

Харківська державна академія  
залізничного транспорту

на правах рукопису

*Вітч*

ГОЛОВКО Владислав Федорович

ПРОГНОЗУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ДОПУСКІВ  
ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК АВТОНОМНОГО  
ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

05.22.07 - Рухомий склад залізниць та тяга поїздів

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття вченого ступеню

доктора технічних наук

Харків - 1997



00738061 (P)

Дисертація є рукопис. Ро  
 “Експлуатація та ремонт рухо  
 державної академії залізничного транспорту.

Науковий консультант - доктор технічних наук, професор

Едуард Давидович Тартаковський

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор

Євген Євгенович Коссов;

доктор технічних наук, професор

Юрій Андрійович Куліков;

доктор технічних наук, професор

Володимир Ілліч Мороз.

Ведуче підприємство -Харківський державний

політехнічний університет

м.Харків

Захист відбудеться “ 29 ” травня ” 1997р. 0  
13<sup>30</sup> год. ауд. зв. хіміч на засіданні спеціалізованої Ради  
 Д.02.15.01 при Харківській державній академії  
 залізничного транспорту за адресою:

**Україна, 310050, м. Харків, пл. Феєрбаха, 7.**

З дисертацією та авторефератом можна ознайомитися  
 в бібліотеці академії.

Відгуки на автореферат просимо направляти за  
 адресою спеціалізованої Ради академії.

Автореферат розіслано “ 15 ” квітня ” 1997р.

Вчений секретар спеціалі-

зованої Ради Д.02.15.01

к.т.н., доцент

П.О. Яновський

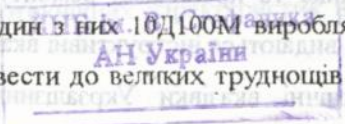
**Загальна характеристика роботи та її актуальність.**

Актуальність. В найближчі роки на залізничному транспорті необхідно буде вирішувати складні проблеми адаптації до роботи в умовах ринкової економіки. Технічне та технологічне відставання українських залізниць у порівнянні з розвинутими європейськими країнами в основному визначається зупинкою поновлення та відновлення основних фондів, в тому числі тягового рухомого складу (ТРС). Це викликає необхідність збереження та продовження працездатності ТРС при паралельному освоєнні виробництва нових видів ТРС промисловістю України.

Державна програма розвитку залізничного транспорту України як один з пріоритетних напрямків передбачає створення магістральних та маневрових тепловозів, а також приміських дизель-поїздів, які багато в чому визначаються якістю енергетичних установок (ЕУ).

На даний час ЕУ, які експлуатуються, не в повній мірі забезпечують вирішення даної проблеми, тому що морально і фізично застаріли. В зв'язку з цим необхідна модернізація існуючих ЕУ або створення нових з підвищеними показниками по потужності, надійності, економічності.

На залізницях у теперішній час експлуатуються ЕУ з дизелями 10Д100М, Д49, 11Д45, 14Д40, М756, ПД1М, 1Д12, К6S310DR, та тільки один з них 10Д100М виробляється в Україні. Це може призвести до великих труднощів під час



модернізації. Тому розбудова ряду потужностей нових ЕУ, який міг би задовольнити всі вимоги до них, включаючи обладнання мікропроцесорними системами регулювання та діагностування, більш доцільна.

Енергетична установка ТРС повинна проектуватися із умов забезпечення ряду визначених кількісних показників (потужності, витрати палива, мастила та інших), які необхідно забезпечувати та контролювати в експлуатації. Для підтримки заданого рівня основних показників ЕУ в експлуатації необхідна методика дослідження їх випадкової зміни та вироблення заходів по забезпеченню їх стабільності. Особлива роль при цьому відводиться прогнозуванню експлуатаційних допусків, тобто зон варіювання параметрів, вихід за які означав би втрату прецедентності ЕУ.

Проте, науково обгрунтованих методів прогнозування та розрахунків експлуатаційних допусків основних параметрів ЕУ на залізничному транспорті недостатньо. Ці методи необхідні і при утворенні нових мікропроцесорних систем управління та автоматизації ЕУ, корегуванні параметрів в процесі створення і регулювання в умовах експлуатації на залізничному транспорті нових ЕУ, розробці нормативних документів до сертифікаційних випробувань ТРС. Сьогодні експлуатаційні допуски в основному регламентуються інструкціями заводу-виробника та правилами ремонту. Крім того, з окремих питань видаються інструктивні вказівки заводів-виробників та технічні вказівки Укрзалізниці. В цьому напрямку

недостатньо проводяться відповідні науково-дослідні роботи.

В зв'язку з модернізацією діючого фізично зношеного парку локомотивів та встановлення експлуатаційних допусків при проектуванні нового тягового рухомого складу рішення науково-технічної проблеми підвищення якості ЕУ в експлуатації шляхом науково обгрунтованого прогнозування допусків на основні параметри є актуальним.

Ціль та основні задачі дослідження. Ціллю даної роботи є розробка теоретичних положень щодо забезпечення якості енергетичних установок тягового рухомого складу в експлуатації шляхом науково обгрунтованого прогнозування допусків на основні параметри.

До основних задач дослідження відносяться:

- аналіз впливу технічного стану, умов експлуатації та допусків на параметри ЕУ та її експлуатаційну якість;

- вибір, обгрунтування та розробка методу прогнозування експлуатаційних допусків на основі перетворення випадкових величин;

- розробка математичної моделі прогнозування меж змінювання енергетичних параметрів в процесі експлуатації ЕУ;

- розробка математичної моделі для прогнозування меж змінювання триботехнічних характеристик в процесі експлуатації ЕУ;

- розробка методик проведення експлуатаційних випробувань ЕУ та стендових випробувань дизель-генераторної установки дизель-поїзда з визначенням меж змінювання основних параметрів в експлуатації;

- проведення експлуатаційних випробувань ЕУ та стендових випробувань дизель-генераторної установки дизель-поїзда з метою підтвердження розрахункових даних.

Характеристика методології, методу дослідження, предмету, об'єкту. В методологічному плані рішення поставлених задач здійснювалось на основі взаємопов'язаних теоретичних розрахункових, експериментальних та розрахунково-експериментальних досліджень, які засновано на використанні методів:

- перетворення випадкових величин;
- математичної статистики для обробки даних, що одержані в процесі експлуатації;
- методики визначення основних параметрів ЕУ, які отримані в результаті експлуатаційних та стендових випробувань;
- моделювання енергетичних та триботехнічних параметрів ЕУ в процесі експлуатації.

Обґрунтування теоретичної та практичної цінності дослідження. Теоретичну цінність мають розроблені теоретичні положення щодо прогнозування експлуатаційних допусків параметрів енергетичної установки тягового рухомого складу на основі перетворення випадкових величин параметрів з

використанням детермінованих значень опорних експериментально-розрахункових даних.

Наукову новизну становлять:

- метод перетворення функцій випадкових величин з використанням детермінованих значень величин;
- математична модель прогнозування меж змінювання енергетичних параметрів в процесі експлуатації ЕУ;
- математична модель прогнозування меж змінювання триботехнічних характеристик в процесі експлуатації ЕУ;
- методика визначення характеристик випадкового процесу при експлуатаційних та стендових випробуваннях;
- узагальнені методики інженерного прогнозування ширини поля допуску параметрів ЕУ в експлуатації;
- якісна та кількісна оцінка надійності.

Практичну цінність мають: програмний комплекс, який дозволяє прогнозувати допуски параметрів ЕУ в експлуатації;

- математичні моделі прогнозування меж змінювання енергетичних та триботехнічних параметрів ЕУ в процесі експлуатації;
- методика визначення характеристик випадкового процесу при експлуатаційних та стендових випробуваннях;
- теоретичне визначення експлуатаційних полів допусків ЕУ, які створюються;
- рекомендації по визначенню рівня деформування та вибору характеристик ЕУ 6ДН12/2\*12 для установки на дизель-поїзд.

Рівень реалізації та впровадження наукових розробок. Запропоновані методики прогнозування використані в Державному підприємстві “завод ім. Малишева” для корегування нормативно-технічної документації при утворенні в Україні ряду тепловозних дизелів Д80, Харківському конструкторському бюро двигунів при визначенні характеристик дефорсованого спеціального транспортного двигуна 6ДН12/2\*12 для встановлення його як основної силової установки на український дизель-поїзд.

За допомогою розроблених методик здійснено регулювання параметрів ЕУ, внаслідок чого одержано зниження експлуатаційних витрат палива на 1,3% та змінності відповідальних вузлів на 7,2% у дослідній партії тепловозів типу 2ТЕ10 в локомотивному депо Основа Південної залізниці.

Апробація та публікація результатів наукового дослідження. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися на Всесоюзній науково-технічній конференції за участю спеціалістів європейських країн “Проблеми підвищення надійності та безпеки технічних засобів залізничного транспорту”, Москва, 1988р.; Всесоюзній науково-технічній конференції “Методи та засоби діагностування технічних засобів залізничного транспорту”, Омськ, 1989р.; Восьмій конференції по проблемам залізничного транспорту “Динаміка, міцність та надійність рухомого складу”, Дніпропетровськ, 1992р.; 50-57 науково-технічних конференціях кафедр ХДАЗТ та

спеціалістів залізничного транспорту, Харків, 1988-1995р.р.; науково-технічних Радах ДП "завод ім. Малишева" та служби локомотивного господарства Південної залізниці. В повному обсязі дисертація доповідалась на науково-методичній Раді завідуючих кафедрами із спеціальності "Локомотиви" залізничних ВНЗ країн СНД, Харків, 1994р., розширеному засіданні кафедри "Експлуатація та ремонт рухомого складу" Харківської державної академії залізничного транспорту, 1996р.

