

Равлюк В. Г.

Український державний
університет
залізничного
транспорту

Ravlyuk V. G.

Ukrainian State University
of Railway Transport

УДК 629.4.06:621.822.6

ДІАГНОСТУВАННЯ РЕДУКТОРНО-КАРДАННИХ ПРИВОДІВ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ

Розглянуто основні дефекти, що виникають під час експлуатації та монтажу редукторно-карданних приводів пасажирських вагонів, які можна визначити шляхом застосування вібраційного діагностування. При проведенні реєстрації вібросигналів, які генеруються зубчастими парами, датчики рекомендується розміщувати на підшипникових вузлах. Це дасть змогу встановити основні причини вібрації й ознаки наявності дефектів із високою достовірністю.

Ключові слова: пасажирський вагон, вібрація, діагностування, дефект, зубчаста пара, метод, редукторно-карданний привод, спектр.

Вступ. Одним із способів підвищення експлуатаційної надійності та довговічності пасажирських вагонів є широке впровадження засобів технічного діагностування, які відіграють важливе значення при контролі вузлів пасажирських вагонів.

Технологія технічного обслуговування й ремонту вузлів рухомого складу в умовах депо часом не забезпечує належної якості вузлів вагонів для забезпечення експлуатаційних параметрів. Це пояснюється як нестабільністю забезпечення комплектуючими, так і відсутністю комплексного підходу до діагностування технічного стану вузлів пасажирських вагонів [1, 5]. При технічному обслуговуванні та ремонті не приділяється достатня увага редукторно-карданним приводам (РКП) пасажирських вагонів. Крім цього, у багатьох депо відсутня система реєстрації й обліку дефектів РКП, що унеможлиблює точне встановлення часу виходу РКП з ладу й причини, що викликали його відмову.

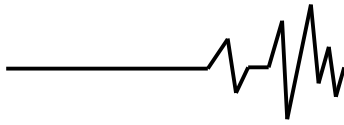
Істотного зниження витрат на забезпечення працездатності пасажирських вагонів можна домогтися переходом на обслуговування й ремонт вузлів не за терміном, а за фактичним станом. Такий перехід неможливий без ефективного контролю стану вузлів вагонів при якому можна виявляти всі потенційно небезпечні дефекти на стадії їх зародження. Діагностування дозволяє виявити приховані дефекти, несправності й попередити їх відмови, визначити необхідний обсяг планових ремонтних робіт, прогнозувати ресурс справної роботи вузлів пасажирських вагонів до яких відносяться РКП. Вони є невід'ємною

частиною пасажирських вагонів, тому розробка методів і засобів для діагностування РКП є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В праці [1] розглядаються вимоги до вібродіагностування вузлів з підшипниками кочення й зубчастих передач пасажирських вагонів. Установлено, що розробка технології вібродіагностування є визначальним заходом у комплексній системі технології технічного обслуговування й ремонту рухомого складу.

У роботах [2, 3] розроблені основні положення методики оцінки якості виготовлення й вібромоніторингу редукторів, наведені результати застосування безрозбірної діагностики для визначення технічного стану редукторів, розглядаються їх типові дефекти, виконані висновки про надійність редукторів і ефективності застосування методик діагностування. У статті [4] розглянуті особливості структури спектра вібрації диференціального редуктора при зношуванні зубів центральної шестерні й запропонована методика вібродіагностування даного дефекту. Виконаний аналіз у праці [5] сукупності відмінних ознак показав, що автономна автоматизована комплексна система забезпечує діагностування колісно-моторних блоків з високим ступенем достовірності, що дозволяє значно скоротити трудомісткість і тимчасові витрати на їх ремонт і поелементне діагностування.

Значний внесок для розв'язання і вивчення процесів формування й поширення швидкозмінних коливальних процесів, міцності та якості ремонту рухомого складу внесли такі вчені, як І. І. Артоболевський, Е. Л. Айрапетов,



Є. В. Александров, А. В. Барков, Н. А. Баркова, Ю. І. Бобровницький, В. Л. Вейц, М. Д. Генкін, Д. Д. Волков, В. Н. Котуранов, В. В. Ключев, В. О. Лукін, Б. В. Павлов, А. І. Петрусевич, О. М. Савчук, А. Г. Соколова, А. В. Смольянінов, В. Ф. Ушкалов, Л. А. Шадур, а також закордонні дослідники В. Гольдсміт, Р. А. Коллакот, З. Енжел та ін [6].

