявилось, що дотримання чинних норм проектування не забезпечує вимог до динаміки та міцності ТЕД. З цього випливає актуальність і гостра практична потреба удосконалення методів розрахунків і випробувань безкорпусних ТЕД рухомого складу в частині врахування особливостей їх конструкції.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася на кафедрі "Системи електричної тяги" Української державної академії залізничного транспорту відповідно до Державної програми "Розвиток рейкового рухомого складу соціального призначення для залізничного транспорту та міського господарства" (введена в дію постановою Кабінету Міністрів України № 769 від 02.06.1998 р.), Державної програми розвитку машинобудування на 2006–2011 рр. у рамках дослідно-

конструкторської роботи "Розробка і створення дослідницького стенда системи інвенторного запуску дизель-агрегатів тепловозів" (№ ДР 0108U000046), науково-дослідної роботи „Проведення досліджень з оптимізації електрообладнання електропоїздів і розробка рекомендацій щодо створення для них енергозберігаючого комплексу електрообладнання” (№ ДР 0107U005713), за безпосередньої участі автора. Автор є виконавцем у всіх перерахованих науково-дослідних роботах.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення точності і достовірності методів розрахунків та випробувань тягових електродвигунів для рухомого складу нового покоління шляхом врахування особливості їх виконання та умов експлуатації, що дозволяє поліпшити масогабаритні показники тягових електродвигунів та знизити динамічну взаємодію екіпажа і колії.

Для досягнення поставленої мети сформульовані такі основні завдання:

- виконати аналіз існуючих методів розрахунків та випробувань тягових електродвигунів рухомого складу щодо забезпечення їх динамічних і міцнісних характеристик;

- розробити скінченноелементну модель статора і тягового електродвигуна в цілому для цілей вирішення задач про власні форми та частоти коливань, статичного та динамічного аналізу напружено-деформованого стану з урахуванням конструктивних особливостей тягового електродвигуна, в тому числі анізотропії осердя статора;

- побудувати математичну модель коливань ротора у пружних опорах з нелінійною характеристикою і на її базі та моделі статора розв’язати задачу про власний вібраційний стан тягового електродвигуна;

- на базі фізичного моделювання візка тягового рухомого складу визначити зв’язок характеристик динамічного навантаження елементів візка, в тому числі тягового електродвигуна, і характеристик напруженого стану та

здійснити перевірку адекватності розробленої скінченноелементної моделі тягового електродвигуна;

– методами спектральної вібродіагностики одержати експериментальні дані про рівень та спектральний склад власної вібрації окремого тягового електродвигуна безкорпусного виконання та здійснити перевірку адекватності математичної моделі для розв'язання задачі про його власний вібростан;

– використовуючи методи експериментальних досліджень, отримати уточнені дані параметрів зовнішніх механічних факторів, що діють в експлуатації на тяговий електродвигун з опорно-рамним підвішуванням в частині співвідношення вертикальної, повздожньої та бокової складових сумарного вектора віброприскорень, і на їх основі виконати аналіз впливу безкорпусної конструкції тягового електродвигуна на його напружено-деформований стан;

– на основі розробленої скінченноелементної моделі тягового електродвигуна визначити динамічні характеристики, зокрема власні частоти та форми коливань з урахуванням впливу його конструктивного виконання та підвішування на локомотиві;

– методами математичного моделювання і чисельного аналізу отримати залежність рівня власної вібрації тягового електродвигуна безкорпусного виконання від частоти обертання ротора та його конструктивних параметрів.

Об'єкт дослідження – процес створення та випробувань тягових електродвигунів з поліпшеними масогабаритними показниками для рухомого складу нового покоління.

Предмет дослідження – методи розрахунків та випробувань тягових електродвигунів з урахуванням впливу конструктивного виконання для забезпечення їх міцнісних і динамічних характеристик.

Методи дослідження. Досягнення поставленої мети реалізовано на основі чисельних та аналітичних методів аналізу напружено-деформованого стану пружних тіл на базі методу скінченних елементів, аналітичних методів теоретичної механіки, теорії коливань, математичної статистики, експериментальних методів дослідження напружено-деформованого стану конструкцій та методів спектральної вібродіагностики.