Теоретичні положення дисертації використано при виконанні ряду науково-дослідних робіт, що проведені під керівництвом автора, ввійшли в навчальний посібник "Розрахунки локомотивних енергетичних установок при роботі на експлуатаційних режимах", та ряду методичних вказівок для студентів, які навчаються на кафедрі "ЕРРС" за спеціалізацією "Управління технічною експлуатацією локомотивів", при підготовці навчального плану магістрів.

Результати виконаних досліджень опубліковано в 26 друкованих роботах, з них 19 в наукових видавництвах, в тому числі 6 без співавторів.

#### Структура та обсяг дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновку, списку використаних джерел. Загальний обсяг рукопису складає 360 сторінок, в тому числі 292 сторінки машинописного тексту, 108 рисунків, 32 таблиці, 21 сторінка літератури з переліком використаних джерел з 246 найменувань.

Особистий внесок у розробку результатів, що вносяться на захист. У ході виконання роботи особисто автором отримано наступні наукові результати, що вносяться на захист:

- теоретичні положення з прогнозування експлуатаційних допусків ЕУ ТРС на основі перетворення випадкових величин параметрів з використанням детермінованих залежностей опорних експериментально-розрахункових даних;

- математична модель прогнозування меж змінювання енергетичних параметрів в процесі експлуатації ЕУ;

- математична модель для прогнозування меж змінювання триботехнічних характеристик в процесі експлуатації ЕУ;

- методика визначення характеристик випадкового процесу при експлуатаційних та стендових випробуваннях;

- узагальнені методики інженерного прогнозування полів допусків параметрів ЕУ в експлуатації.

Загальний зміст роботи. У вступній частині подана загальна характеристика роботи, поставлено задачі та цілі дослідження, показано актуальність та новизна теми, сформульовано основні напрямки розв'язання проблеми підвищення якості ЕУ в експлуатації.

Перший розділ вміщує аналіз впливу експлуатаційних факторів на показники роботи ЕУ.

Узагальнення досліджень роботи енергетичної установки в умовах експлуатації (в різних кліматичних регіонах, з різною масою потягів та профілем колії),

зв'язаних з наробкою від побудови чи попереднього ремонту, виконаних О.І. Володіним, А.П. Кудряшом, Т.Ф. Кузнецовим, С.С. Коссовим, І.К. Колесником, В.І. Морозом, Е.С. Павловичем, А.Е. Сімсоном, В.В. Стрекопитовим, Е.Д. Тартаковським, В.А. Федорцем, Г.А. Фофановим, Н.А. Фуфрянським, А.З. Хомічем, В.О. Четверговим, а також під керівництвом В.М. Зайончковського, В.М. Кашникова, Ю.А. Кулікова, В.Д. Кузьмича, М.К. Рязанцева, А.Ф. Шеховцова, М.К. Шокотова та ін. і особисті дослідження автора дозволяють зробити висновок про значний інтервал змінювання параметрів ЕУ в експлуатації порівняно з паспортними даними заводу-виробника.

Основні властивості локомотива проявляються в реальних умовах експлуатації, технічного обслуговування та ремонту. В результаті дії експлуатаційних та конструктивно-виробничих факторів характеристики елементів змінюються, викликаючи деяке зниження показників якості функціонування локомотива. Зазнаючи деяким чином взаємовпливу між собою, ці фактори здібні суттєво змінювати надійність та економічність локомотива, як правило в гіршу сторону.

Велика кількість різних факторів та їх стохастичний харктер дії приводить до того, що локомотиви однієї наробки, які знаходяться в однакових умовах експлуатації, мають різні експлуатаційні показники. Так, наприклад, за даними О.І. Володіна, В.А. Четвергова та ін. межа змінювання вірогідних експлуатаційних характеристик

важливого показника, питомої ефективної витрати палива, локомотивів різних серій протягом року для однакових умов та різних режимів складає для пасажирських локомотивів 11-14%, грузових 14-17%.

Відомо, що витрата палива на вимірник роботи залежить від маси потягу, типу вагонів, профілю колії, кліматичних умов, стану локомотива, графіку руху та інших факторів.

На експлуатаційні показники ЕУ та локомотива в цілому впливають кліматичні умови при експлуатації, час роботи ЕУ на часткових режимах та холостому ході. За даними досліджень ХДАЗТу та служб локомотивного господарства в різних депо Південної, Південно-Західної, Донецької та інших доріг України, ВНДІЗТу, МПТу, РПТу, ОМПТу, ДП "Завод ім. Малишева" та ін. час роботи ЕУ для більшості режимів в експлуатації складає 45%, на холостому ході ЕУ працює біля 50% всього часу і близько 5% на номінальному режимі.

В процесі експлуатації локомотивів їх параметри постійно змінюються. Це зв'язано з посиленням процесу зношення деталей, який приводить поступово до виробки ресурса складальних одиниць та підсистем ЕУ.

В таких випадках відбувається значне погіршення основних параметрів ЕУ, під якими розуміються показники, які визначають режим роботи ЕУ, звичайно ними являються потужність, частота обертання колінчастого валу, витрата палива за цикл. Ці параметри можуть виражатися аналітично або визначатися експериментально.

Під номінальним значенням параметра  $P$  розглядається його кількісна міра, встановлена в нормативно-технічній документації ЕУ. Гранічний параметр встановлюється при забезпеченні максимальної ефективності ЕУ за визначений період. При досягненні граничного значення параметра подальша експлуатація ЕУ недопустима. Інтервал між верхнім та нижнім граничними значеннями параметра може розглядатися як експлуатаційний допуск.

Питання допусків, їх призначення та розрахунки найбільш повно розроблені в області машино-приладобудування, де розрахунки допусків вже давно стали невід'ємною частиною технології машинобудування, деталей машин і механізмів, а проблема допусків взагалі - предметом глибоких теоретичних та експериментальних досліджень. Проте, для енергетичних установок тягового рухомого складу залізниць ці питання досліджувались недостатньо, особливо при вивченні експлуатаційних режимів, і не одержали достатнього розвитку НДР в цьому напрямку.

В роботі багато положень базуються на досягненнях теорії допусків в області машино-приладобудуванні з урахуванням специфіки параметрів енергетичної установки тягового рухомого складу і основна увага приділяється питанням оцінки та встановлення експлуатаційних допусків ЕУ.

*В другому розділі* розглядаються теоретичні основи прогнозування експлуатаційних допусків ЕУ.

На різних стадіях експлуатації на ЕУ ТРС діють різні фактори. А тому відхилення вихідних параметрів від їх номінальних значень може бути різним. Враховуючи те, що робота ЕУ характеризується різними за своєю природою показниками (механічними, теплотехнічними, теплофізичними, електромеханічними, хімічними, економічними та іншими), всі вихідні параметри можна умовно розподілити на групи.

До першої групи віднесені вихідні показники  $\mathcal{U}_1$  ( $n_{дв}$ ,  $n_{тк}$ ,  $P_{м}$ ,  $P_{з}$ ,  $P_{ц}$ ,  $t_{в.вих}$ ,  $t_{м.вих}$ ,  $t_s$ ,  $t_{ц}$ ,  $t_r$ ), величина яких безпосередньо визначається та контролюється в умовах експлуатації. Допуски цих показників визначаються на основі забезпечення нормального функціонування ЕУ.

До другої групи віднесені вихідні показники  $\mathcal{U}_2$  ( $\eta_i$ ,  $\eta_e$ ,  $\eta_m$ ,  $N_i$ ,  $P_e$ ,  $P_i$ ), які характеризують якість роботи ЕУ, але величини яких в експлуатації безпосередньо не контролюються і визначаються за допомогою моделювання.

До третьої групи відносяться вихідні показники  $\mathcal{U}_3$  ( $N_e$ ,  $V_c$ ,  $g_e$ ,  $V_c$ ), які безпосередньо не контролюються, а можуть визначатися в експлуатації шляхом математичного опрацювання прямих замірів параметрів першої групи.

Варіюючи величиною значення параметра  $\Pi$  можна визначити (які відрізняються від  $\Pi_n$ ) деякі критичні значення  $\Pi_{кр}^в$  (верхнє) та  $\Pi_{кр}^н$  (нижнє) параметра  $\Pi$ , в межах яких нормально функціонує ЕУ.

Експлуатаційне значення параметра  $\Pi$  в силу своєї випадкової зміни може займати в полі допуску різні положення відносно його номінального значення ( $\Pi_n$ ).

Для визначення закону розподілення відхилень вихідного параметра та встановлення допусків на елементи регулювання ЕУ локомотивів Стрекопитов В.В. використовував метод полосного направленого графа системи, аналогічно системі полосних лінійних рівнянь, які виражають фізичні властивості елементів системи.

