



Applicazione di modalità transitorie nella diagnosi dei principali componenti del materiale rotabile con l'utilizzo di modelli di riferimento

Applying transient modes when diagnosing major components of rolling stock with the use of reference models

Vladimir TETTER ^(*)
Alexander TETTER ^(*)
Inna DENISOVA ^(**)

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.12.2024.ART.2>)

Sommario

L'articolo conferma l'importanza di diagnosticare i componenti critici del materiale rotabile al fine di migliorare la sicurezza del traffico e ridurre i costi operativi e di riparazione. Tali unità comprendono: cuscinetti di boccole di sale montate e motori elettrici di trazione, riduttori di gruppi ruota-motore, riduttori dalla parte centrale dell'asse di autovetture per trasporto passeggeri, locomotive elettriche, gruppi elettrogeni diesel di locomotive. Si segnala che attualmente la diagnosi delle unità di materiale rotabile viene effettuata prevalentemente in modalità di funzionamento stazionaria. La rilevanza e l'importanza di condurre la diagnostica in modalità transitoria è comprovata. Si prendono in considerazione le opzioni per la diagnosi dei gruppi meccanici rotanti durante l'accelerazione ed il decentramento in base ai segnali di vibrazione e velocità di rotazione. A tal proposito, gli autori hanno proposto due metodi di diagnosi originali. Nel primo metodo, si analizzano i valori di ampiezza della vibrazione a frequenze caratteristiche durante il rodaggio o l'esercizio e gli attuali valori vengono confrontati con i valori di soglia. In presenza di un difetto, la sua pulsazione caratteristica, ad un certo punto nel tempo, coincide con la pulsazione corrente che cambia, mentre viene notato e registrato un aumento di risonanza nell'ampiezza della vibrazione. Nel secondo metodo, la matrice di dati registrata nella modalità transitoria dal sensore di vibrazione viene traspunta in un'altra matrice in cui l'intervallo di tempo è inversamente proporzionale al valore corrente della pulsazione. In

Abstract

The article substantiates the importance of diagnosing critical components of rolling stock in order to improve traffic safety and reduce operating and repair costs. Such units include: bearings of axle boxes of wheelsets and traction electric motors, gearboxes of wheel-motor units, gearboxes from the middle part of the axle of passenger cars, electric locomotives, diesel generator sets of locomotives. It is noted that currently the diagnosis of rolling stock units is carried out mainly in stationary modes of operation. The relevance and importance of conducting diagnostics in transient modes is substantiated. Options for diagnosing rotary mechanical assemblies during acceleration and run-out based on vibration and rotational speed signals are considered. In this direction, the authors have proposed two original methods of diagnosis. In the first method, the amplitude values of vibration at characteristic frequencies are analyzed during promotion or run-out and the current values are compared with the threshold values. In the presence of a defect, its characteristic frequency at some point in time coincides with the changing current rotation frequency, while a resonant surge in the vibration amplitude is noted and recorded. In the second method, the data array recorded in the transient mode from the vibration sensor is transposed to another array in which the time interval is inversely proportional to the current value of the rotation frequency. In this case, the rotation frequency is artificially reduced to a single value. Next, the transition to the frequency domain is carried out using the Fourier transform and traditional spectral analysis. The efficiency of using reference models of bearing defects in the frequency domain is noted. Formulas for calcu-

^(*) Professore Associato dell'Università Statale dei Trasporti di Omsk.

^(**) Docente senior dell'Università Statale dei trasporti di Omsk.

^(*) Associate Professor of Omsk State Transport University.

^(**) Senior lecturer of Omsk State Transport University.

questo caso, la pulsazione viene analiticamente ridotta a un singolo valore. Successivamente, la transizione al dominio della frequenza viene eseguita utilizzando la trasformata di Fourier e l'analisi spettrale tradizionale. Si nota l'efficienza dell'utilizzo di modelli di riferimento di difetti dei cuscinetti nel dominio della frequenza. Vengono fornite le formule per il calcolo delle frequenze caratteristiche dei singoli elementi dei cuscinetti volventi. Viene preso in considerazione un esempio di diagnosi dei riduttori utilizzando modelli dinamici di temperatura di riferimento. Questo è noto come metodo promettente di tracciamento della dinamica delle variazioni nei campi di temperatura, per determinare le condizioni tecniche delle boccole durante le prove al banco delle sale montate. È stato stabilito che i gruppi elettrogeni diesel delle locomotive diesel funzionano per un tempo considerevole in modalità transitoria (fino al 50%), durante la quale è più probabile che si verifichino malfunzionamenti. Vi è una mancanza di ricerca in questo settore e una mancanza di implementazioni pratiche. In questa memoria sono presentati i risultati del lavoro di ricerca degli autori sulle locomotive diesel di diverse serie, sull'analisi del lavoro nella dinamica del tratto gas-aria, del gruppo cilindro-pistone di elementi di equipaggiamento diesel e carburante. Per concludere, si presentano i vantaggi e le prospettive degli approcci considerati nella diagnosi dei componenti critici del materiale rotabile.