Наукова новизна одержаних результатів:

– вперше запропоновано підхід до комплексного вирішення наукової задачі удосконалення динамічних і міцнісних методів розрахунків та випробувань тягових електродвигунів, що дозволило забезпечити підвищення їх точності та достовірності;

– вперше отримано залежності параметрів динамічного навантаження і напруженого стану статора тягового електродвигуна з явно вираженою анізотропією його елементів, що дозволило виявити вплив конструкційного виконання тягового електродвигуна на його динамічні і міцнісні характеристики;

– вперше отримано закономірності впливу анізотропії осердя статора тягового електродвигуна, як складової екіпажної частини рухомого складу, на власні частоти та форми коливань, його напружено-деформований стан, що дозволило розрахувати динамічні і міцнісні параметри тягового електродвигуна з поліпшеними масогабаритними показниками;

– вперше отримано залежності рівня віброшвидкості тягового електродвигуна безкорпусного виконання від частоти обертання ротора, величини залишкового дисбалансу та радіального зазору в підшипниках з урахуванням масових і жорсткісних характеристик статора двигуна, інерційних і геометричних параметрів ротора, що дозволило розв'язати задачу визначення максимально допустимого залишкового дисбалансу ротора;

– отримали подальший розвиток методи розв’язання задач теорії нелінійних коливань жорсткого ротора тягового електродвигуна в опорах з нелінійною характеристикою при дії сил залишкового дисбалансу ротора, що дозволило розв’язати задачу про власний вібростан тягового електродвигуна з урахуванням особливостей його конструкції;

– удосконалено методи розв’язання задач про динамічні характеристики та напружено–деформований стан тягового електродвигуна безкорпусного виконання в частині врахування його конструктивних особливостей, що дозволило підвищити точність і достовірність розрахунків;

– удосконалено методи випробувань тягових електродвигунів на віброміцність у складі натурного фрагмента візка рухомого складу, що дозволило визначити і проаналізувати частотний діапазон навантажень та наблизити умови випробувань до умов експлуатації і підвищити достовірність і інформативність випробувань.

Практичне значення одержаних результатів:

– розроблено методичні рекомендації щодо побудови скінченноелементної моделі тягового електродвигуна з використанням елементів, що адекватно відображають особливості конструкції тягового електродвигуна безкорпусного виконання і враховують анізотропію його складових частин;

– розроблено методикку та пристрій для стендових досліджень вібронавантаженості та віброміцності тягового електродвигуна у складі натурного фрагмента візка локомотива;

– уточнено дані щодо вібронавантаженості тягового електродвигуна з опорно-рамним підвішуванням в умовах рядової експлуатації рухомого складу в частині співвідношення вертикальної, повздовжньої та бокової складових сумарного вектора віброприскорень, що дозволило удосконалити методики розрахунків та випробувань на віброміцність тягових

електродвигунів;

– створені в роботі підходи і методики дозволили підвищити достовірність інженерних розрахунків щодо визначення напружено-деформованого стану та рівня власної вібрації цілої низки тягових електродвигунів безкорпусного виконання, зокрема АД914, АД906, ЕД150, ЕД150А;

– надано рекомендації щодо вибору максимально допустимого залишкового дисбалансу ротора тягового електродвигуна безкорпусного виконання при визначених зазорах та жорсткості статора для забезпечення його нормованого рівня механічної вібрації.

Особистий внесок здобувача. В роботах зі співавторами особистий внесок автора полягає в наступному:

1. В роботі "Карпенко В.В. Практична вібродіагностика тягових електричних машин на базі використання аналізатору спектру вібрації 795М / В.В. Карпенко, О.Ю. Ковальов, О.І. Суліма, В.П. Лянзберг // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук, 2004. – № 3/2004 (26). – С. 135-138." – зроблено аналіз джерел вібрації ТЕД з застосуванням методів спектральної вібродіагностики.

2. В роботі "Яцько С.І. Власні форми і частоти коливань тягових електродвигунів рухомого складу / С.І. Яцько, В.В. Карпенко, О.Ю. Ковальов // Українська державна академія залізничного транспорту: зб. наук. праць. – Х., 2004. – Вип. 57. – С. 51–56." – на основі моделювання досліджено власні частоти та форми коливань ТЕД та їх співвідношення з частотами зовнішніх факторів, а саме зубцевою частотою, дефектом внутрішнього та зовнішнього кілець якірного підшипника, залишкового дисбалансу якоря;

3. В роботі "Иванов В.А. Вибрация в электромеханических системах. Диагностика и моделирование / В.А. Иванов, В.В. Карпенко, А.Е. Ковалев // Вестник национального технического университета "Харьковский

политехнический институт". Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Х., 2005. – Тем. вып. 45. – С. 437–438." – розроблено математичну модель і на її основі виконано аналіз рівня вібрації електричної машини рухомого складу під дією сил, пов'язаних із залишковим дисбалансом.

4. В роботі "Яцько С.И. Исследования виброн нагруженности элементов тележек электропоезда ЕПЛ-9Т / С.И. Яцько, В.В. Карпенко, А.Е. Ковалев // Вестник национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Динамика и прочность машин: сб. науч. трудов. – Х., 2007. – Тем. вып. 22. – С. 188–195." – проведено дослідження вібронвантаження ТЕД в умовах рядової експлуатації та визначено співвідношення між просторовими складовими віброприскорень ТЕД електропоїзда ЕПЛ9Т.