В теоретичних працях Володіна О.І. застосовується інформаційно-кібернетична модель, в якій система технічного обслуговування та ремонту на залізничному транспорті служить об'єднаним регулятором, встановленим в зворотній зв'язок процесу формування якості функціонування тепловоза в експлуатації. Доцільність подальшої експлуатації тепловоза, з точки зору виходу параметра за межі допуску, визначається одномірним часовим рядом, опис динаміки якого дозволяє прогнозувати його майбутнє значення.

Деякі інженерні способи оцінки та встановлення експлуатаційних допусків в радіоелектроніці Михайлов А.В. розглядає на основі критеріїв надійності. Методика розроблена на базі теорії ймовірностей, допуски визначаються експериментально і завданням методики являє забезпечення ймовірності попадання параметра, як випадкової величини, яка підпорядкована нормальному закону розподілення, в задані межі допуску.

Якість роботи авіаційного обладнання Воробйов В.Г., Синдеев И.М., Константинов В.Д., Денисов В.Г., розглядають з точки зору прогнозу якості їх статистичних та динамічних вихідних характеристик, які визначаються шириною поля допуску та значеннями відповідних характеристик. Математичними основами прогнозування являються апарат чисельного аналізу та теорія випадкових функцій з застосуванням статистичних досліджень параметрів відповідних об'єктів.

Як методика Ждановським Н.С., Артем'євим Ю.Н., Говорущенком Н.Я., прийнятий метод кількісної оцінки режимів роботи автомобіля та його механізмів методом кореляційного аналізу. Задача методу зводиться до накопичення експериментальних даних для статистичного корегування довговічності автомобіля.

Васильев Б.В., Ханін С.М., Гиттіс В.Ю. та інші для дослідження роботи морських двигунів на експлуатаційних режимах застосовували ймовірно-статистичні моделі процесів навантаження.

При призначенні допусків на параметри ЕУ в процесі експлуатації для першої групи параметрів можна скористатися аналітичними розрахунками, дослідними даними, які були отримані в процесі випробувань, або використати одну з перерахованих вище методик або моделей. Для прогнозування параметрів другої та третьої групи необхідна математична модель, яка описує взаємозв'язок випадкових функцій розподілення цих параметрів в експлуатації та зв'язок їх з детермінованими

залежностями, які визначаються моделюванням процесів ЕУ або дослідним шляхом. В зв'язку з цим в роботі розроблена модель розрахунків експлуатаційних допусків, яка охоплює всі групи параметрів.

Оснoву розробленої моделі складає метод перетворення випадкових величин, який дозволяє визначити будь яку випадкову функцію розподілення параметра (X) ЕУ в експлуатації шляхом перетворення другої, зв'язаної з нею, випадкової функції розподілення параметра (Y) з використанням детермінованих залежностей між цими функціями  $x=f(y)$  або  $y=f(x)$ .

Модель забезпечує рішення задачі в прямій та оберненій постановці. При відомій щільності розподілення параметрів X або Y та існуючій детермінованій залежності поміж ними  $x=f(y)$  або  $y=f(x)$  модель дозволяє визначити щільність розподілення параметрів X або Y, відповідно. В оберненій постановці задача вирішується визначенням детермінованих залежностей між параметрами  $x=f(y)$  або  $y=f(x)$  при відомій щільності розподілення параметрів X та Y.

Розв'язання задачі зводиться до знаходження щільності ймовірності  $g(y)$  випадкової величини Y, при відомій щільності  $f(x)$

$$dy = \left| \frac{dy}{dx} \right| dx \quad \text{або} \quad dx = \left| \frac{dx}{dy} \right| dy$$

Зв'язок між щільностями ймовірностей визначається співвідношенням:

$$g(y) = \left| \frac{dx}{dy} \right| f(x)$$

При наявності детермінованих даних задача прогнозування допусків зводиться до знаходження для прогнозованого періоду функції, яка визначає характер зміни контролюючого параметру в експлуатації. В даній роботі така функція представлена у вигляді інтерполяційної формули Лагранжа.

Із багаторічного досвіду експлуатації локомотивів на залізницях країн СНД та практики проведення тягово-теплотехнічних випробувань з динамометричним вагоном, де проводилась безперервна, в межах дільниці обертання, реєстрація параметрів ЕУ, відомо, що зміна або коливання параметрів в експлуатації, також як і поява відмов, має випадковий характер. Разом з тим, будь-яка реалізація параметрів, як випадкових функціоналів, має відхилення від середньої величини. Тому для прогнозування значень контрольованих параметрів необхідно розглядати ймовірнісну задачу.

Дослідження, проведені ВНДІЗТом, ОмІПТом, ХІПТом, та ін. показали, що розсіювання при великій кількості реалізацій випадкових величин параметрів ЕУ достатньо близько відповідає нормальному закону розподілення, що знайшло додаткове підтвердження і в здобутках, отриманих автором цієї роботи при багаторазових дослідженнях ЕУ в експлуатації.

При сталому математичному сподіванні  $M\pi$  та змінним в часі середнім квадратичним відхиленням  $\sigma\pi$ , щільність ймовірності контрольованого параметру має вигляд

$$f(\pi, \ell) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\pi}(\ell)} e^{-\frac{1}{2} \left[ \frac{\pi - m_{\pi}}{\sigma_{\pi}(\ell)} \right]^2},$$

поле допусків при цьому симетрично відносно математичного сподівання, а саме значення допуску параметра в експлуатації може бути знайдено по формулі

$$\pi = \Phi^{-1} \left[ \Phi \frac{\pi - m_{\pi}}{\sigma_{\pi}(\ell) \sqrt{2}} - 2Q \right] \sigma_{\pi}(\ell) \sqrt{2} + m_{\pi},$$

де  $\Phi^{-1}$  - символ оберненої функції Лапласа, аргументом якої являється ймовірність  $P(\ell)$ ;  $\ell$  - пробіг ЕУ до першого профілактичного контролю із умов заданої максимальної допустимої ймовірності відказу,  $Q$  - ймовірність відказу ЕУ за час першого та наступного міжконтрольного періоду.

При цьому ймовірність того, що прогнозоване значення параметра в експлуатації знаходиться в заданому інтервалі можна оцінити формулою

$$P_{\text{вих}}(\pi^{\text{в}}, \pi^{\text{н}}) = \frac{1}{2} \left[ \Phi \left( \frac{\pi^{\text{н}} + \Delta C + \Psi - m_{\pi}}{\sigma_{\pi} \sqrt{2}} \right) - \Phi \left( \frac{\pi^{\text{в}} + \Delta C - \Psi - m_{\pi}}{\sigma_{\pi} \sqrt{2}} \right) \right],$$

де  $\Phi$  - функція Лапласа;  $\pi^{\text{в}}$  та  $\pi^{\text{н}}$  - значення верхньої та нижньої межі параметра відповідно;  $\Delta C$  - координата середини поля допуску відносно номінального значення параметра  $m_{\pi}$ ;  $\Psi$  - половина поля допуску параметра.

Зміна в процесі експлуатації технічного стану ЕУ являється наслідком зношення її елементів, збільшення накопичення пошкоджень у вузлах та деталях, погіршення якості робочого процесу. Якість роботи ЕУ залежить від значень параметрів, які визначають режим її роботи в експлуатації, і які визначаються їх полем допусків. Для визначення поля допусків запропоновані математичні

моделі прогнозування значень енергетичних параметрів та триботехнічних характеристик ЕУ в експлуатації.

В основу моделі прогнозування значень енергетичних параметрів ЕУ на номінальному режимі покладені моделі визначення індикаторних та ефективних параметрів доповнені та уточнені Е.К. Мазінгом, Д.А. Іноземцевим, А.С. Орліним, Н.М. Глаголевим, Н.К. Шокотовим, Н.Ф. Розлейцевим, А.Е. Сімсоном, С.Є. Коссовим, І.К. Колесніком та іншими.

Процеси на дільниці стиску, згоряння та розширення газів в циліндрі описуються на основі законів збереження енергії та маси, узагальнених на випадок змінної за величиною та хімічним складом маси робочого тіла та рівняння стану газу

$$\frac{dP_u}{d\varphi} = \frac{R}{c_v V_u} \left[ \frac{dQ_T}{d\varphi} - \frac{dQ_w}{d\varphi} - \frac{dQ_{дис}}{d\varphi} + \frac{dQ_{тр}}{d\varphi} - \left(1 - \frac{C_v}{R}\right) \times \right. \\ \left. \times P_u \frac{dV_u}{d\varphi} - l_u \frac{dm_{уг}}{d\varphi} \right] - P_u \left( \frac{1}{c_v} \frac{dC_v}{d\varphi} - \frac{1}{R} \frac{dR}{d\varphi} \right) \\ \frac{dT_u}{d\varphi} = \frac{1}{c_v m_u} \left[ \frac{dQ_T}{d\varphi} - \frac{dQ_w}{d\varphi} - \frac{dQ_{вип}}{d\varphi} + \frac{dQ_{тр}}{d\varphi} - \frac{dQ_{дис}}{d\varphi} - \right. \\ \left. - P_u \frac{dV_u}{d\varphi} - m_u T_u \frac{dC_v}{d\varphi} \right],$$

де:  $P_u, T_u$  - тиск і температура в циліндрі;  $Q_T$  - тепло, яке виділилося від згоряння палива;  $Q_w$  - тепло, віддане в систему охолодження;  $Q_{вип}$  - тепло, витрачене на підігрів та випарування палива;  $Q_{дис}$  - тепло, витрачене на дисоціацію продуктів згоряння;  $Q_{тр}$  - тепло, яке виділилося в результаті тертя поршня об втулку циліндра;  $V_u$  - об'єм циліндра;  $R$  - газова стала;  $m_{уг}$  - перетікання робочого тіла

через нещільність циліндро-поршневої групи;  $M_c$  - кількість робочого тіла в циліндрі;  $C_v$  - теплоємність робочого тіла;  $\varphi$  - кут обертання колінчастого валу.