1. Impostazione del problema

La diagnostica è un elemento necessario della pratica di manutenzione e riparazione del materiale rotabile. Questo vale in larga misura per le locomotive che forniscono forza motrice per i treni. La diagnostica (in conformità con GOST 27518-87) [1] consente di risolvere i problemi di mantenimento del livello di affidabilità stabilito, garantendo i requisiti di sicurezza e l'efficienza operativa delle locomotive.

La diagnostica completa end-to-end dei componenti principali [2] è considerata la più efficiente. La diagnostica end-to-end prevede il monitoraggio dello stato degli oggetti in varie fasi di manutenzione e riparazione, ad esempio la diagnosi dei cuscinetti del motore di trazione (TMB) in un banco di prova come parte di un'unità motore-ruota assemblata (WMU) e la diagnosi sotto una locomotiva.

I componenti principali delle locomotive includono gruppi motore come cuscinetti della boccola, cuscinetti di supporto del motore di trazione, ingranaggi della ruota dentata. Gli azionamenti del generatore sottocarro e i cuscinetti della boccola vengono diagnosticati nella manutenzione dei carri. Nei veicoli ferroviari alimentati elettricamente si tratta di motori di trazione e macchine ausiliarie. Per le locomotive diesel si tratta di un generatore diesel (DG) che include un pistone e un cilindro di un motore diesel, un sistema di flusso del carburante e un condotto di flusso gas-aria.

Quasi tutte le apparecchiature diagnostiche vengono

lating the characteristic frequencies of individual rolling bearing elements are given. An example of diagnosing gearboxes using dynamic reference temperature models is considered. It is noted as a promising method for tracking the dynamics of changes in temperature fields to determine the technical condition of axle boxes during bench tests of wheelsets. It has been established that diesel generator sets of diesel locomotives operate for a considerable time (up to 50%) in transient modes, during which malfunctions are most likely to occur. There is a lack of research in this area and a lack of practical implementations. The results of the authors' research work on diesel locomotives of several series on the analysis of the work in the dynamics of the gas-air tract, the cylinder-piston group of diesel and fuel equipment elements are presented. In conclusion, the advantages and prospects of the considered approaches in the diagnosis of critical components of rolling stock are presented.

1. Setting a problem

Diagnostics is a necessary element of rolling stock maintenance and repair practice. This applies to a great extent to locomotives that provide motive power for trains. Diagnostics (in accordance with GOST 27518-87) [1] enables to solve problems of maintaining the established level of reliability, ensuring safety requirements and operating the efficiency of locomotives.

Comprehensive end-to-end diagnostics of major components [2] is considered the most efficient. End-to-end diagnostics involves object health monitoring at various stages of maintenance and repair; for example, diagnosing traction motor bearings (TMB) at a testing station as part of an assembled wheel motor unit (WMU) and diagnosing under a locomotive.

The major components of locomotives include rotor assemblies such as axle box bearings, traction motor anchor bearings, toothed wheel gearing. Undercar generator drives and axle box bearings are diagnosed in wagon maintenance. In electrically powered railway vehicles these are traction motors and auxiliary machines. For diesel locomotives this is a diesel generator (DG) that includes a piston and a cylinder of a diesel engine, a fuel flow system and a gas-air flow duct.

Almost all diagnostic equipment is used object health monitoring in stationary operating conditions. Thus, during vibration analysis of wheel motor units (WMU) and wheelsets they are rotated and brought to a stationary operating condition by special devices for maintaining rotational frequency stability - this is one of the necessary conditions for successful diagnostics.

From the authors' point of view, dynamic (transient) modes turned out to be unfairly underappreciated in terms of diagnosing rolling stock. From the theory of automatic control it is known that the greatest amount of information (up to 90%) about the properties of an object can be received precisely by analyzing the information obtained in transient modes. Methods for identifying dynamic objects by their transient characteristics are described in detail in scientific studies [3].

utilizzate per il monitoraggio dello stato degli oggetti in condizioni operative stazionarie. Pertanto, durante l'analisi delle vibrazioni, i gruppi motore ruota (WMU) e le sale montate vengono ruotati e portati in una condizione di funzionamento stazionario da dispositivi speciali per mantenere la stabilità della pulsazione - questa è una delle condizioni necessarie per una diagnostica di successo.

Dal punto di vista degli autori, le modalità dinamiche (transitorie) si sono rivelate ingiustamente sottovalutate in termini di diagnosi del materiale rotabile. Dalla teoria del controllo automatico è noto che la maggior quantità di informazioni (fino al 90%) sulle proprietà di un oggetto può essere ricavata proprio analizzando le informazioni ottenute in modalità transitoria. I metodi per identificare gli oggetti dinamici in base alle loro caratteristiche transitorie sono descritti in dettaglio negli studi scientifici [3].