5. В роботі "Яцько С.И. Обеспечение работоспособности локомотива путем улучшения динамических и прочностных характеристик тягового электродвигателя / С.И. Яцько, В.В. Карпенко, А.Е. Ковалев // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. Технічні науки. Серія транспорт: наук. журнал. – Луганськ, 2007. – № 8 (114). Частина 2. – С. 129 – 134." – на основі математичного моделювання проаналізовано рівень механічної вібрації в залежності від частоти обертання ротора, залишкового дисбалансу і зазорів у підшипнику та досліджено напружено–деформований стан статора ТЕД безкорпусного виконання під дією об'ємної зовнішньої вібрації.

6. В роботі "Пат. 28461 Україна, МПК (2006) G01M 7/00. Спосіб визначення допустимого залишкового дисбалансу ротора тягового електродвигуна безкорпусного виконання / Карпенко В.В., Ковальов О.Ю.; заявник та власник Державне підприємство завод "Електроважмаш". – № u200708868; заявлено 01.08.2007; опубл. 10.12.2007, бюл № 20."– отримано

експериментальні данні рівня власної вібрації тягових електродвигунів безкорпусного виконання для різних класів балансування їх роторів.

7. В роботі "Пат. 28857 Україна, МПК (2006) G01M 7/00, G01M 17/00. Стенд для випробувань на віброміцність тягового електродвигуна у складі натурального фрагмента візка електровоза / Карпенко В.В., Ковальов О.Ю.; заявник та власник Державне підприємство завод "Електроважмаш". – № u200708960; заявлено 03.08.2007; опубл. 25.12.2007, бюл № 21." – зроблено аналіз існуючих способів та стендів для вібраційних випробувань техніки для залізничного транспорту.

8. В роботі "Карпенко В.В. Вибропрочностные испытания тягового электродвигателя в составе фрагмента тележки пассажирского электровоза / В.В. Карпенко, А.Э. Подгородецкий, В.А. Харламов, А.Е. Ковалев, А.И. Сулима // Состояние и перспективы развития электроподвижного состава: IV междунар. науч.-техн. конф., 17–19 июня 2003 г.: тезисы докл. – Новочеркасск, 2003. – С. 261–262." – показано впровадження методики випробувань на віброміцність ТЕД у складі фрагмента візка.

9. В роботі "Яцько С.И. Исследование собственного вибросостояния тягового электродвигателя бескорпусного исполнения / С.И. Яцько, В.В. Карпенко, А.Е. Ковалев // Надежность и долговечность механизмов, элементов конструкций и биомеханических систем: материалы междунар. науч.-техн. конф., 5–8 сент. 2006 г. – Севастополь, 2006. – С.55 – 57." – розроблено скінченноелементну модель ТЕД безкорпусного виконання та проаналізовано вплив анізотропії статора на рівень його механічної вібрації.

Апробація результатів дисертації. Основні положення й результати дисертаційної роботи доповідались на IV Міжнародній науково-технічній конференції "Состояние и перспективы развития электроподвижного состава" (м. Новочеркаськ, 2003 р.), на Міжнародній науково-технічній конференції "Електромеханічні системи, методи моделювання та

оптимізації" (м. Кременчук, 2004 р.), на 66-70 науково-технічних конференціях кафедр Української державної академії залізничного транспорту та спеціалістів залізничного транспорту і підприємств (м. Харків, 2004-2007 рр.), на XII Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика" (м. Алушта, АР Крим, 2005 р.), на Міжнародних науково-технічних конференціях "Надійність і довговічність механізмів, елементів конструкцій і біомеханічних систем" (м. Севастополь, 2006–2007 рр.), на Міжнародному симпозиумі "Проблеми вдосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. (SIEMA'2005)" (м. Харків, 2005 р.), на XVII Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми розвитку рейкового транспорту" (м. Ялта, АР Крим, 2007 р.). Робота в повному обсязі доповідалась і була схвалена на розширеному засіданні кафедри "Системи електричної тяги" Української державної академії залізничного транспорту (м. Харків, травень 2008 р.) і на міжкафедральному семінарі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (м. Дніпропетровськ, 2008 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 11 наукових праць. Серед них 7 – у фахових виданнях, затверджених ВАК України (6 статей, 1 патент України), а також 4 додаткових (1 патент України, 3 тези доповідей на конференціях).

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і семи додатків. Повний обсяг дисертації складає 191 сторінку друкованого тексту, включаючи 78 ілюстрацій та 16 таблиць по тексту, 1 таблицю на окремій сторінці, додатки на 29 сторінках, список використаних джерел із 122 найменувань на 13 сторінках.