Зміна теплофізичних властивостей змащувального мастила внаслідок додаткового підвищення температури від тертя в зонах контакту рухомих вузлів ЕУ може привести до значного зменшення товщини масляної плівки або її розриву. Враховуючи це, особливістю даної моделі являється врахування кількості тепла, яке виділяється при терті поршня о втулку циліндра, яку пропонується визначати із співвідношення

$$\frac{dQ_{TP}}{d\varphi} = \frac{11,72 V_h n_{дв}}{\tau} \left[ \frac{K_2 P \left( \frac{d-2b}{d} \right) + P_y - f_1 (K_1 P - P_a)}{1 - f_1 f_2} + \frac{2NE_n}{d_1 \ell_1} \right],$$

де  $V_h$  - робочий об'єм циліндра;  $n_{дв}$  - частота обертання колінвалу ЕУ;  $\tau$  - тактність;  $P$  - тиск газів в циліндрі;  $P_y$  - тиск від сил пружності кільця;  $P_j$  - тиск від сил інерції зворотньо-поступального руху мас;  $d$  - зовнішній діаметр поршневого кільця;  $b$  - радіальна товщина поршневого кільця;  $K_1$  - коефіцієнт, який враховує тиск газів в закільцевому просторі;  $K_2$  - коефіцієнт, який враховує тиск газів в надкільцевому просторі;  $f_1$  - коефіцієнт тертя між кільцем та поршнем;  $f_2$  - коефіцієнт тертя між кільцем та втулкою;  $N$  - потужність циліндра;  $F_n$  - площа поршня;  $d_1$  - середній діаметр юбки;  $\ell_1$  - робоча довжина поршня.

В основі розрахунків параметрів ЕУ на часткових (неномінальних) режимах в процесі експлуатації в дисертаційній роботі використовуються числові значення

параметрів на номінальному режимі. Як вихідний приймався закон зміни тиску наддуву  $P_s$  від ефективної потужності  $N_e$ , яка по тепловозній характеристиці однозначно залежить від частоти обертання колінвалу ЕУ. Характер зв'язку між  $P_s$  та  $N_e$  являє собою емпіричну залежність, яка отримана автором в результаті численних випробувань ЕУ з дизелями ПД1М, 10Д100, 14Д40 в процесі експлуатаційних і стендових випробувань на залізницях країн СНД, ДП "завод ім. Малишева" та інших:

$$P_s = \frac{1 + 10 P_s^n}{10K},$$

де  $P_s^n$  - тиск наддува на номінальному режимі;  $K$  - коефіцієнт зменшення потужності ЕУ на часткових режимах відносно номінальної.

За основу математичної моделі визначення полів допусків параметрів в вузлах сполучення ЕУ (поршень-втулка циліндра; колінчастий вал-корінні та шатунні підшипники сковзання, розподільчий вал-підшипники сковзання та ін.) від тертя прийнята система рівнянь гідродинаміки в вигляді рівнянь неперервності та руху, представлених в наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} &= \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} &= 0 \\ \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\},$$

де  $u_x, u_z$  - компоненти вектора швидкості мастила;  $\rho$  - щільність мастила;  $p$  - тиск мастила в зазорі.

Визначення поля допуску параметрів тертя поршень-втулка циліндра зводиться до розв'язання трьох незалежних

рівнянь системи методом кінцевих різниць з використанням методу прогонки.

При експлуатації ЕУ в результаті тертя відбувається зношення деталей циліндро-поршнєвої групи, оскільки при цьому збільшується витік робочого тіла із циліндрів через зазори між ущільнюючими кільцями та втулкою циліндру, це приводить до змінення індикаторних та ефективних параметрів.

Дослідження проведені ХІПТом, ВНДІЗТом та іншими показали, що зміна величини зазору функціонально пов'язана із зміною товщини змащувального шару між кільцем та втулкою циліндра. Для прогнозування поля допуску зазора в експлуатації в дисертації обґрунтована доцільність використання оціночного показника даного сполучення товщини змащувального шару, яку можна визначити із системи диференційних рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \frac{dC_k}{d\varphi} &= \frac{1}{6n_{\Delta\omega}} \left[ \frac{P_{i+1} + P_i}{2} - P_y - \mu \frac{\pi^4 h^2}{96 h_{min}^3} \left( C_k - \frac{C_n}{2} \cdot \frac{h_m}{2} \right) \right] \\ \frac{dh_m}{d\varphi} &= \frac{C_k}{6n_{\Delta\omega}} \end{aligned} \right\}$$

де  $C_n$  - швидкість поршня;  $C_k$  - швидкість радіального переміщення кільця;  $n_{\Delta\omega}$  - частота обертання колінчастого валу;  $\mu$  - вязкість мастила;  $P$ ,  $P_{i+1}$  - тиск газів в підколечному та надколечному об'ємі;  $h$  - висота кільця;  $P_y$  - тиск від сили пружності кільця;  $h_m$  - товщина масляного шару;  $h_{min}$  - мінімальна товщина змащувального шару за робочий цикл.

Ширина поля допуску триботехнічних показників сполучення колінчастий вал - підшипник визначалась із

рівняння Рейнольдса, яке стосовно циліндричного нестационарно навантаженого підшипника записується в наступному вигляді

$$\frac{\partial^2 p}{\partial \varphi^2} + R^2 \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - 3 \frac{\varepsilon_0 \sin \varphi}{1 + \varepsilon_0 \cos \varphi} \cdot \frac{\partial p}{\partial \varphi} = -6 \frac{\mu_p}{S_0} \times \\ \times \frac{\varepsilon_0 \sin \varphi}{(1 + \varepsilon_0 \cos \varphi)^3} W_{\dot{\varphi}} + 12 \frac{\mu_p}{S_0} \cdot \frac{\cos \varphi}{(1 + \varepsilon_0 \cos \varphi)^3} \cdot \frac{d\varepsilon_0}{d\tau},$$

де  $R$  - радіус підшипника;  $\varepsilon_0$  - відносний ексцентриситет валу підшипника;  $\mu_p$  - вязкість мастила;  $S_0$  - відносний зазор між валом та підшипником;  $W_{\dot{\varphi}}$  - еквівалентна кутова частота обертання;  $p$  - гідродинамічний тиск;  $\varphi$  - кут від лінії центрів по колу підшипників до лінії прикладання підтримуючої сили.

Оцінка працездатності нестационарно навантаженого підшипника визначалася шириною поля допусків товщини масляного шару в вигляді безрозмірної величини  $\Delta h_{кр}$

$$\Delta h_{кр} = \frac{dh_{кр}}{180i},$$

де  $h_{кр}$  - критична товщина змащувального шару, яка відповідає початку навантаження при рідинному терті,  $dh_{кр}$  - сумарний кут обертання колінвалу протягом циклу навантаження, при якому товщина масляного шару мінімальна;  $180i$  - кут обертання колінчастого валу, відповідно тривалості циклу навантаження.

Особливістю даної моделі являється врахування жорсткості поверхні сполучення

$$\Delta h_{кр} = \frac{dh_{кр} - [0,25\Delta(1,14 + 2\lg \frac{\Delta}{h_{ш}})^2]^{-1}}{180i},$$

де  $i$  - тактність;  $\Delta$  - радіальний зазор між валом і підшипником;  $h_{ш}$  - абсолютна величина виступів жорсткості.

Третій розділ вміщує розрахункові дослідження прогнозування полів допусків параметрів ЕУ в експлуатації. ЕУ ТРС в процесі експлуатації працюють в широкому діапазоні зміни швидкісного режиму і потужності. Межі цих діапазонів визначаються допустимими умовами роботи ЕУ. Інтервал можливих швидкісних та навантажувальних режимів обмежується різними факторами. Максимальний допустимий швидкісний та навантажувальний режими обмежуються, наприклад, тепловою та механічною напрутою деталей ЕУ, умовами протікання робочого процесу та сумісної роботи компресора, газової турбіни і поршневої частини та іншими факторами. Мінімальний допустимий швидкісний та навантажувальний режими визначаються умовами сталої роботи ЕУ, тепловою напрутою деталей та ін.

За даними досліджень, проведених ВНДІЗТом, ВНДТі, ХарДАЗТом та іншими ВНЗ країн СНД, а також локомотивними службами Південної, Донецької, Південно-Західної залізниць та ін. робота ЕУ в експлуатації на часткових режимах (45-90% номінальної потужності) досягає 45-50% часу роботи під навантаженням.

Визначення інтервалів зміни параметрів ЕУ в експлуатації проводилось з використанням моделі прогнозування полів допусків енергетичних параметрів, наведеної в другому розділі даної роботи. Розрахунки проводились на кожній позиції контролера машиніста за навантажувальними характеристиками. За розрахунковими даними визначені межі найбільшого та найменшого

допустимих значень параметрів при роботі ЕУ на часткових режимах та тепловозній характеристиці.