Dall'analisi delle fonti informative a disposizione è emerso che sono poche le pubblicazioni su questo argomento. L'uso pratico delle modalità transitorie dinamiche per la diagnosi del materiale rotabile è sporadico. Tale situazione può essere spiegata da diversi motivi:

- organizzare una modalità transitoria dinamica in un esperimento attivo, di regola, richiede attrezzature aggiuntive (sforzi aggiuntivi) per impostare un effetto di disturbo;
- l'elaborazione e l'analisi delle informazioni ricevute richiedono lo sviluppo di algoritmi e strumenti matematici più complessi;
- la difficoltà di sviluppare criteri per la classificazione delle condizioni tecniche degli oggetti diagnosticati.

Consideriamo le possibili opzioni diagnostiche per le modalità transitorie utilizzando vari parametri fisici.

2. Analisi delle vibrazioni

Una delle poche aziende che sviluppano sistemi di diagnostica delle vibrazioni (VDS) che hanno implementato strumenti per lo studio delle modalità transitorie nel loro complesso software-hardware è INCOTES. Questi sono strumenti universali per fissare varie relazioni in modalità transitoria. Non sono indicati i criteri per valutare lo stato dell'oggetto, i segnali diagnostici e soprattutto i valori di soglia dei parametri analizzati.

Secondo gli specialisti INCOTES, gli strumenti includono:

- il grafico di Bode (Fig. 1), che rappresenta il livello di vibrazione in funzione della pulsazione;
- il grafico (Fig. 2) di Nyquist (il livello di vibrazione in funzione della fase);
- il grafico del livello di vibrazione in funzione del tempo;
- il grafico della pulsazione in funzione del tempo.

The analysis of open information sources showed that there are few publications on this topic. The practical use of dynamic transient modes for diagnosing rolling stock is sporadic. This situation can be explained by several reasons:

- *organizing a dynamic transient mode in an active experiment, as a rule, requires additional equipment (additional efforts) to set a disturbing effect;*
- *processing and analysis of the received information require developing more complex algorithms and more complex mathematical tools;*
- *the difficulty of developing criteria for technical condition grading of diagnosed objects.*

Let us consider possible diagnostic options for transient modes using various physical parameters.

2. Vibration analysis

One of a few companies developing vibration diagnostics system (VDS) that have implemented tools for studying transient modes in their software-hardware complex is INCOTES. These are universal tools for fixing various relations in transient modes. Criteria for assessing the object health, diagnostic signs, and especially threshold values of the analyzed parameters are not given.

According to INCOTES specialists, the tools include:

- *the Bode plot (Fig. 1), which represents the vibration level as a function of rotational frequency;*
- *the Nyquist plot (the vibration level as a function of the phase), Fig. 2;*
- *the graph of the vibration level as a function of time;*
- *the graph of the rotational frequency as a function of time.*

Similar and even wider opportunities for studying transient vibration processes are provided by The Emerson CSI 2140 Machinery Health Analyzer. It is a 24-bit precision vibration analysis device which allows for accurate measurement of vibration frequency (Fig. 3).

The software of this VDS makes it possible to record not only time data like acceleration – rundown, but also the system's response to the delta pulse (delta Dirac function), that is the response to an impact test. The delta function is a generalized function that allows recording a point effect, as well as the volume density of physical magnitudes (mass, charge, intensity of a heat source, force, etc.) concentrated or applied at one point.

The delta function $\delta(x)$ (1) can be written as:

$$\delta(x) = \begin{cases} +\infty, & x = 0, \\ 0, & x \neq 0; \end{cases}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) dx = 1; \quad (1)$$

where δ is the magnitude of the force in Newton (N), x is the time in seconds (s).

Opportunità simili e ancora più ampie per lo studio dei processi di vibrazione transitoria sono fornite dal Emerson CSI 2140 Machinery Health Analyser (Analizzatore dello stato del macchinario). È un dispositivo di analisi delle vibrazioni di precisione a 24 bit che consente una misurazione accurata della pulsazione di vibrazione (Fig. 3).

Il software di questo VDS consente di registrare non solo dati temporali come accelerazione – frenatura, ma anche la risposta del sistema all'impulso (funzione delta di Dirac), ovvero la risposta a un test di impatto. La funzione delta è una funzione generalizzata che consente di registrare un fenomeno puntuale, nonché la densità di volume delle grandezze fisiche concentrate o applicate in un istante (massa, carica, intensità di una fonte di calore, forza, ecc.).

La funzione delta $\delta(x)$ (1) è esprimibile con la relazione:

$$\delta(x) = \begin{cases} +\infty, & x = 0, \\ 0, & x \neq 0; \end{cases}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) dx = 1; \quad (1)$$

dove δ è la grandezza della forza in Newton (N), x è il tempo in secondi (s).

Nell'esempio descritto nell'articolo l'impulso delta è stato creato da un colpo di martello sulla corsa del cuscinetto.