СПИСОК ВИКОРОСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Медель В.Б. Взаимодействие электровоза и пути / В.Б. Медель. – М.: Транспортиздат, 1955. – 284 с.
- Медель В.Б. Проектирование механической части электроподвижного состава / В.Б. Медель. – М.: Трасжелдориздат, 1963. – 423 с.
- Медель В.Б. Подвижной состав электрических железных дорог. Конструкция и динамика / В.Б. Медель. – М.: Транспорт, 1965. – 278 с.
- Лазарян В.А. Динамика вагонов (устойчивость движения и колебаний) / В.А. Лазарян. – М.: Транспорт, 1964. – 255 с.
- Лазарян В.А. Устойчивость движения рельсовых экипажей / В.А. Лазарян, Л.А. Длугаш, М.Л. Коротенко. – К.: Наук. думка, 1972. – 198 с.
- Блохин Е.П. Динамика поезда (нестационарные продольные колебания) / Е.П. Блохин, Л.А. Монашкин. – М.: Транспорт, 1982. – 222 с.
- Вершинский С.В. Динамика вагона: Учебник для вузов ж.-д. трансп. / С.В. Вершинский, В.Н. Данилов, В.Д. Хусидов; под ред. С.В. Вершинского. – М.: Транспорт, 1991. – 360 с.
- Вериго М.Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М.Ф. Вериго, А.Я. Коган. – М.: Транспорт, 1986. – 560 с.
- Дьомін Ю.В. Основи динаміки вагонів: Навч. посіб. / Ю.В. Дьомін, Г.Ю. Черняк. – К.: КУЕТТ, 2003. – 270 с.
- Автоколебания и устойчивость движения рельсовых экипажей / Ю.В. Демин, Л.А. Длугаш, М.Л. Коротенко и др. – К.: Наук. думка, 1984. – 160 с.
- Голубенко А.Л. Сцепление колеса с рельсом: 2-е изд., доп. и пере раб. / А.Л. Голубенко. – Луганськ: ВУГУ, 1999. – 476 с.
- Динамика установившегося движения локомотивов в кривых / С.М. Куценко, Е.П. Руссо, Е.П. Елбаев и др. – Харьков: ХГУ, 1975. – 132 с.
- Ушкалов В.Ф. Статистическая динамика рельсовых экипажей / В.Ф. Ушкалов, Л.М. Резников, С.Ф. Редько. – К.: Наук. думка, 1982. – 359 с.

- Мямлин С.В. Моделирование динамики рельсовых экипажей / С.В. Мямлин. – Днепропетровск: Новая идеология, 2002. – 240 с.
- Минов Д.К. Механическая часть электрического подвижного состава / Д.К. Минов. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 383 с.
- Минов Д.К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей / Д.К. Минов. – М.: Транспорт, 1965. – 266 с.
- Конструкция и динамика тепловозов / В.Н. Иванов, В.В. Иванов, Н.И. Панов и др. – М.: Транспорт, 1968. – 321 с.
- Хлебников В.Н. Конструкция электровозов. Механическая часть / В.Н. Хлебников. – М.: Машиностроение, 1964. – 303 с.
- Беляев А.И. Оптимальное проектирование упругих самоустанавливающихся зубчатых колес / А.И. Беляев, В.Н. Иванов // Тр. МИИТ.– 1976. – вып. 545. – С. 53–69.
- Беляев А.И. Исследование виброударных колебаний в жестких и упругих тяговых передачах / А.И. Беляев, В.Ш. Джамолов // Тр. МИИТ.– 1971.– вып. 390. – С. 128–137.
- Евстратов А.С. Экипажные части тепловозов / А.С. Евстратов. – М.: Машиностроение, 1987. – 136 с.
- Бирюков И.В. Пространственные колебания полого карданного вала в тяговых приводах системы Жакмен / И.В. Бирюков, Г.П. Бурчак, Н.В. Львов // Тр. МИИТ. – 1974. – вып. 470. – С. 10–15.
- Шацилло А.А. Тяговый привод электроподвижного состава / А.А. Шацилло. – М.: Трансжелдориздат, 1961. – 222 с.
- Результаты экспериментальных исследований динамики тяговых двигателей ЕД–118А в условиях эксплуатации с целью отработки новых перспективных конструкций тяговых электродвигателей для тепловозов: Отчет НИР / ВНИТИ. – И–112–75. – Коломна, 1975. – 84 с.
- Магистральные электровозы. Тяговые электрические машины/ В.И. Бочаров, Г.В. Василенко, В.Г. Щербаков и др.; под ред. В.И. Бочарова, В.П. Янова. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 464 с.