Метою даної статті є опис причин вібрації зубчастих пар, діагностичних ознак, що проявляються на спектрі вібрації при наявності дефектів. Обґрунтування методів, що можуть застосовуватися для вібродіагностування редукторно-карданних приводів.

Викладення основного матеріалу.

Носієм інформації про технічний стан елементів працюючого редукторно-карданного привода при вібродіагностуванні є віброакустичний сигнал, що володіє інформацією про коливальні процеси і акустичний шум. Вібраційний сигнал практично миттєво реагує на зміну стану елементів РКП, це дає можливість швидко постановити діагноз. У якості вихідного віброакустичного сигналу при діагностиці зубчастих передач РКП використовується часовий сигнал віброшвидкості або віброприскорення. Для діагностування різного стану елементів РКП нині використовують математичний апарат теорії розпізнавання

образів, теорії множин, теорії управління та ін.

Для ефективного проведення вібраційного діагностування елементів РКП застосовується динамічна модель, яка зазвичай представляється багатомасовою системою із зосередженими параметрами та дозволяє найбільш точно описувати та враховувати особливості формування динамічних навантажень.

Для діагностування елементів редукторно-карданних приводів пасажирських вагонів доцільно застосовувати вібродіагностичні комплекси, які дозволяють з високою достовірністю визначити їх працездатність, а також зберігати результати діагностування тривалий час у базі даних ЕОМ. При діагностуванні вібродіагностичними комплексами можна виявити структурні дефекти елементів редукторів, які поділяються на дві групи. До першої можна віднести ті які відносяться до підшипникових вузлів, а до другої ті які відносяться до зубчастого зачеплення. Кожний з перелічених дефектів елементів РКП (рис. 1) дає індивідуальні характерні зміни спектра вібрації [1, 5, 6], які визначаються імовірно-статистичними або аналітичними методами для кожного виду дефекту.

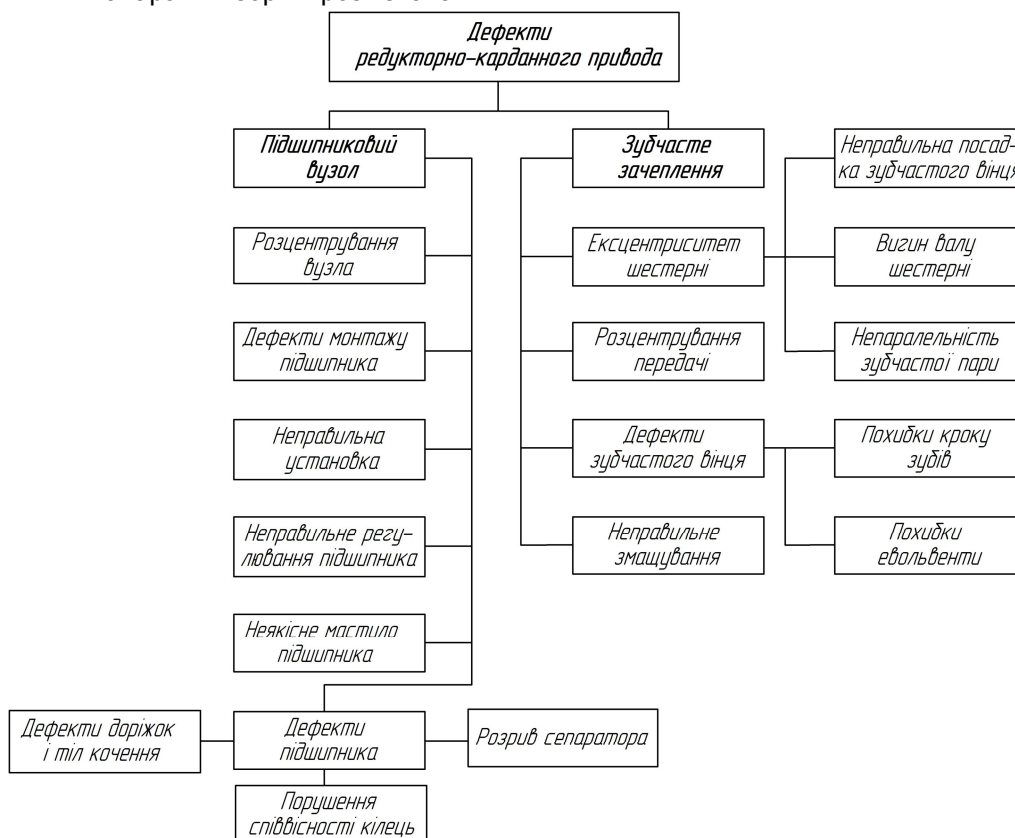
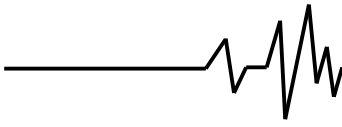