Gli autori hanno condotto alcune ricerche su un banco di prova sperimentale per determinare le caratteristiche diagnostiche di un difetto del cuscinetto dell'asse registrando e analizzando un segnale di vibrazione temporale, come effetto ad una azione di impulso delta (Fig. 4, Fig. 5). Le Fig. 6 e Fig. 7 mostrano, rispettivamente, gli spettri di segnale con corsa interna del cuscinetto non difettosa e difettosa [4].

Gli specialisti di Association VAST Ltd. propongono soluzioni interessanti per l'utilizzo di modalità dinamiche (transitorie) per il monitoraggio delle condizioni dei cuscinetti. (San Pietroburgo) (insieme ai coautori dell'impresa scientifica e produttiva Diavel, Khabarovsk). Queste soluzioni prevedono l'utilizzo di modelli di riferimento in scala reale e sono coperte dal brevetto russo [5].

Gli autori hanno proposto metodi originali per la diagnosi dei gruppi del rotore basati sulle variazioni di vibrazione nelle modalità transitorie (sono state depositate le domande di brevetto).

Il primo metodo analizza nelle modalità transitorie i valori di ampiezza a frequenze tipiche di alcuni difetti, i quali vengono registrati e confrontati con i valori di so-

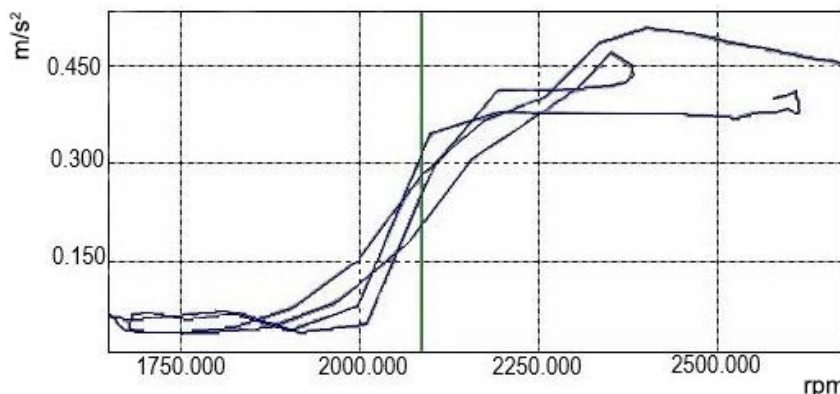


Figura 1 - Il grafico di Bode (il livello di vibrazione in funzione della pulsazione).

Figure 1 - The Bode plot (the vibration level as a function of rotational frequency).

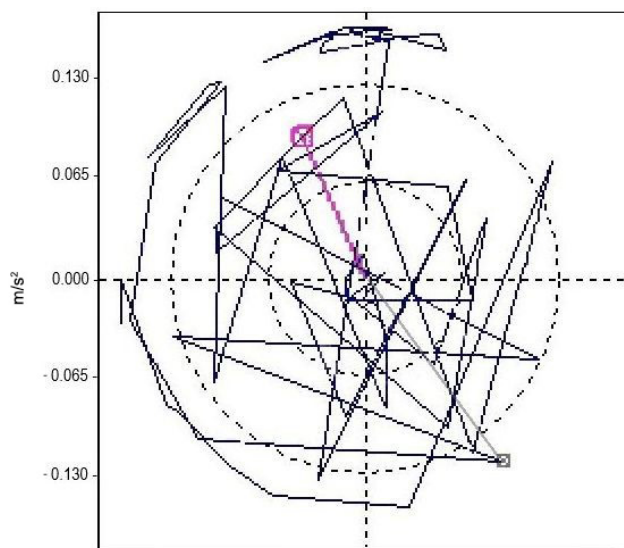


Figura 2 - Il grafico di Nyquist (il livello di vibrazione in funzione della fase).

Figure 2 - The Nyquist plot (the vibration level as a function of the phase).

In the example described in the article the delta pulse was created by a hammer stroke on the bearing race.

The authors carried out some research on an experimental test bench to determine an axle bearing defect diagnostic characteristics by recording and analyzing a time vibration signal, which was a reaction to a delta pulse (Fig. 4, Fig. 5). Fig. 6 and Fig. 7 show, respectively, the signal spectra with nondefective and defective bearing inner race [4].

Interesting solutions for using dynamic (transient) modes for the bearing health monitoring are proposed by the specialists of Association VAST Ltd. (St. Petersburg) (together with the co-authors of the scientific and production enterprise Diavel, Khabarovsk). These solutions involve using full-scale reference models and are covered by the Russian patent [5].