- Динамические исследования тягового электродвигателя магистрального тепловоза в условиях эксплуатации: отчет о НИР/НИИ завода "Электротяжмаш".-Х., 1989.- 103с. – № Г.Р. 01880044396. – Инв. № БИЛТ.650075.
- Подвижной состав и тяговое хозяйство железных дорог / под ред. А.П. Третьякова. – М.: Транспорт, 1970. – 352 с.
- Бирюков И.В. Классификация тяговых приводов по их динамическим качествам / И.В. Бирюков // Тр. МИИТ. – 1973. – вып. 405. – С. 126–141.
- Бирюков И.В. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог / И.В. Бирюков, А.И. Беляев, Е.К. Рыбников. – М.: Транспорт, 1986. – 256 с.
- Прочность и безотказность подвижного состава железных дорог / А.Н.Савоськин, Г.П.Бурчак, А.П.Матвеевичев и др.; под общ. ред. А.Н.Савоськина. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
- Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) / М.: ВНИИВ, ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
- Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов и динамических качеств экипажной части моторвагонного подвижного состава железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм / М.: ВНИИЖТ, 1997. – 145 с.
- Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм / М.: ВНИИЖТ, 1998. – 145 с.
- Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / В.П. Когаев. – М.: Машиностроение, 1997. – 232 с.
- Когаев В.П. Расчеты деталей машин на прочность и долговечность: Справочник / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
- Труфяков В.И. Усталость сварных соединений / В.И. Труфяков. – К.: Наук. думка, 1973. – 216 с.
- Троценко В.Т. Усталость и неупругость металлов / В.Т. Троценко. – К.: Наук. думка, 1971. – 232 с.

- Серенсен С.В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность: [Руководство и справочное пособие] / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович; под ред. С.В.Серенсена. – М.: Машиностроение, 1975. – 498 с.
- Савоськин А.Н. Надежность несущих деталей подвижного состава при усталостных повреждениях / А.Н. Савоськин, Е.В. Сердобинцев // Вестник ВНИИЖТ: Сб. научн. работ. – М., 1984. – № 7. – С. 33–36.
- Конструкция, расчет и проектирование локомотивов / под ред. А.А.Камаева. – М.: Машиностроение, 1981. – 351 с.
- Расчет грузовых вагонов на прочность при ударах / под ред. Е.П.Блохина. – М.: Транспорт, 1989. – 228 с.
- Блохин Е.П. Расчеты и испытания тяжеловесных поездов / Е.П.Блохин, Л.А.Манашкин, Е.Л.Стамблер и др.; под ред. Е.П.Блохина. – М.: Транспорт, 1986. – 263 с.
- Маслиев В.Т. Эксплуатационные испытания тепловозов с пневматическим рессорным подвешиванием // Локомотивостроение: республиканский науч. техн. сборник. – 1970. – вып. 2. – С. 28–32.
- Горский А.В. Оптимизация системы ремонта локомотивов / А.В. Горский, А.А. Воробьев. – М.: Транспорт, 1994. – 208 с.
- Загальний курс та технології роботи транспорту (залізничний транспорт) / [М.І.Данько, Т.В.Буцько, В.М.Кулешов та ін.]; за ред. М.І.Данька. – Х.:УкрДАЗТ, 2007. – 242 с.
- Диагностика и регулировка тепловозов / А.З.Хомич, С.Г.Жалкин, А.Э.Симпсон и др. – М.: Транспорт, 1977. – 222 с.
- Головко В.Ф. Розрахунок імовірності безвідмовної роботи буксових вузлів за допомогою моделі відмов / В.Ф. Головко, Д.І. Волошин // Українська державна академія залізничного транспорту: зб. наук. праць. – Х., 2004. – вип. 57. – С. 5–9.
- Бабанин А.Б. Совершенствование технологии испытаний тяговых электрических машин / А.Б. Бабанин, В.В. Артеменко // Коммунальное

- хозяйство городов: научн.-техн. сборн. – X., 2004. – вып. 55. – С. 171-177.
- Басов Г.Г. Развитие электричного моторвагонного рухомого складу / Г.Г. Басов, С.І. Яцько. – X.: "Апекс+", 2005. – 248с.
- Алексеев А.Е. Тяговые электродвигатели / А.Е. Алексеев. – М.: Трансжелдориздат, 1951. – 254с.
- Иоффе А.Б. Тяговые электрические машины (теория, конструкция, проектирование) / А.Б. Иоффе. – М. – Л.: Изд. "Энергия", 1965. – 232 с.
- Курбасов А.С. Проектирование тяговых электродвигателей: Учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / А.С.Курбасов, В.И.Седов, Л.Н.Сорин; под ред. А.С.Курбасова.– М.:Транспорт, 1987.– 536 с.
- Захарченко Д.Д. Тяговые электрические машины / Д.Д. Захарченко, И.А. Ротанов. – М.: Изд-во "Транспорт", 1991. – 343 с.
- Проектирование тяговых электрических машин / М.Д. Находкин, Г.В. Василенко, В.И. Бочаров и др.; под ред. Находкина М.Д. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.
- Оптимизация электродвигателей / В.И.Бочаров, В.Д.Лямзенко, В.И.Седов и др. – Ростов н/Д: Изд. РГУ, 1978. – 168 с.
- Тяговые электродвигатели электровозов / В.И.Бочаров, В.И.Захаров, Л.Ф.Коломейцев и др.; под ред. В.Г.Щербакова. – Новочеркасск: Агенство Наутилус, 1998. – 672 с.
- Хворост М.В. Электромеханические уравнения подобия и их применение при синтезе системы "полупроводниковый преобразователь–тяговый асинхронный двигатель // Електротехніка і електромеханіка: щокварт. наук.–практ. журн. – X., 2005. – № 3 С.50–55.
- Мандрыка О.Р. Оптимизация тепловозных двигателей / О.Р. Мандрыка, Е.И. Штангеев, В.Г. Лучин // Тепловозное и энергетическое оборудование: сб. науч. тр. – X., 1989. – Вып. 1. – С. 8–12.
- Пат. 58353 Российская Федерация, МКПО 13–01. Электродвигатель асинхронный тяговый / Гавриш В.Г., Гривин С.А., Макареев А.Д.; заявитель и патентообладатель ГП завод "Электротяжмаш". –