На номінальному режимі верхня межа допустимих значень параметрів ЕУ збігається з тепловозною характеристикою. При роботі на часткових режимах з більш низькими частотами обертання рівень верхньої межі допустимих значень параметрів дещо підвищується відносно тепловозної характеристики. При зменшенні частоти обертання в порівнянні з номінальною на 20%, допустимі значення параметрів збільшуються: ефективної потужності на 15%, температури випускних газів на 20%, максимального тиску згоряння на 12%, питомої ефективної витрати палива на 3%.

При подальшому зниженні частоти обертання тенденція зміни значень параметрів ЕУ за тепловозною характеристикою та верхньою межею допустимих значень зберігається, а інтервал між цими значеннями збільшується.

Методика визначення параметрів по нижній (по відношенню до тепловозної) обмежувальній характеристиці така, як і для верхньої. Із зниженням частоти обертання та потужності різко погіршується сумішоутворення та згоряння, збільшується сажоутворення, відбувається закоксування випускних органів та газової турбіни, погіршується тепловіддача від нагрітих частин камери згоряння в воду і мастило, відбувається перегрів деталей циліндро-поршньової групи ЕУ, робота якої при цьому практично стає неможливою.

По розрахунковим даним визначено поле експлуатаційних допусків параметрів ЕУ 10ДН20,7/2\*25,4, 16ЧН26/27, 6ДН12/2\*12 (рисунок 1). Наприклад, для ЕУ 10ДН20,7/2\*25,4 поле робочих режимів обмежується зверху потужністю  $0,06-1,0 \bar{M}_e$  і знизу  $0,04-0,45 \bar{M}_e$  від номінальної (рисунок 3).

Розроблена модель дозволила провести розрахункові дослідження енергетичних параметрів деформованого двигуна 6ДН12/2\*12, прийнятого як основну силову установку на новий український дизель-поїзд з електричною передачею.

Для кожної частоти обертання по позиціям контролера машиніста були побудовані навантажувальні характеристики, аналіз зміни показників яких дозволив вибрати генераторну характеристику, поле робочих режимів та визначити обмежувальні параметри.

По розрахованій генераторній характеристиці потужність на номінальному режимі при 2200 об/хв складає 590 кВт, із зниженням частоти обертання до 800 об/хв потужність зменшується і на першій позиції контролера машиніста складає 12кВт. Питома ефективна витрата палива при цьому збільшується з 224 г/кВтг до 280 г/кВтг. Щодо верхньої межі допустимих значень ефективної потужності ЕУ, то вона визначається значеннями з  $1,0 \bar{M}_e$  на номінальному режимі до  $0,125 \bar{M}_e$  на першій позиції контролера машиніста, нижня відповідно з  $0,3 \bar{M}_e$  до  $0,03 \bar{M}_e$ .

Прогнозування полів допусків триботехнічних характеристик вузлів тертя зокрема підшипників ковзання

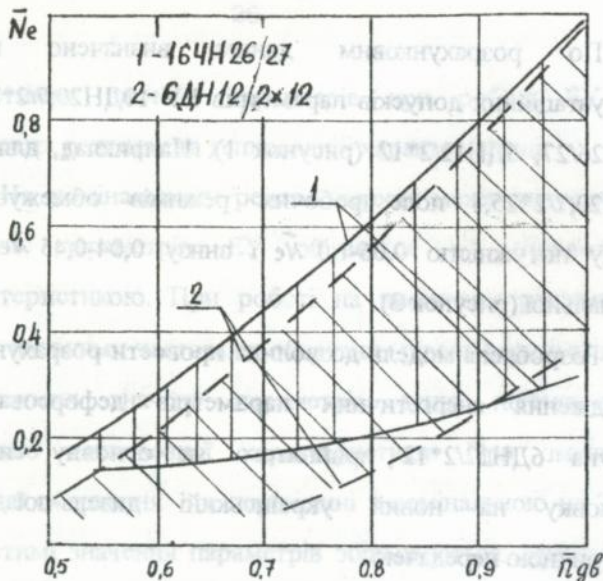


Рисунок 1 - Експлуатаційні допуски потужності ЕУ, що прогнозуються

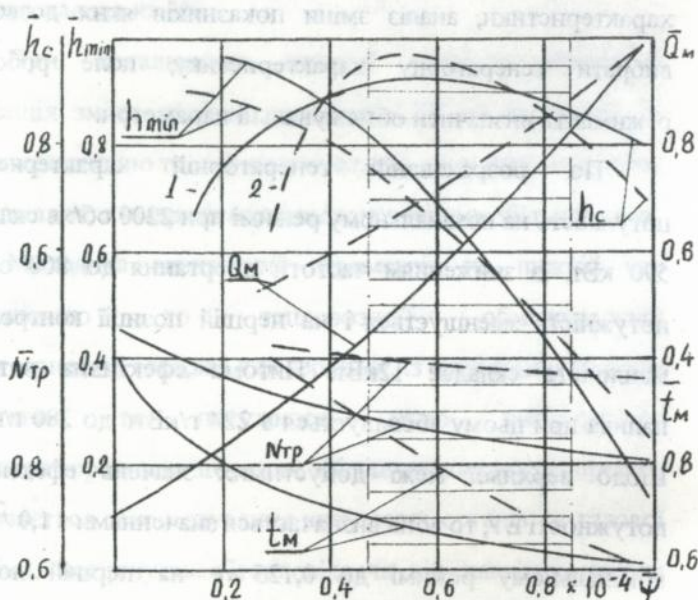


Рисунок 2 - Експлуатаційні допуски показників роботи підшипників колінчастого валу ЕУ, що прогнозуються: 1-164H26/26; 2-64H12/2x12.

колінчастого валу ЕУ проводилось з використанням моделі приведеної в другому розділі цієї роботи.

Умови роботи підшипників при різних швидкісних та навантажувальних режимах, різних температурах мастила на вході в ЕУ та граничних зазорах дозволяють оцінити експлуатаційні якості цих вузлів. Для отримання достатньо повних відомостей про ці умови розрахунковим шляхом визначались найменші за цикл навантаження товщини змащувального шару при різних температурах мастила на вході в ЕУ і зазорах - від установочного до гранично допустимого. Результати розрахунків корінних підшипників колінвала ЕУ 6ДН12/2\*12 та шатунних 16ЧН26/27 приведені на рисунку 2.

По розрахованим триботехнічним показникам зміни товщини змащувального шару (з 8,5 до 6,0 мкм для 6ДН12/2\*12 і з 11,0 до 8,5 мкм для 16ЧН26/27) визначені межі зміни зазору  $\Psi$ , віднесеного до діаметра валу, між шийкою колінчастого валу та підшипником в експлуатації. Для ЕУ 6ДН12/2\*12  $\Psi = (11-13) \cdot 10^{-4}$  мм, для 16ЧН26/27 -  $\Psi = (17-25) \cdot 10^{-4}$  мм.

Додатково слід врахувати, що зниження вихідної вязкості масла на 25-30% зменшує мінімальну товщину змащувального шару на 20-25%.

Четвертий розділ вміщує методики проведення експериментальних досліджень з визначенням меж зміни основних параметрів ЕУ в експлуатації та результати їх опрацювання.

Прогнозування експлуатаційних допусків параметрів ЕУ ґрунтується на перетворенні випадкових величин з використанням детермінованих значень опорних експериментально-розрахункових даних.

Як вже відмічалось раніше, в силу різних об'єктивних та суб'єктивних обставин зміна параметрів ЕУ в процесі експлуатації носить випадковий характер. Ймовірний аналіз зміни параметрів як випадкових процесів, особливості їх математичного опису та визначення статистичних властивостей і характеристик заснований на відомих законах розподілення значень параметрів, які визначаються в результаті опрацювання і аналізу статистичних даних, отриманих в процесі експериментальних досліджень.

Випробовування, проведені ДП "Завод ім. Малішева" разом з Південною залізницею та ХарДАЗТом локомотивів серії 2ТЕ10Л (В, М) з енергетичною установкою 10Д100 ставили за мету визначення меж зміни основних параметрів ЕУ в експлуатації як по ансамблю реалізацій в фіксований момент часу, так і по часу пробігу локомотива; підтвердження розрахункових досліджень проведених по розробленим моделям і методикам. Порівняльний аналіз розрахункових і експериментальних даних приведений на рисунку 3.

При проведенні випробувань по запропонованій методиці виникла необхідність в додатковому оснащенні динамометричного вагону контрольно-вимірювальними приладами та обладнанням.

Для реєстрації додаткових параметрів ЕУ (потужності, частоти обертання колінвалу та ротора турбокомпресора, температури і тиску наддувочного повітря та випускних газів, максимального тиску згоряння і температури випускних газів по циліндрам, температури охолоджуючої води та мастила і т.д.) енергетична установка крім штатних була оснащена розробленими датчиками для реєстрації частоти обертання ротора турбокомпресора, виходу рейки паливних насосів, тиску в циліндрі, а в динамометричному вагоні додатково встановлювались самопишучі прилади та осцилографи. Показники приладів реєструвались безперервно протягом реалізації з записом на фотоплівку та стрічку динамометричного столу.

Витрата дизельного палива визначалась і безперервно реєструвалась лічильником витрати палива типу ПР 1995.01, виготовленим в ПКБ ЦТ МШС. Розміри дозуючого обладнання вибрані таким чином, що за повний хід поршня із нього витісняється 1 кг палива. Корегування ваги автоматично проводилось в залежності від щільності та температури палива.