Figura 3 - Emerson CSI 2140 Analizzatore dello stato del macchinario.
Figure 3 - The Emerson CSI 2140 Machinery Health Analyzer.

glia. Quando il meccanismo accelera e frena, la scansione della pulsazione si verifica effettivamente con un effetto di perturbazione. In questo caso, le componenti di pulsazione degli spettri iniziali (istantanei), che sono caratteristiche diagnostiche di difetto, sono in risonanza con la pulsazione corrente o le sue armoniche. Nell'ambito della risonanza, l'ampiezza tipica della pulsazione aumenta bruscamente, il che consente di identificarla tra le componenti di rumore. Dopodiché, il processo diagnostico può essere interrotto senza attendere la diagnosi in condizioni stazionarie. Questa soluzione ridurrà significativamente il tempo di diagnosi totale: ad esempio, di una locomotiva le cui due sezioni hanno 32 o più punti monitorati.

Un altro metodo considera la matrice di dati (un insieme di valori di

The authors proposed original methods for diagnosing rotor assemblies based on vibration changes in transient modes (the applications for inventions were filed).

The first method is that in transient modes the amplitude values at typical frequencies of some defects are recorded and compared with threshold values. When the mechanism accelerates and runs down, frequency scanning actually occurs with a disturbing effect. In this case, the frequency components of the initial (instantaneous) spectra, which are defect diagnostic characteristics, are in resonance with the current rotational frequency or its harmonics. At the moment of resonance, the typical frequency amplitude sharply increases, which makes it possible to identify it among the noise components. After that, the diagnostic process can be stopped without waiting for diagnosing in a steady state. This solution will significantly reduce the total diagnostic time: for example, of a locomotive whose two sections have 32 or more monitored points.

Another method is that the data array (a set of discrete values of vibration signal amplitudes) from the vibration sensor recorded in the transient mode is transposed into another array where the time interval between adjacent discrete values of vibration signal amplitudes Δt is inversely

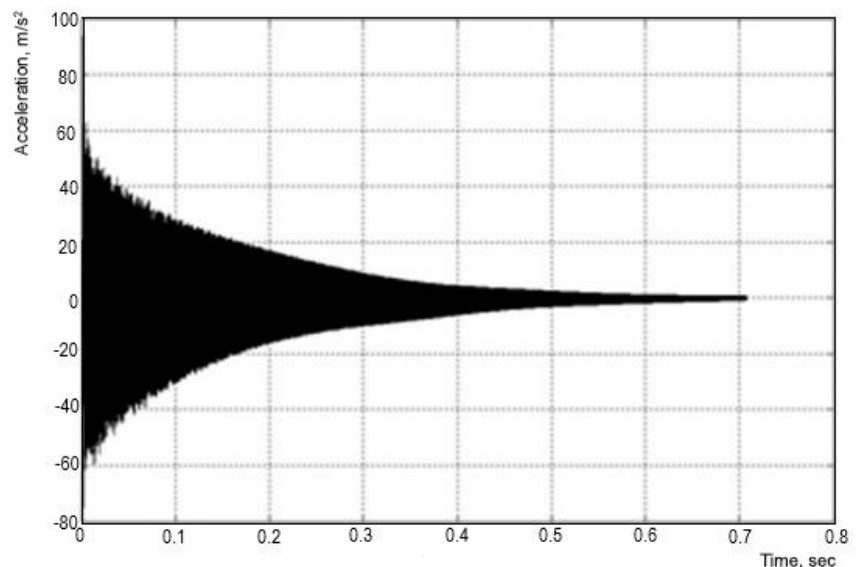


Figura 4 - Segnale di accelerazione come reazione a un impulso δ (anello interno del cuscinetto non difettoso).

Figure 4 - Acceleration signal as a reaction to a δ pulse (nondefective bearing inner race).

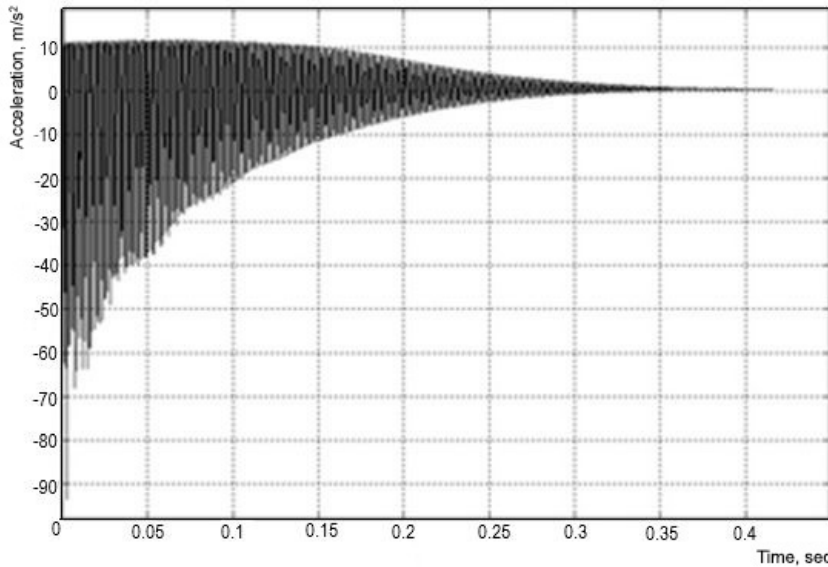


Figura 5 - Segnale di accelerazione come reazione a un impulso delta (anello interno del cuscinetto ammalorato).