№ 2004500162; заявл. 22.01.2004 ; опубл. 16.12.05, Бюл. № 12. – 6 с.

Щербаков В.Г. Теоретические основы расчета коллектора, свободного от арочного распора / В.Г. Щербаков // "Электромеханика": изв. вузов, 1986. – № 5. – С. 55–56.

Щербаков В.Г. Метод расчета коллектора, свободного от арочного распора / В.Г. Щербаков // "Электромеханика": изв. вузов, 1986. – № 8. – С. 38–42.

Подгородецкий А.Э. Расчет эквивалентных нагрузок на вал тягового электродвигателя при сложном нестационарном нагружении / А.Э. Подгородецкий, Л.Б. Вайнштейн // Теплоходное и энергетическое оборудование: сб. науч. тр. – Х., 1989. – Вып. 1. – С. 68–71.

Машины электрические для тепловозов. Методика расчета на прочность коллекторов тяговых электродвигателей и генераторов постоянного тока: Руководящий документ / НИИ завода "Электротяжмаш". – РД 16-352-87. – Х., 1987. – 22 с.

Машины электрические для тепловозов. Методика расчета на прочность встроенных центробежных вентиляторов тяговых генераторов и электродвигателей: Руководящий документ / НИИ завода "Электротяжмаш". – РД 16-553-89. – Х., 1989. – 19 с.

Машины электрические для тепловозов. Методика расчета на прочность щитов подшипниковых тяговых генераторов и агрегатов: Руководящий документ / НИИ завода "Электротяжмаш". – РД 16-488-88. – Х., 1988. – 22 с.

Справочник машиностроителя: в 6 т. / Глав. ред. тома С.В.Серенсен. – М., 1956. – Т. 3. – 563 с.

Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: "Мир", 1975. – 541 с.

Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов в технике / Л. Сегерлинд. – М.: "Мир", 1979. – 392 с.

Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: "Мир", 1986, – 318 с.

Постнов В.А. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций /

- В.А. Постнов, И.Я. Хархурим. – Л.: Судостроение, 1987. –341 с.
- Козлов Л.Г. Исследование связанных колебаний конструктивных элементов тягового электродвигателя / Л.Г. Козлов, В.В. Карпенко, И.А. Голобродский и др. // Вестник ВНИИЖТ. – М., 1990, №2, С. 23–26.
- Алямовский А.А. SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов/А.А. Алямовский.– М.:ДМК Пресс, 2004.– 432с.
- Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows / Д.Г. Шимкович. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 448 с.
- Moaveni Saeed, Finite element analysis. Theory and application with ANSYS / Moaveni Saeed. – New Jersey: Prentice–Hall. Inc, 1999. – 527 p.
- Чигарев А.В. ANSYS для инженеров: [Справ. пособие] / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.
- Kieninger M. Entwicklung eines innovativen Leichtbau - Motordrehgestells im Rahmen des europäischen Forschungsvorhabens HEMBOT / M.Kieninger // ZEVrail Glasers Annalen. – 2004. – №6. – S. 278–286 : il.
- Яцько С.І. Власні форми і частоти коливань тягових електродвигунів рухомого складу / С.І. Яцько, В.В. Карпенко, О.Ю. Ковальов // УкрДАЗТ: сб. наук. праць. – Х. – 2004. – Вип. 57. – С. 54 – 59.
- Яцко С.И. Исследование собственного вибросостояния тягового электродвигателя бескорпусного исполнения / С.И. Яцко, В.В. Карпенко, А.Е. Ковалев // Надежность и долговечность механизмов, элементов конструкций и биомеханических систем: материалы междунар. науч.-техн. конф.,5–8 сент. 2006 г.– Севастополь, 2006.– С.55– 57.
- Киселев Ю.Л. Уравновешивание роторов энергетических машин в системе Ленэнерго / Ю.Л. Киселев. – Л.: ЦИНТИЭПиП, 1962. – 146с.
- Машины и технологическое оборудование. Система классов точности балансировки. Основные положения: ГОСТ 22061–76. – [Введен 1977–07–01]. – М.: Изд.-во стандартов, 1993.– 140 с.
- Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия: ГОСТ 2582–81. – [Введен 1983–01–01]. – М.: Изд.-во