Використання динамометричного вагону для випробувань ЕУ дизель-поїзда недоцільно в зв'язку з існуючим впливом його характеристик (маси, опору руху і т.і.) на тягові характеристики дизель-поїзда, що привело б до перекручування результатів випробувань.

Для випробування дизель-поїзда запропонована методика припускає в процесі експлуатації визначення кількісних показників (частоти обертання колінчастого валу

ЕУ, числа включень позицій контролера машиніста, часу роботи на кожній позиції контролера за одне включення та сумарне і т.і.), які характеризують експлуатаційний режим та ступінь використання основних агрегатів, а прилади для їх реєстрації являються достатньо прості і компактні.

Потрібні для реєстрації кількісних показників прилади в вигляді лічильників складаються із приладів формувально-обмежувачих вхідних сигналів, амплітудних обмежувачів, діодно-релейного дешифратора, лічильників мотогодин з відсічними обладнаннями, індикатора стану дешифратора та перетворювача і стабілізатора напруги.

Розроблена методика прогнозування експлуатаційних параметрів ЕУ припускає використання детермінованих залежностей основних параметрів. Такі залежності можна отримати аналітично за допомогою запропонованих методик або при випробуваннях ЕУ. Для отримання детермінованих залежностей параметрів і уточнення розрахункових досліджень на кафедрі ЕРРС ХарДАЗТу під керівництвом автора створений спеціальний випробувальний стенд.

Стенд являє складну установку для випробування транспортного двигуна 6ДН12/2\*12, призначеного для установки його як головного на новий дизель-поїзд для залізниць України.

Аналіз осцилограм зміни параметрів ЕУ в процесі експлуатації показує, що форма кривої зміни параметрів (потужності  $N_e$ , частоти обертання колінвала пдв, питомої

ефективної витрати палива  $g_e$ , та ін.) в залежності від часу руху зазнає суттєві зміни.

Миттєві значення параметрів випадковим чином змінюються як за величиною, так і за частотою повторення їх в залежності від поточного часу. Очевидно, елементи випадковості виникають із-за неоднорідності профілю путі, кількісних і якісних характеристик потягу, випадкового характеру зміни атмосферних умов, випадкових змін в системах ЕУ та інші.

Приймаючи гіпотезу про стаціонарність та ергодичність квазістаціонарних в загальних випадках процесів зміни показників ЕУ, параметри їх розподілу протягом часу визначались по ансамблям реалізацій їздок на заданому тяговому плечі для однотипних локомотивів за декілька років експлуатації. Проведені розрахунки показали, що виборки складені по ансамблям, відносяться до одних генеральних сукупностей, відповідних локомотивам даного типу, а їх оптимальний статистичний обсяг не повинен бути менше за 8...10 реалізацій. Для отримання достатньо представницьких результатів обсяг виборки по кожному із типів локомотивів прийнято в межах від 12 до 20 реалізацій.

Аналіз отриманого статистичного матеріалу дозволив зробити висновок, що емпіричний розподіл параметрів ЕУ за часом з достатньою для практики точністю апроксимується нормальним законом розподілу.

Випадковий процес з відповідним наближенням можливо описати, вказавши сумісний  $(n$ -мірний) закон

розподілу імовірностей для  $n$  його перерізів з урахуванням зв'язків між випадковими величинами в різних перерізах. Проте на практиці визначення  $n$ -мірного імовірного закону випадкового процесу являє собою надзвичайно складну задачу. Замість  $n$ -мірного закону в дослідженні використовувались відносно прості характеристики випадкового процесу, якими являються математичне сподівання, дисперсія та кореляційна функція, які виражають відповідні співвідношення між окремими випадковими елементами процесу і характеризують сукупність, що вивчається.

При наявності необхідної кількості реалізацій випадкового процесу, особливістю математичного підходу є розгляд послідовності перерізів ансамблю реалізацій, взятих при фіксованих значеннях часу. Користуючись відомими із математичної статистики методами, визначались у кожному із цих перерізів середнє значення та дисперсія випадкових величин параметрів енергетичної установки.

Безперервна послідовність обчислених таким чином і розташованих в порядку зростання часу руху величин може розглядатися як математичне сподівання та дисперсія випадкового процесу змінювання параметрів в експлуатації.

Отримані середнє значення та дисперсія являють собою середнє значення по ансамблю, оскільки осереднення проводилось для даного моменту часу по великій кількості реалізацій.

Для характеристики внутрішньої структури використовувалась кореляційна функція, яка показує ступінь залежності між значеннями параметрів, віднесених до різних моментів часу.

Результати досліджень були оцінені в відповідності з основними положеннями теорії ймовірності, математичної статистики та теорії випадкових функцій. Була визначена відповідність експериментальних кривих розподілу теоретичним.

Аналіз результатів експериментів проводився на базі теорії випадкових процесів.

В результаті виконаних автором досліджень при перевірці закону розподілу параметрів ЕУ в експлуатації на стаціонарність, ергодичність та аналізу незалежності нормованої кореляційної функції випадкового процесу від положення її аргумента з часом показано, що закон розподілу випадкових процесів експлуатаційних параметрів ЕУ є стаціонарними.

Аналіз розподілу параметрів ЕУ показав, що інтервал змінювання їх в залежності від часу експлуатації знаходиться в межах  $\pm \sigma$ , тобто значення параметрів групується навколо середніх величин  $m_{ne}$  (номінального значення  $N_e$  та пдв) дуже щільно. Зокрема, поле реалізації потужності ЕУ 10Д100 характеризується математичним сподіванням  $M_{ne} = 0,352$ , середнім квадратичним відхиленням  $\sigma_{ne} = 0,2$ , математичним сподіванням частоти обертання  $M_{n_{ob}} = 0,599$ , середнім квадратичним відхиленням

$\bar{\sigma}_{\text{пдв}}=0,74$  та обмежується по тепловозній характеристиці потужністю  $0,175 \bar{N}_e - 0,75 \bar{N}_e$  та частотою обертання  $0,425 \bar{n}_{\text{пдв}} - 0,775 \bar{n}_{\text{пдв}}$  для інтервалу  $\pm \sigma$  (рисунок 3).

В п'ятому розділі розглядається прогнозування показників надійності ЕУ в експлуатації.

На сьогоднішній день практично немає об'єктивних критеріїв, які дозволили б при проектуванні та будівництві ЕУ заделегіть визначити з достатньо високою ступінню точності її надійність та довговічність.

Надійність роботи визначається в процесі доводки та дослідної експлуатації, що приводить до значних витрат часу, засобів та праці.

В зв'язку з цим необхідна методика визначення "ресурсних оцінок" (граничного ресурсу, ресурсу до списання, міжремонтного ресурсу) енергетичних установок тягового рухомого складу.

Найбільш простою характеристикою випадкової функції є одномірна щільність розподілу  $f(\pi, \ell)$ , яка характеризує розподіл випадкової величини  $\Pi(\ell)$  в будь який довільний момент часу пробігу.

Для описання залежності між значеннями випадкової функції  $\Pi(\ell)$  в різні моменти часу пробігу  $\ell$  недостатньо мати тільки одномірні щільності розподілу  $f(\pi, \ell_z)$  в будь які фіксовані моменти часу пробігу.

При змінюванні  $\Pi(\ell)$  випадкового процесу на протязі часу монотонно, тобто після перетину межі допуску значення параметру  $\Pi$  знову в межі допуску не входить, задача зводиться до дворазового розв'язання