Рис. 1. Дефекти елементів редукторно-карданних приводів, які виникають в процесі експлуатації пасажирських вагонів та при монтажі



Для діагностування зубчастих передач і близьких до них за генеруючим вихідним сигналом підшипників кочення РКП використовують, практично всі відомі в цей час, методи обробки і аналізу випадкових процесів [8].

Причини вібрації зубчастих пар РКП.

При проведенні реєстрації вібросигналів, які генеруються зубчастими парами, необхідно враховувати основні особливості їх роботи [6].

Вібросигнали від зубчастих пар містять у собі як синхронні компоненти (гармоніки), пропорційні оборотній частоті обертання шестерні, так і несинхронні, пов'язані з резонансними процесами та непропорційні частоті обертання шестерні. Вся основна потужність у вібросигналі від зубчастої пари зосереджена у високочастотній області. На практиці, при проведенні реєстрації вібросигналів, припускаючи їх подальше застосування для діагностування стану зубчастих пар, бажано починати з реєстрації максимально високих частот спектроаналізатором.

Гармоніки, властиві зубозачепленню мають невисокий енергетичний рівень. Причин цьому дві. По-перше, енергія, що виділяється в процесі обкочування зубів, сама по собі не дуже велика. По-друге, місця установлення вібродатчиків, у силу конструктивних особливостей редукторів, значно віддалені від зони зубозачеплення. У результаті шлях передачі енергії вібрації зубозачеплення досить великий і сигнали в ньому сильно згасають. Тому, як мінімум необхідно використання для діагностування стану зубчастих передач сигналів у розмірності віброшвидкості, а в більшості випадків для підвищення інформативності вібросигналів, доводиться використовувати вібросигнали в розмірності віброприскорення.

Амплітуда гармонік у спектрі, викликана вібраціями від зубчастих пар, у значній мірі залежить від навантаження, що передається зубчастою парою. На холостому ході РКП гармоніки від зубозачеплення реєструються дуже погано. Із зростанням зусиль, що передаються РКП, зростають вібрації від зубозачеплення. Така особливість роботи зубчастої пари для виявлення тенденцій зміни стану вимагає проведення вимірювання, бажано при однаковому великому навантаженню. Якщо навантаження буде малим дефекти можуть не проявитися. Якщо вимірювання, що розрізняються за часом проведення, будуть виконані при різних навантаженнях РКП, тоді всі ці вимірювання виявляться непридатними для порівняння

одного з іншим, для пошуку змін, що відбулися в РКП.

Вібрація від зубозачеплення є нестационарною в тому плані, що має у своєму складі кілька фаз «обкочування» точніше кажучи «проковзування» зуба по зубі. Кожна із цих фаз збуджує коливання різної частоти, близькі до частоти зубозачеплення. Кожен із зубів, у силу своїх специфічних відмінностей від інших зубів, генерує свої частоти. На це все накладається те, що пари «взаємно обкочених» зубів постійно змінюються, тому що шестерні мають неоднакову кількість зубів.

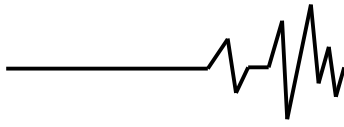
Діагностичні ознаки, які проявляються при наявності дефектів РКП.