Figure 5 - Acceleration signal as a reaction to a delta pulse (cracked bearing inner race).

creti di ampiezze del segnale di vibrazione), dedotti dal sensore di vibrazione e registrata nella modalità transitoria, come trasposta in un'altra matrice, in cui l'intervallo di tempo tra valori discreti adiacenti di ampiezze del segnale di vibrazione Δt è inversamente proporzionale all'attuale valore di pulsazione n corrente. I valori di ampiezza del segnale di vibrazione vengono ricevuti dal sensore di vibrazione sotto forma di tensione elettrica (in mV), in forma sequenziale per la quale Δt è l'intervallo di tempo dopo il quale viene ricevuto ogni segnale successivo, ossia questa è la "l'intervallo" nel tempo tra i campioni di segnale successivi.

$$\Delta t = f(n \text{ current}),$$

$$\Delta t = k/(n \text{ current}); \quad (2)$$

dove *corrente* n – valore corrente di pulsazione;

k – coefficiente di banda di frequenza.

In questo caso, la pulsazione viene analiticamente ridotta a un singolo valore. La matrice trasposta viene espansa nella trasformazione di Fourier, che viene analizzata per le caratteristiche diagnostiche utilizzando algoritmi noti per una condizione stazionaria. Ad esempio, per i cuscinetti volventi è consigliabile effettuare l'analisi dello spettro con scansione nelle frequenze tipiche e il loro spettro armoniche per

proportional to the current rotational frequency value n current. The vibration signal amplitude values are received from the vibration sensor in the form of electric voltage (as mV), the values are received sequentially, Δt is the time interval after which each subsequent signal is received, i.e. this is the "distance" in time between successive signal samples.

$$\Delta t = f(n \text{ current}),$$

$$\Delta t = k/(n \text{ current}); \quad (2)$$

where *n current* – current rotational frequency value;

k – frequency band coefficient.

In this case, the rotational frequency is artificially reduced to a single value. The transposed array is expanded into the Fourier transformation, which is analyzed for the diagnostic characteristics using known algorithms for a steady state. For example, for rolling bearings it is advisable to carry out spectrum analysis with scanning in the typical frequencies and their harmonics spectrum for some bearing elements [6][7][8].

Thus it can be highlighted:

harmonics which are multiple to the roller pass frequency outer race kf_H (kf_H - the typical frequencies values for the bearing outer race defects, where k is the harmonic number (1, 2, 3, 4, ...)), where

$$kf_H = \frac{1}{2}kf_{BP} \left(1 - \frac{d_{rk}}{d_c} \cos(\alpha)\right) Z \quad (3)$$

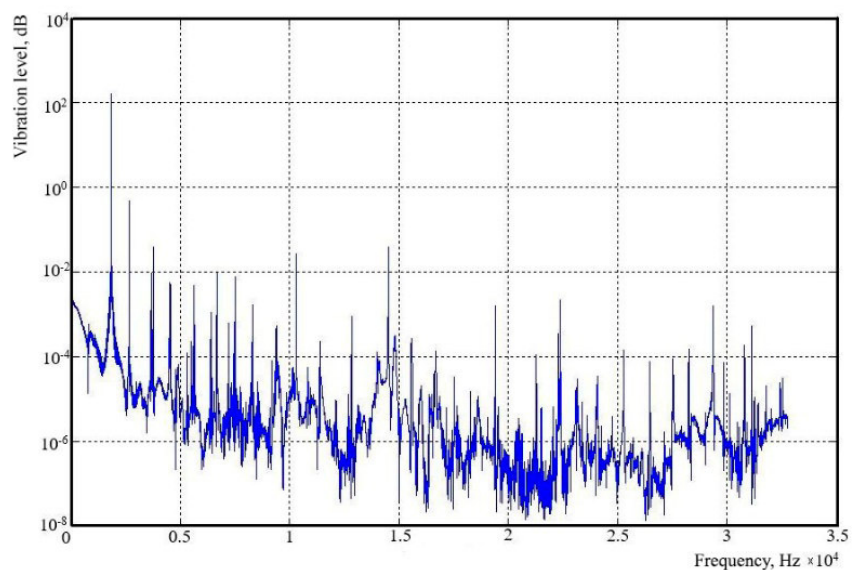


Figura 6 - Spettro del segnale di accelerazione (anello interno del cuscinetto non difettoso).

Figure 6 - Spectrum of acceleration signal taken from a nondefective inner race.

alcuni elementi dei cuscinetti [6] [7] [8].