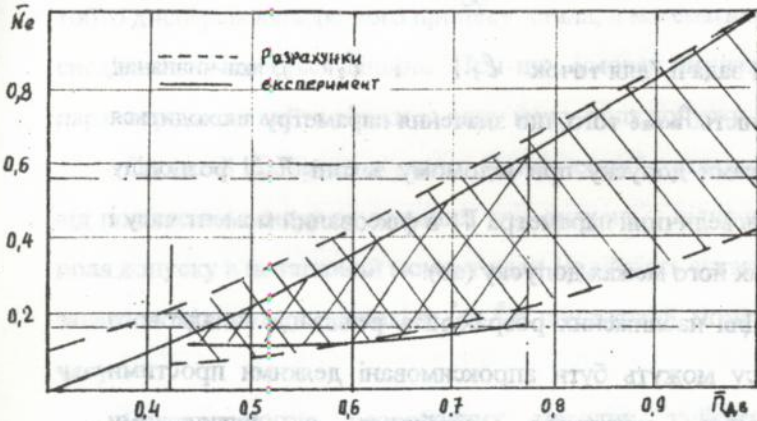


Рисунок 3 - Эксплуатационні допуски потужності ЕУ 10000

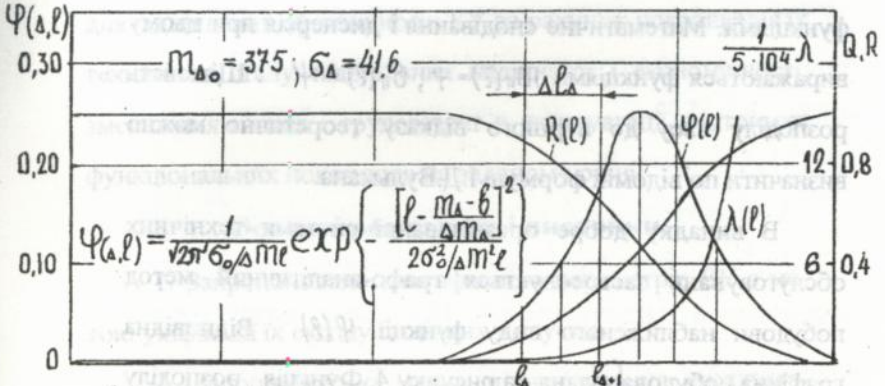
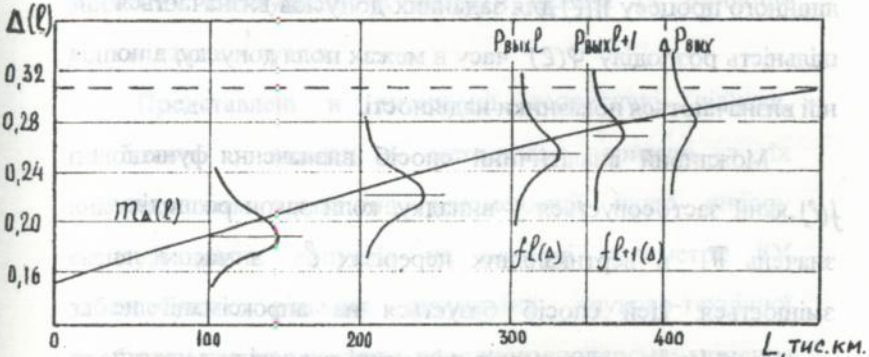


Рисунок 4 - Функція щільності розподілу часу до першої відмови зазору шатунних підшипників ЕУ від пробігу

прямої задачі (для точок  $\ell_{1-1}$  і  $\ell_2$ ), яка визначає ймовірність  $P_{\text{вхл}}(ab)$  того, що значення параметру знаходиться за межами допуску при відомому законі  $\Pi(\ell)$  розподілу значень величини параметра  $\Pi$  в фіксований момент часу і відомих його межах допуску ( $ab$ ).

Для наближених розрахунків реалізації випадкового процесу можуть бути апроксимовані деякими простими функціями, наприклад, лінійними з випадковими коефіцієнтами. По відомих характеристикам випадкового лінійного процесу  $\Pi(\ell)$  для заданих допусків визначається щільність розподілу  $\varphi(\ell)$  часу в межах поля допуску, а ній визначаються показники надійності.

Можливий аналітичний спосіб визначення функції  $f(\ell)$ , який застосовується у випадку, коли закон розподілу значень  $\Pi$  в вертикальних перерізах  $\ell$  з часом не змінюється. Цей спосіб базується на апроксимації не реалізацій  $f(\pi, \ell)$ , а параметрів щільності розподілу деякими функціями. Математичне сподівання і дисперсія при цьому виражаються функціями  $M_{\pi}(\ell) = \Psi$ ;  $\sigma_{\pi}(\ell) = \Psi$ . Щільність розподілу часу до першого відказу теоретично можна визначити по відомій формулі І.Д.Вульмана.

В випадку добре організованої системи технічних обслуговувань застосовується графо-аналітичний метод побудови наближеного виду функції  $\varphi(\ell)$ . Відповідна графічна побудова подана на рисунку 4. Функція розподілу параметра в перерізі  $f(\ell(\pi))$  підпорядковується нормальному закону  $\sigma_{\pi}(\ell) = \text{const}$ ;  $M_{\pi}(\ell) = m_0 + \Delta M_{\pi}(\ell)$ ,

тобто дисперсія випадкового процесу стала, а математичне сподівання змінюється лінійно. При цих умовах значення параметра може вийти тільки за одну межу поля допуску.

Середній пробіг до першого відновлення  $L_0$  залежить від положення центру групування  $m_0$  значень відносно поля допуску в початковий момент часу. Надійність суттєво залежить від закону розподілу  $f(\sigma, l_0)$  в початковий момент часу.

За допомогою розроблених методик здійснено регулювання параметрів ЕУ в результаті чого отримано зниження експлуатаційної витрати палива та змінності відповідальних вузлів.

Представлені в дисертації теоретичні підходи, положення, методи і методики, отримані з їх використанням практичні рекомендації щодо вибору експлуатаційних допусків, на основні параметри ЕУ забезпечують рішення актуальної науково-технічної проблеми, яка має важливе народногосподарське значення для підвищення ефективності ЕУ за рахунок покращення їх технічного стану, підвищення надійності і економічності, зменшення коштів і трудозатрат в експлуатації, підтримки функціональних показників на заданому рівні.

### **Основні результати і висновки.**

1. Запропоновано класифікацію параметрів ЕУ з метою уніфікації їх експлуатаційних допусків.
2. Запропоновано метод прогнозування експлуатаційних допусків параметрів енергетичної установки тягового рухомого складу на основі перетворення

випадкових величин з використанням детермінованих значень експериментально-розрахункових даних.

3. Розроблено математичну модель прогнозування меж змінювання енергетичних параметрів ЕУ в процесі експлуатації. Відмінністю даної моделі є облік теплоти, яка виділяється від тертя поршня об втулку циліндра. В результаті розрахунків визначено поле допустимих експлуатаційних навантажень для ЕУ 16ЧН26/27 - в межах  $0,05-1,0 \bar{N}_e$  і  $0,65-1,0 \bar{N}_{4в}$ , для ЕУ 6ДН12/2\*12 - в межах  $0,12-1,0 \bar{N}_e$  і  $0,3-1,0 \bar{N}_{4в}$ .

4. Розроблено математичну модель прогнозування меж змінювання триботехнічних характеристик в процесі експлуатації ЕУ. Уточнено коефіцієнти витікання та перенесення змащувального шару, рівняння для визначення працездатності нестационарно-навантаженого підшипника при визначенні товщини змащувального шару з урахуванням абсолютної величини виступів жорсткості шийки валу та підшипника. Спрогнозовано межі змінювання відносного зазору  $\psi$  для корінних підшипників ЕУ 6ДН12/2\*12 в межах  $9,0-15,0 \cdot 10^{-4}$ , для шатунних підшипників ЕУ 16ЧН26/27 в межах  $15,0-26,0 \cdot 10^{-4}$ .

5. Визначено поля допустимих навантажень ЕУ при роботі в експлуатаційних умовах, а також верхні та нижні обмежувальні характеристики. Проведено розрахункові дослідження і визначено рівень дефорсування дизеля 6ДН12/2\*12 з визначенням основних показників в експлуатаційних умовах.

6. Розроблено методику експлуатаційних, реостатних та стендових випробувань ЕУ. Виготовлено і оснащено сучасними вимірювальними приладами стенд для випробувань дизель-генератора дизель-поїзда.

7. Проведено експлуатаційні випробування енергетичної установки ТРС, а також стендові випробування нової ЕУ для дизель-поїзда з метою підвищення розрахункових досліджень.

8. Встановлено поле допуску змінювання потужності та частоти обертання колінвалу ЕУ типу 6ДН12/2\*12, 10ДН20,7/25,4, 16ЧН26/27 в процесі експлуатації, а також поле режимів експлуатаційної потужності локомотивів при роботі по тепловозній характеристиці, які спостерігаються.

9. Запропоновано методику прогнозування показників надійності ЕУ ТРС в експлуатації. Проведено розрахунки надійності основних вузлів та деталей.

10. За допомогою розроблених методик здійснено регулювання параметрів ЕУ, в результаті чого отримано зниження експлуатаційної витрати палива на 1,3% та змінності відповідальних вузлів на 7,2% на дослідній партії тепловозів типу 2ТЄ10М в локомотивному депо Основа Південної залізниці.

### **Основні положення дисертації опубліковані**

#### **у наступних роботах:**

1. Симсон А.Э., Головка В.Ф. Расчёт локомотивных энергетических установок при работе на эксплуатационных режимах: Учебное пособие. -Харьков: ХИИТ,1990.- 80 с.

2. Головки В.Ф. Уточнённая методика определения параметров трения поршневого кольца //Межвуз.сб.научн.тр./ ХИИТ-1993.-Вып.20.- Харьков,1993.-С.32-39.
3. Головки В.Ф. Характеристики случайных процессов изменения параметров энергетической установки в эксплуатации. //Межвуз.сб.научн.тр./ Днепропетровский государственный университет железнодорожного транспорта- 1996 - Вып. 24. Днепропетровск, 1996.- с. 68-72.
4. Головки В.Ф., Агулов А.Ф., Устенко А.В. Прогнозирование технического состояния ЦПГ тепловозного дизеля //Межвуз.сб.научн.тр./ ХИИТ. -1989.-Вып.8.- Харьков, 1989.-С.26-33.
5. Головки В.Ф. Методика обобщённой оценки эксплуатационной экономичности и надёжности локомотивной энергетической установки //Межвуз.сб.научн.тр./ ХИИТ.-1993.- Вып.22.-Харьков, 1993.-С.12-16.
6. Головки В.Ф. Методика определения механических потерь локомотивной энергетической установки //Межвуз.сб.научн.тр./ ХИИТ.-1993.-Вып.22.- Харьков, 1993.- С.27-33.
7. Головки В.Ф. Анализ влияния конструктивных параметров на надёжность пар трения двигателей внутреннего сгорания //Межвуз.сб.научн.тр./ ХИИТ.-1991.-Вып.16.- Харьков, 1991.-С.82-86.
8. Головки В.Ф., Павлов С.А. Оценка технического состояния цилиндро-поршневой группы тепловозных дизелей по прорыву газов в картер //Республ.сб.научн.тр./ ЛМИ.- К.:УМК ВО,1990.-С.147-148.