З появою дефектів зубозачеплення відбувається не тільки зростання амплітуди гармоніки зубозачеплення, але й з'являються бокові гармоніки поблизу частоти зубозачеплення.

Зсув за частотою між основним піком гармоніки зубозачеплення та боковою гармонікою говорить про те, яке зубчасте колесо має передбачуваний дефект. Якщо зсув частот дорівнює оборотній частоті вхідного валу — дефект перебуває на ньому. Іноді мають місце бокові смуги від обох валів, при цьому найбільш дефектним буде той вал, сімейство бокових гармонік від якого буде мати більші амплітуди [6, 7].

Причина виникнення в спектрі вібрації зубчастої пари бокових смуг пояснюється досить просто. При проходженні дефекту через зону контакту шестерень у вібросигналі буде спостерігатися сплеск амплітуди. Цей імпульс буде повторюватися через час, пропорційний одному обороту шестерні з дефектним зубом. При проходженні дефекту через зону контакту зубів в обертанні вихідного вала спостерігається дуже маленьке сповільнення, а потім точно таке ж прискорення. На спектрі й те й інше приводить до появи бокових, найчастіше симетричних, зубів поруч із частотою зубозачеплення, зсунутих на частоту повторення такого процесу. Якщо бокові гармоніки ліворуч і праворуч відрізняються за амплітудою, це говорить про різну інтенсивність процесів сповільнення та прискорення при проходженні дефекту через зону контакту зубів шестерень.

Якщо дефект розташований на вхідному валу, тоді процес проходження дефекту через зону зубозачеплення відбувається через один оберт цього вала і зсув бокових гармонік щодо гармоніки зубозачеплення пропорційний оборотній частоті саме вхідного вала. При розташуванні дефекту на вихідному валу, повторивши аналогічні міркування, одержимо,



що зсув бокових гармонік повинен бути рівний оборотній частоті вихідного вала.

На перших етапах виникнення несправностей частота зубозачеплення та бокові гармоніки, що є синхронними компонентами, містять у собі практично всю потужність вібросигналу. У міру свого розвитку дефект стає більше нестационарним, розподіленим за частотою, виникають багато процесів, що приводять до «розмивання» потужності вібросигналу на спектрі в проміжках між частотою зубозачеплення та боковими гармоніками. У вібросигналі починають переважати несинхронні компоненти.

Починається процес, коли синхронні компоненти не зростають і вся додаткова потужність від дефекту зосереджується в несинхронних гармоніках. Так відбувається доти, поки несинхронні гармоніки не зрівнюються за амплітудою з синхронними. В цей момент настає повне руйнування зубчастої пари (замість процесів тертя при ковзанні зуба по зубі, у ній будуть відбуватися тільки динамічні удари).

Вимоги до місць установлення вібродатчиків.

Місця для установлення вібродатчиків (п'єзоакселерометрів) варто вибирати так, щоб вони знаходилися якнайближче до зони зубозачеплення. Бажано знати внутрішню конструкцію РКП та установлювати датчик у такому місці, де затухання вібрацій буде мінімальним. На шляху проходження вібросигналів, що реєструють від зони зубозачеплення до вібродатчика повинно бути якнайменше границь розділювання різних засобів і особливо зазорів.

При вібраційних вимірюваннях РКП датчик слід закріплювати так, щоб його вісь максимальної чутливості збігалася з потрібним при вимірюванні напрямком. Необхідно зазначити, що датчики також чутливі до коливань у поперечних напрямках. Однак, цією поперечною чутливістю можна в більшості практичних випадків знехтувати, тому що вона менше 1% максимальної чутливості датчика [8].

Методи діагностування, що застосовуються до зубчастих пар.

Діагностування зубчастих передач є досить складним, трудомістким, зазвичай досить тривалим за часом процесом. При діагностуванні математичний апарат, що використовується для оцінки технічного стану та пошуку причин підвищеної вібрації зубчастих пар у РКП, досить складний і містить у собі практично весь арсенал спектральних методів аналізу вібросигналів [6].