- стандартов, 1981. – 50с.
- Шитиков Б.В. Динамическая балансировка роторов / Б.В. Шитиков. – М.: Трансжелдориздат, 1951. – 122 с.
- Основы балансировочной техники: В 2 т. Т. 1. Уравновешивание жестких роторов и механизмов / под ред. В.А. Щепетильникова. – М.: Машиностроение, 1975. – 528 с.
- Щепетильников В.А. Балансировка машин и приборов / В.А.Щепетильников, Ю.А.Самсаев, Т.П.Козлянинов ; под ред. В.А.Щепетильников. – М.: Машиностроение, 1979. – 294 с : ил.
- Бабаков И.М. Теория колебаний / И.М. Бабаков.– М.: "Наука", 1968.– 356с.
- Вибрации в технике: [Справочник]: в 6 т. Т.2. Колебания нелинейных механических систем / под ред. И.И. Блехмана. – М.: Машиностроение, 1979. – 356с.
- Крылов Н.М. Введение в нелинейную механику / Н.М. Крылов, Н.Н. Боголюбов. – К.: Изд. АН УССР, 1937. – 363 с.
- Боголюбов Н.Н. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний / Н.Н. Боголюбов, Ю.А. Митрофанов. – [4-е изд.]. – М.: "Наука", 1974. – 504 с.
- Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я.Г. Пановко. – Л.: "Машиностроение", 1976. – 320 с.
- Малкин И.Г. Некоторые задачи в теории нелинейных колебаний / И.Г. Малкин. – М.: Гостехиздат, 1956. – 492 с.
- Ковалев А.Е. Моделирование нелинейностей в механических системах с конечным числом степеней свободы // Інформаційно–керуючі системи на залізничному транспорті: наук.–техн. журнал.– 2007.– № 3 (65).–С.28–31.
- Аладьев В.З. Решение математических и физико–технических задач с пакетом Maple V / В.З. Аладьев, М.А. Богдавичус. – Вильнюс: Technics Press, 1999. – 686 с.
- Betounes D. Differential equations: Theory and application with Maple /

D. Betounes. – N.Y.: Springer, 2001. – 241 p.

Авраменко В.С. Вибрационное состояние тяговых двигателей тепловозов и пути повышения их надежности: автореф. дис. канд. тех. наук: спец. 05.22.07 "Подвижной состав и тяга поездов" / В.С. Авраменко. – Днепропетровск, 1986. – 22 с.

Глущенко М.Д. Методика выбора режима ускоренных испытаний и прогнозирования надежности тяговых двигателей электроподвижного состава: автореф. дис. канд. тех. наук: спец. 05.22.07 "Подвижной состав и тяга поездов" / М.Д. Глущенко. – М., 1980 – 21 с.

Исаев И.П. Ускоренные испытания и прогнозирование надежности электрооборудования локомотивов / И.П. Исаев, А.П. Матвиевичев, Л.Г. Козлов. – М.: Транспорт, 1984. – 248 с.

Исаев И.П. Основы методики ресурсных испытаний тяговых электродвигателей локомотивов / Исаев И.П., Козлов Л.Г., Гергель А.А., Карпенко В.В. // Тепловозное и энергетическое оборудование: сб. науч. тр. – Харьков, 1989. – Вып. 1. – С. 21–26.

Козлов Л.Г. Методика испытаний тяговых электродвигателей на виброустойчивость: автореф. дис. канд. тех. наук: спец. 05.22.07 "Подвижной состав и тяга поездов" / Л.Г. Козлов. – М., 1973 – 21 с.

Сергиенко П.Е. К вопросу вибрационных испытаний электрооборудования // Состояние и перспективы развития электроподвижного состава: IV междунар. науч.-техн. конф., 17–19 июня 2003 г.: тезисы докл. – Новочеркасск, 2003. – С. 175–176.

Гергель А.А. Колебания тяговых электродвигателей тепловозов и разработка предложений по увеличению их вибрационной стойкости и надежности: автореф. дис. канд. тех. наук: спец. 05.22.07 "Подвижной состав и тяга поездов" / А.А. Гергель. – Брянск, 1987 – 19 с.

Карпенко В.В. Вибрационная надежность тягового электродвигателя и методы ее прогнозирования: автореф. дис. канд. тех. наук: спец. 05.09.01 "Электрические машины" / В.В. Карпенко. – М., 1991 – 23 с.