9. Тартаковский Э.Д., Погребняк В.В., Головки В.Ф. Регулирование частоты вращения приводного центробежного нагнетателя тепловозного двигателя 10Д100//Двигатели внутреннего сгорания/ НИИ-информтяжмаш. -4-75-4.-М., 1975.-С.15-18.
10. Хомич А.З., Головки В.Ф. и др. Улучшение воздухообеспечения тепловозного дизеля 10Д100 // Электрическая и тепловозная тяга. - 1974. - N12. -С.19-20.
11. Соболев В.Н., Погребняк В.В., Головки В.Ф. Методика расчёта совместной работы двигателя и агрегатов наддува на неноминимальных режимах //Тр.МИНСПа.-М., 1974.-Т.Х1.- Вып.6. С.28-30.
12. Головки В.Ф., Теслик А.Г. Опыт снижения минимальной частоты вращения коленвала двигателя 10Д100 при работе на холостом ходу// Межвуз.сб.науч.тр.//БелИИЖТ.- 1977.- Вып.156.- Гомель,1977.С.64.
13. Федорев В.А., Головки В.Ф., Бабинский И.И. Влияние функционального состояния топливной аппаратуры на удельный эффективный расход топлива дизеля 10Д100 //Межвуз.сб.науч.тр./ ОМИИТ.-1980 -Вып.32.-Омск,1980.- С.74-76.
14. Симсон А.Э., Головки В.Ф., Теслик А.Г. Повышение эффективности работы тепловозного двигателя 10Д100 при изменении частоты вращения ротора приводного центробежного нагнетателя /Межвуз.сб.научн.тр./ РИИЖТ.- 1981.- Вып.159.- Ростов-на-Дону, 1981- С.77.
15. Головки В.Ф., Тартаковский Э.Д. Методика обоснования режимов испытаний и диагностирования тепловозных

агрегатов //Межвуз.сб.науч.тр./ ХИИТ.-1988.-Вып.6.- Харьков, 1988.-С.33-36.

16. Соболев В.Н., Погребняк В.В., Головкин В.Ф. Техническая диагностика и улучшение переходных процессов тепловозных дизелей //Двигатели внутреннего сгорания/ НИИ-информтяжмаш.- 4-73-22.- М., 1973. - С.21-23.

17. Скаженик А.М., Жадан А.С., Головкин В.Ф. Влияние длины топливопроводящего трубопровода высокого давления на показатели работы двигателя Д70 // Двигатели внутреннего сгорания: Респ.межвед. научн.-техн.сб.- Вып. 17.- Харьков: ХГУ, 1972.- С.47-49.

18. Скаженик А.М., Ереско В.П., Головкин В.Ф. Влияние отдельных конструктивных элементов крышки цилиндра на показатели работы двигателя Д70 // Двигатели внутреннего сгорания: Респ. межвед. научн. - техн. сб. -Вып.16.- Харьков: ХГУ, 1972.- С.31-34.

19. Скаженик А.М., Головкин В.Ф. и др. Исследование влияния расположения распыливающих отверстий форсунки на экономичность двигателя Д70 //Двигатели внутреннего сгорания: Респ. межвед. научн.- техн. сб.- Вып. 13.- Харьков: ХГУ, 1971.- С.121-125.

20. Скаженик А.М., Гринсберг Ф.Г., Головкин В.Ф. Повышение экономичности двигателя типа Д70 на неноминальных режимах путём увеличения давления наддува //Двигатели внутреннего сгорания: Респ. межвед. научн.-техн. сб.- Вып. 14. Харьков:ХГУ, 1971.- С.69.

21. Головки В.Ф. Прогнозирование ресурса деталей энергетических установок тягового подвижного состава //Межвуз.сб.научн.тр/ ХарГАЗТ, 1977. - Вып.29.-С.30-32.
22. А.С. N1772386 (СССР) Устройство для регулирования частоты вращения вала дизеля.1.07.1992./ Головки В.Ф., Семенович А.Д.-Приоритет 16.10.1990.
23. А.С. N1700409 (СССР) Устройство для контроля герметичности. 22.02.1991./ Головки В.Ф. и др. - Приоритет 9.10.1989.
24. Головки В.Ф. Определение и прогнозирование ресурса деталей энергетических установок тягового подвижного состава/ ХарГАДЖТ.- Харьков, 1995.- 23с.- Деп. в ВИНТИ. N1120 -УК95.- 11.05.95.
25. Головки В.Ф. Совершенствование методики оценки результатов эксплуатационных испытаний локомотивных энергетических установок /ХИИТ.-Харьков, 1990.-12с.-Деп. в ЦНИИТЭИ МПС N 5477.
26. Головки В.Ф., Жадан А.С. Распределение потерь на трение и привод вспомогагельных механизмов при обкатке транспортных дизелей / ХИИТ.- Харьков, 1990.- 54с.- Деп. в ЦНИИТЭИ МПС. N1561- ж. д. 90. - 15.02.90.

Особовий внесок в надруковані роботи у співавторстві. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором особово. В публікаціях, опублікованих в співавторстві вклад автора слідуючий: [1] - запропонована ідея написання, теоретична проробка, розробка математичної моделі з приблизними розрахунками. [8, 10.

12, 13, 15, 16, 25, 28, 29] - теоретична проробка проблеми, редагування праць, [17, 18, 19, 20] - розробка програми випробувань, обробка та аналіз результатів, [9, 10, 14] - проведення випробувань, обробка та аналіз результатів випробувань.

## АННОТАЦИЯ

Головко В.Ф. Прогнозирование эксплуатационных допусков энергетических установок автономного тягового подвижного состава. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.22.07 "Подвижной состав железных дорог и тяга поездов". Харьковская государственная академия железнодорожного транспорта. Харьков, 1997г.

Предложен метод прогнозирования эксплуатационных допусков параметров локомотивной энергетической установки на основании преобразования функций случайных величин параметров с использованием детерминированных значений экспериментально-расчётных данных.

Разработаны математические модели прогнозирования границ изменения энергетических параметров и триботехнических характеристик ЭУ в процессе эксплуатации.

Разработаны методики: определения характеристик случайного процесса при эксплуатационных и стендовых испытаний; инженерного прогнозирования границ полей допусков параметров локомотивной энергетической установки.

Ключевые слова: допуск, прогнозирование, эксплуатационный, метод, эксперимент, расчёт, параметр, случайный, теоретический.

### S U M M A R Y

Golovko V.F. Improvement of the prediction methods and operational tolerance calculation of the selfconstained traction rolling stock power installations parameters. Dissertation for the technical sciences doktors degree (the 05.22.07 spesiality "Rolling stock of raylways and the traction of trains") Kharkov state Academy of Raylway transport, 1996.

For the first time the method od prediction of operational tolerance parameters of locomotive power instollation was elaborated. It was worked out on the base of randon parameters values transformation using denermined values of experimetal-calculating data.

The following procedures are specified: calculation of the working process parameters in the cylinder of the locomotive power installation; calculation of the friction parameters of the cilinderpiston group; determination of the friction parameters of the locomotive power installation crankshaft; determination of the randon process characteristics during the stand and operational tests; engineering prediction of the tolerance field width of the locomotive power instollation parameters.

A stend for investigating the locomotive power installation is designed and manufactured. The stend and operational tests have been performed.

Key words: toleranse, prediction, operational, method, experiment, calculation, parameter, randon, theoretical.







АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття вченого ступеню

доктора технічних наук

ПРОГНОЗУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИ ДОПУСКІВ  
ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК АВТОНОМНОГО  
ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

05.22.07 рухомий склад залізниць та тяга поїздів

ГОЛОВКО Владислав Федорович

Відповідальний за випуск Агулов А.Ф.

---

Підписано до друку 14.03.1997г. Формат папіру 60\*84. 1/16, д.а.  
Папір для розмнож. апаратів. Друк офсетний Ум. Др. Арк. 2, уч. - вид. арк. Лист. 2, 5  
Замовлення 140. Тираж 100. Безкоштовно

---

Видання ХарДАЗТу (ХПТ) 310050, г. Харків-50, пл. Фейербаха, 7  
Тип. ХарДАЗТу, 310050, г. Харків-50, пл. Фейербаха, 7

435516

Ав 37.545

АВТОДЕКАТ

Известия в области науки и техники

Исследования в области науки и техники

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
КРИТИЧЕСКИХ УЧАСТКОВ АВТОМОБИЛЬНОГО  
ТРАНСПОРТА

07.22.07 - Исследования в области науки и техники

ТОЛЮБИЙ Владимир Федорович

Исследования в области науки и техники

Получено в печать 14.03.1997г. Формат 60\*84 мм, 1 л.  
Принтер для документов формата А4, 100 стр. в листе.  
Замовлено № Тираж 100 экз. в листе.  
Издательство «Харьків» (ХИТ) 31000, г. Харьков, 10, ул. Фрунзе.  
Тел. Харьков 31000, г. Харьков, 20, ул. Фрунзе.

4 32 218