Основні можливі призначення цих методів стосовно до проблем зубчастих пар:

— часові сигнали вібрації на зубчастих парах зазвичай є за своєю формою дуже складними, «зашумленими» великою кількістю коливань різної частоти та амплітуди. За формою тимчасового вібросигналу можна виявляти такі серйозні дефекти, як тріщина в одному або декількох зубах. Досить добре діагностується відсутність зуба. Всі інші більш «дрібні» дефекти стану зубчастих пар за тимчасовим вібросигналом діагностуються важко;

— модальний аналіз дає високу ефективність при діагностиці стану зубчастих пар, але він є самим складним з погляду інтерпретації фізичних процесів і вимагає знань з математичної підготовки фахівця з діагностики;

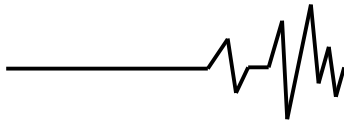
— спектр обвідної вібросигналу дозволяє виявляти багато дефектів у редукторах. Діагностика за спектром обвідної досить складна для фізичного тлумачення дефектів зубозачеплення. Тому вона звичайно вимагає гарної теоретичної підготовки фахівця з діагностики або наявності в його технічному арсеналі спеціалізованої комп'ютерної експертної системи, що вирішує ці проблеми;

— спектр вібросигналу є найбільш простим і розповсюдженим практичним діагностичним апаратом, що дозволяє визначати всі основні дефекти зубозачеплення. Застосування діагностики за спектрами вібросигналів вимагає обов'язкового знання внутрішніх конструктивних особливостей редукторів.

Найкращі результати при оцінці стану та діагностуванні причин підвищеної вібрації складних редукторів методами вібродіагностики досягаються при комплексному застосуванні всіх перерахованих вище методів.

Сили, які збуджують вібрацію в зубчастих парах.

Колівальні сили в зубчастій парі формуються в зоні зачеплення й можуть мати кінематичне, параметричне, а також ударне походження. На відміну від підшипників ротора, статичне навантаження на зачеплення визначається не силою ваги шестерні, а моментом, що передається, який переважно має динамічну складову через дефекти шестерень, що не входять у контрольоване зачеплення. У бездефектному зачепленні мають місце невеликі колівальні сили (кінематичні, параметричні й досить часто ударні) при вході кожного зуба в зачеплення. Частота колівальних сил визначається числом зубів і частотою обертання шестерні [6].



$$f_n = f_{об1} Z_1 = f_{об2} Z_2, \quad (1)$$

де $f_{об1}$, $f_{об2}$, Z_1 , Z_2 — відповідно, частота обертання вхідного й вихідного вала й число зубів ведучої й веденої шестерні.

Вібрація шестерень на інших частотах не пов'язана з конструктивними особливостями та визначається технологічними відхиленнями при їх виготовленні або наявності дефектів.

У першу чергу, це дефекти окремого зуба. Тоді один раз за оберт дефектної шестерні виникають сили, які можуть мати різну природу, у тому числі кінематичну (плавна нерівність навантажувальної частини поверхні зуба), параметричну (зміна твердості зачеплення в зоні дефекту) і ударну (різка зміна форми навантажувальної поверхні). При таких дефектах зростає й низькочастотна та високочастотна вібрація шестерень, але остання не доходить до точок контролю вібрації на корпусі редуктора.

Ще одна особливість формування коливальних сил у зачепленні — поява низькочастотних сил при наявності дефектів на обох шестернях. Це коливальні сили із частотою, що є субгармонікою частот

обертання обох шестерень. І на цій частоті виникають коливальні сили кінематичного, параметричного або ударного походження, але до корпуса редуктора також доходять тільки низькочастотні компоненти вібрації, які збуджуються цими силами [5, 6]

$$f_{CF} = \frac{f_{об1}}{k_1} = \frac{f_{об2}}{k_2}, \quad (2)$$

де k_1 і k_2 — цілі числа.

Діагностування шестерень і зачеплень виконується за спектрами обвідної високочастотної вібрації, яка вимірюється на підшипниках цих шестерень і за спектрами низькочастотної й середнечастотної вібрації, у яких аналізуються властивості зубчастості вібрації (рис. 2). Основна діагностична ознака дефектів — поява динамічних навантажень на підшипники. Ця ознака працює на багато разів ефективніше, ніж використовуюча багатьма фахівцями ознака — появи ударів у зачепленні. Справа в тому, що при дефектах зубів дуже часто цей удар буває «негативним» тобто навантаження в зачепленні не зростає, а падає. У цих випадках метод виявлення ударів у зачепленні не працює.