Si distinguono:

armoniche con frequenze multiple alla frequenza di passaggio del rullo corsa esterna kf_H (kf_H - valori di frequenza tipici per i difetti della corsa esterna del cuscinetto, dove k è il numero d'onda (1, 2, 3, 4, ...)), dove

$$kf_H = \frac{1}{2}kf_{BP} \left(1 - \frac{d_{TK}}{d_c} \cos(\alpha)\right) Z \quad (3)$$

e dove d_{TH} - diametro del rullo, d_c - diametro della gabbia, α - angolo di contatto dei rulli del cuscinetto e delle corse del cuscinetto, Z - numero di rulli in una fila del cuscinetto, k - numero d'onda (numero intero);

armoniche con frequenze che sono multiple alla frequenza di passaggio del rullo corsa interna kf_B , dove

$$kf_B = \frac{1}{2}kf_{BP} \left(1 + \frac{d_{TK}}{d_c} \cos(\alpha)\right) Z; \quad (4)$$

armoniche, con frequenze che sono multiple alla frequenza della gabbia kfc , dove

$$kfc = \frac{1}{2}kf_{BP} \left(1 - \frac{d_{TK}}{d_c} \cos(\alpha)\right); \quad (5)$$

armoniche con frequenze multiple alla frequenza del rullo kf_{TK} , dove

$$kf_{TK} = \frac{1}{2}kf_{BP} \left(1 - \frac{d_{TK}^2}{d_c^2} \cos^2(\alpha)\right). \quad (6)$$

Le equazioni di cui sopra sono modelli di riferimento dei difetti dei cuscinetti volventi nel dominio della frequenza.

3. Diagnostica della temperatura

La temperatura è un'informazione diagnostica che attualmente non è praticamente utilizzata per il monitoraggio delle condizioni del materiale rotabile. Ciò è dovuto al fatto che nella maggior parte dei casi questo parametro non "si adatta" alla tecnologia di riparazione perché la diagnosi richiede molto tempo. Quando si diagnosticano le unità ruota-motore della locomotiva, l'efficienza della diagnosi è uno dei fattori determinanti.

L'analisi delle variazioni di temperatura può essere utilizzata, ad esempio, durante il test e il rodaggio degli ingranaggi della locomotiva dopo la loro riparazione o durante il test degli azionamenti del generatore sottocarro. Ad esempio, è stato implementato un sistema originale per prevedere il valore della temperatura in condizioni stazionarie con un effetto di disturbo costante (ad esempio, quando il meccanismo ruota a una pulsazione costante a

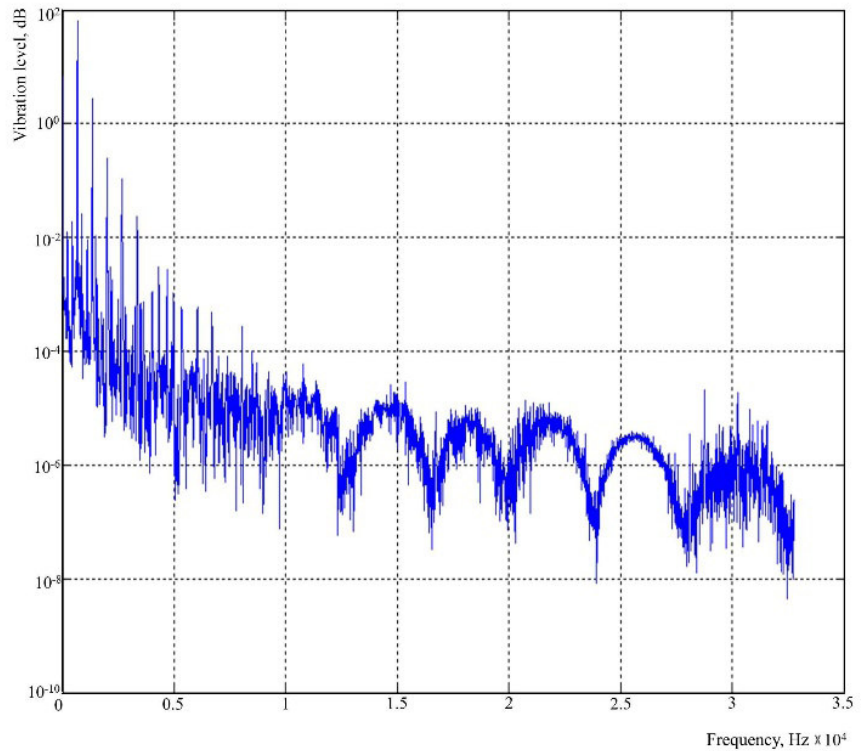


Figura 7 - Spettro del segnale di accelerazione (anello interno del cuscinetto ammalorato).