- А.с. 1227966 СССР, G 01 М 17/00. Стенд для прочностных испытаний тяговых электродвигателей с опорно–осевым подвешиванием / Л.Г.Козлов, А.П.Матвеевичев, Е.Н.Мельников и др. (СССР). – № 3672574/27–11; заявл. 15.12.83; опубл. 30.04.86, Бюл. № 16
- А.с. 1472769 СССР, G 01 М 17/00. Стенд для испытаний колесно–моторного блока тепловозов / А.А.Гергель, В.В.Карпенко, Л.Г.Козлов и др. (СССР). – № 4253052/25–11; заявл. 01.06.87; опубл. 15.04.89, Бюл. №4.
- А.с. 1089446 СССР, G 01 М 17/00, G 01 N 3/32. Стенд для испытаний на удар электродвигателей / С.М.Королев, А.И.Клюжев, Н.Н.Юренев и др. (СССР). – № 3535074/25–28; заявл. 07.01.83; опубл. 30.04.84, Бюл. №16.
- А.с. 855422 СССР. G 01 М 17/00. Стенд для прочностных испытаний тяговых электродвигателей локомотива с опорно–осевым подвешиванием / Ю.М.Красницкий, А.П.Кучеренко, А.И.Лысиков и др. (СССР). – № 2861507/27-11; заявл. 26.12.79; опубл. 15.08.81, Бюл. №30.
- Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам: ГОСТ 17516.1–90. – [Введен 1991–01–01]. – М.: Изд.-во стандартов, 1990.– 18 с.
- Изделия электротехнические. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам: ГОСТ 16962.2–81. – [Введен 1991–01–01]. – М.: Изд.-во стандартов, 1990.– 49 с.
- Образцов И.Ф. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов: Учеб. пособие для студентов авиац. спец. вузов / И.Ф. Образцов, Л.М. Савельев, Х.С. Хазанов. – М.: Высш. шк., 1985. – 392с., ил.
- Пат. 28857 Україна, МПК (2006) G01M 7/00, G01M 17/00. Стенд для випробувань на віброміцність тягового електродвигуна у складі натурального фрагмента візка електровоза / Карпенко В.В., Ковальов О.Ю.; заявник та власник Державне підприємство завод "Електроважмаш". – № u200708960; заявлено 03.08.2007; опубл. 25.12.2007, бюл № 21.
- Бирюков И.В. Динамические нагрузки механических элементов тяговой

- передачи с асинхронными двигателями при аварийных режимах / И.В. Бирюков, В.В. Литовченко, С.С. Осипов и др. // Состояние и перспективы развития электроподвижного состава: междунар. науч. техн. конф. 11–12 июля 2000 г.: тезисы докл.–Новочеркасск, 2000.– С. 118–119.
- O.Körner. Comparison of mechanical drive concepts for high power ac-traction locomotives / Körner O. // *Elektrische Bahnen*. – 2004. – № 11. – S. 463–473.
- Добрынин С.А. Методы автоматизированного исследования вибрации машин: Справочник / С.А. Добрынин, М.С. Фельдман, Г.И. Фирсов. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.
- Seybert A.F. Estimation of damping from response spectra / A.F. Seybert // *Journal of Sound and Vibration*. – 1981. – Vol. 75, № 2. – P. 199–206.
- Машины электрические вращающиеся. Механическая вибрация некоторых видов машин с высотой оси вращения 56 мм и более. Измерение, оценка и допустимые значения: ГОСТ 20815-93. – [Введен 1997–01–01]. – М.: Изд.-во стандартов, Переиздание 2003. – 11 с.
- Повышение надежности экипажной части тепловозов/ А.И. Беляев, Б.Б. Бунин, С.М. Голубятников и др.; под ред. Л.К. Добрынина. – М.: Транспорт, 1984. – 284 с.
- Лысак В.А., Авраменко В.С. К вопросу о методике стендовых динамических испытаний ТЭД тепловозов с целью оценки прочности их элементов / В.А. Лысак, В.С. Авраменко // *Тр. ВНИТИ*. – 1979. – вып. 50, С. 112.
- Хоперский Ю.В. Состояние пути и вибрация тяговых двигателей электровозов / Ю.В. Хоперский // сб. науч. тр. ВЭЛНИИ «Электровозостроение». – Новочеркасск, 1980. – Т. 21. – С. 95 – 101.
- Sebald M.B. Vergleich Tatzlagerantrieb und Kardantrieb mit Hohlwelle / M.B. Sebald // *Eisenbahntechnische Rundschau*.– 2005.– №7/8. – S. 455–460.
- Карпенко В.В. Экспериментальные исследования собственных частот и форм колебаний элементов тягового электродвигателя / В.В. Карпенко; НИИ ЭТМ.– Х., 1986.– 12 с., ил.– Рус.– Деп. в Информэлектро 11.06.86, №411.

Барков А.В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А.В.

Барков, А.Ю. Баркова, А.Ю. Азовцев. – СПб.: Изд. центр СПбМТУ, 2000. – 169 с.

Гольдин А.С. Устранение вибрации турбоагрегатов на тепловых электростанциях / А.С. Гольдин. – М.: Энергия, 1980. – 96 с.

Коллакот Р.А. Диагностирование механического оборудования; перевод с англ / Р.А. Коллакот. – Л.: Судостроение, 1980. – 296 с.