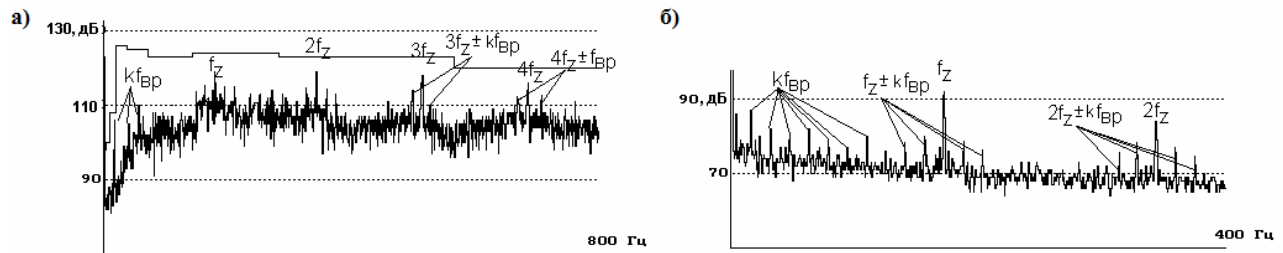


Рис. 2. Спектр вібрації (а) підшипника редуктора і його обвідна (б) при зношуванні зуба

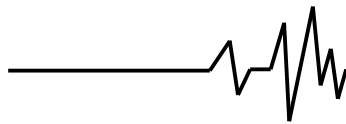
У спектрі обвідної вібрації підшипника редуктора при дефектах шестерні, наприклад, при неоднорідному зношуванні зубів, з'являються з одного боку гармонійні складові на частотах, кратних частоті обертання, а, з іншого боку, зубцеві гармоніки з боковими складовими, що відрізняються на частоту обертання.

Висновки. 1. Застосування вібраційного діагностування для контролю технічного стану редукторно-карданних приводів пасажирських вагонів дає можливість обрати найбільш ефективний метод діагностування за допомогою якого можна встановити вид дефекту елемента, місце його розташування, а також підвищити достовірність результатів діагностування, зменшити кількість відмов та витрати на технічне обслуговування й ремонт пасажирських вагонів в цілому.

2. Для технічного діагностування зубчастих пар редукторно-карданних приводів вібрацію спектрів обвідної необхідно вимірювати шляхом встановлення датчиків на підшипникові вузли. В результаті цього вони будуть реєструвати динамічні удари, що є основною діагностичною ознакою наявності дефектів у РКП.

Список використаних джерел

1. Равлюк В. Г. Напрямок досліджень з вібродіагностування ходової частини рухомого складу [Текст] / В. Г. Равлюк // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т». Транспортне машинобудування. — Х., — 2008. — Вип. 46'. — С. 112 — 117.
2. Гаврилов С. А. Вибромониторинг зубчатых колес редукторов в процессе



приработки [Текст] / С. А. Гаврилов, Н.Н. Ишин, А. М. Гоман, А. С. Скороходов // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін.-т». — Х., — 2015. — Вип. 35(1144). — С 38-46.

3. Сергеев К. О. Опыт применения безразборной диагностики для определения технического состояния редукторов ТКГ2-03 СТМ типа «Атлантик-333» [Текст] / К. О. Сергеев, А. С. Жуков // Вест. МГТУ. — Х., 2011. Т. 14, №4. — С 681-684.

4. Сундуков А. Е. К вопросу вибродиагностики изнашивания шестерён редуктора турбовинтового двигателя [Текст] / А. Е. Сундуков, Е. В. Сундуков, С. М. Плотников // Вест. Самарского государственного аэрокосмического университета. — Самара, 2015. Т. 14, № 2. — С 193-200.

5. Костюков А. В. Диагностика качества сборки [Текст] / А. В. Костюков, А. А. Лагаев, А. В. Зайцев. Журнал «Мир Транспорта» — М., — 2003. — Вып. 10. — С. 70 – 74.

6. Барков А. В. Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации [Электронный ресурс] / А. В. Барков, Н. А. Баркова // — С. Пб., 1999. — Вып. 9. — Режим доступа: <http://www.vibrotek.ru>. — Название с экрана.

7. Вибродиагностика редукторов [Текст] // Ежеквартальный журнал «Рынок приводной техники». — Ижевск, — 2006. — Вып. 1(4). — С. 18 – 20.

8. Равлюк В. Г. Підвищення точності діагностування підшипникових вузлів вагонів [Текст] / В. Г. Равлюк // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях». — Вінниця, ВНАУ, — 2015. — Вип. 4(80). — С. 169 – 175.

Список джерел в транслітерації

1. Ravluk V. G. the Direction of the research on the vibration of the undercarriage of rolling stock [Text] / V. G. rawlyk // VSN. NAT. tech. University of Tu "Kharg. Polten. in-t". Transportation engineering. — Kh., — 2008. — Vol. 46'. — P. 112 – 117.

2. Gavrilo S. A. vibration condition monitoring of gears in the gear burnishing process [Text] / A. S. Gavrilo, N. N. Ishin, A. M. Goman, A. S. Skorokhodov // VSN. NAT. tech. University of Tu "Kharg. Polten. IR.-t". — H., — 2015. — The VIP. 35(1144). — 38-46.

3. Sergeev K. O. experience of application of the CIP diagnostics to determine the technical state of gears ТКГ2-03 STM type "Atlantic-333" [Text] / K. O. Sergeev, S. A. Zhukov // West. MSTU. — H., 2011. Т. 14, №4. — 681-684.

4. Sundukov A. E. vibration-wear of gears of the gearbox turboprop engine [Text] / A. E.

Sundukov, E. V. Sundukov, S. M. carpenter // West. Samara state aerospace University. — Samara, 2015. Vol. 14, No. 2. — 193-200.

5. Kostyukov V. A. Diagnostics of quality [Text] / A. V. Kostyukov, A. A. Nagaev, A. V. Zaitsev. The Magazine "World Of Transport" — M — 2003. — Vol. 10. — P. 70 – 74.

6. Barkov A. V. an Intelligent system for machine monitoring and diagnostics by vibration [Electronic resource] / A. V. Barkov, N. A. Barkov // — S. Pb., 1999. — Vol. 9. — Mode of access: <http://www.vibrotek.ru>. — Title from the screen.

7. Vibration diagnostics of gearboxes [Text] // the quarterly magazine "the Market of drive technology". — The Izhevsk, 2006. — Vol. 1(4). — S. 18 – 20.

8. Ravluk V. G. improving the accuracy of diagnostics of bearing units of cars [Text] / V. G. rawlyk // Ukrainian scientific-technical journal "Vibration in technics and technologies". — Vinnytsia, Vinnytsia national agrarian University, — 2015. — Vol. 3(79). — P. 99 – 104.

ДИАГНОСТИКА РЕДУКТОРНО-КАРДАНЫХ ПРИВОДОВ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ

Аннотация. Рассмотрены основные дефекты, возникающие во время эксплуатации и монтажа редукторно-карданных приводов пассажирских вагонов, которые можно определить путём применения вибрационного диагностирования. При проведении регистрации вибросигналов, генерируемых зубчатыми парами, датчики рекомендуется размещать на подшипниковых узлах. Это позволит установить основные причины вибрации и признаки наличия дефектов с высокой достоверностью.

Ключевые слова: пассажирский вагон, вибрация, диагностика, дефект, зубчатая пара, метод, редукторно-карданный привод, спектр.

DIAGNOSIS OF CARDAN GEAR DRIVES OF PASSENGER WAGONS

Annotation. Discuss the main defects that occur during handling and installation reductora-cardan drives of passenger cars, which can be identified by the use of vibration diagnosis. When registering vibration signals generated by gear pairs, the sensors should be placed on bearing units. This will allow you to establish main reasons for the selection of vibration and signs of the presence of defects with high reliability.

Key words: passenger wagons, vibration, diagnostics, defect, gear pair, method, cardan gear drives, range.