Figure 7 - Spectrum of acceleration signal taken from the cracked bearing inner race.

and where d_{TH} - roller diameter, d_c - cage diameter, α - contact angle of bearing rollers and bearing races, Z - number of rollers in one row of the bearing, k - harmonic number (whole number);

harmonics with frequencies which are multiple to the roller pass frequency inner race kf_B , where

$$kf_B = \frac{1}{2}kf_{BP} \left(1 + \frac{d_{TK}}{d_c} \cos(\alpha)\right) Z; \quad (4)$$

harmonics, with frequencies which are multiple to the cage frequency kfc , where

$$kfc = \frac{1}{2}kf_{BP} \left(1 - \frac{d_{TK}}{d_c} \cos(\alpha)\right); \quad (5)$$

harmonics with frequencies which are multiple to the roller frequency kf_{TK} , where

$$kf_{TK} = \frac{1}{2}kf_{BP} \left(1 - \frac{d_{TK}^2}{d_c^2} \cos^2(\alpha)\right). \quad (6)$$

The above equations are reference models of rolling bearing defects in the frequency domain.

3. Temperature diagnostics

Temperature is diagnostic information which is not currently practically used for rolling stock health monitoring. This is due to the fact that in most cases this parameter does

perdita di aderenza o a carico costante) con la partecipazione degli autori in un numero di depositi di vetture per passeggeri, per determinare la condizione degli azionamenti del generatore di sottocarro [9].

Il sistema si basa sul monitoraggio delle variazioni derivate della temperatura utilizzando modelli di ingranaggi di temperatura dinamici di riferimento. I modelli di riferimento sono stati formati elaborando i dati sperimentali ottenuti durante le prove al banco (Fig. 8).

Il modello di riferimento è stato costruito facendo la media dei risultati di dieci esperimenti con dieci ingranaggi non difettosi. L'impostazione dell'equazione differenziale matematica basata sui grafici delle modalità transitorie è stata effettuata utilizzando il metodo dell'area con conseguente riduzione dell'ordine delle equazioni differenziali. La pratica ha dimostrato che in questo caso è sufficiente rappresentare il modello come l'elemento dinamico di primo ordine e un elemento di ritardo temporale puro - curva rossa. La curva blu è il grafico della temperatura del dispositivo non difettoso in prova. La coincidenza del grafico alla fine dell'intervallo di tempo conferma la correttezza del modello di riferimento selezionato. Il sistema inizia a emettere il valore di temperatura dell'ingranaggio previsto nel ventesimo minuto dall'inizio del test.

Il sistema consente di ridurre il periodo di prova di quattro o cinque volte nel caso di un ingranaggio difettoso e non solo di ridurre l'intensità di lavoro del processo, ma anche di risparmiare energia elettrica. I lavori iniziali sull'utilizzo di unità di rilevamento termico per monitorare la dinamica del campo termico dei cuscinetti delle boccole sono stati effettuati da diversi anni presso VKM plc a Stary Oskol con risultati positivi.

4. Diagnosi macchine elettriche

Attualmente vengono utilizzati analizzatori diagnostici per determinare le condizioni dell'impianto elettrico della locomotiva, ad esempio di tipo "Doctor", che misurano parametri statici quali resistenza intermedia e di avviamento, resistenza di isolamento, induttanza, capacità.

Per i motori elettrici la diagnostica funzionale si basa solitamente sull'analisi dello spettro delle vibrazioni, sulla corrente di fase e sulla tensione, misurate in condizioni operative stazionarie [10]. I motori elettrici delle locomotive sono azionati in modalità transitoria per un periodo di tempo considerevole. Tali modalità sono caratterizzate da valori delle correnti che possono essere più volte superiori ai valori in condizione di funzionamento stazionario. Di conseguenza, i guasti che possono

not "fit" into the repair technology because it takes long to diagnose. When diagnosing locomotive wheel-motor units, the diagnosis efficiency is one of the determining factors.

Analysis of temperature changes can be used, for example, when testing and running-in of locomotive gears after their repair, or when testing undercar generator drives. For example, an original system for predicting the steady state temperature value with constant disturbing effect (for example, when the mechanism rotates at a constant rotational frequency at loose running or a constant load) was implemented with the participation of the authors in a number of passenger car depots to determine the health of undercar generator drives [9].

The system is based on monitoring temperature derivative changes using reference dynamic temperature gear models. Reference models were formed by processing experimental data obtained during bench tests (Fig. 8).

The reference model was built by averaging the results of ten experiments with ten nondefective gears. Setting up the mathematical differential equation based on the graphs of transient modes was carried out using the area method with subsequent reducing the order of differential equations. Practice has shown that in this case it is sufficient to represent the model as the first-order dynamic element and a pure time delay element - the red curve. The blue curve is the temperature graph of the nondefective under testing. The graph coincidence at the end of the time interval confirms the correctness of the selected reference model. The system begins to issue the predicted gear temperature value in the twentieth minute from the beginning of the test.

The system allows reducing a test period by four or five times in the case of a defective gear and not only reduce the labor intensity of the process, but also save electric power. Initiative work on using thermal imaging units to monitor the thermo field dynamics of axle box bearings has been carried out with positive results for several years at VKM plc in Stary Oskol.

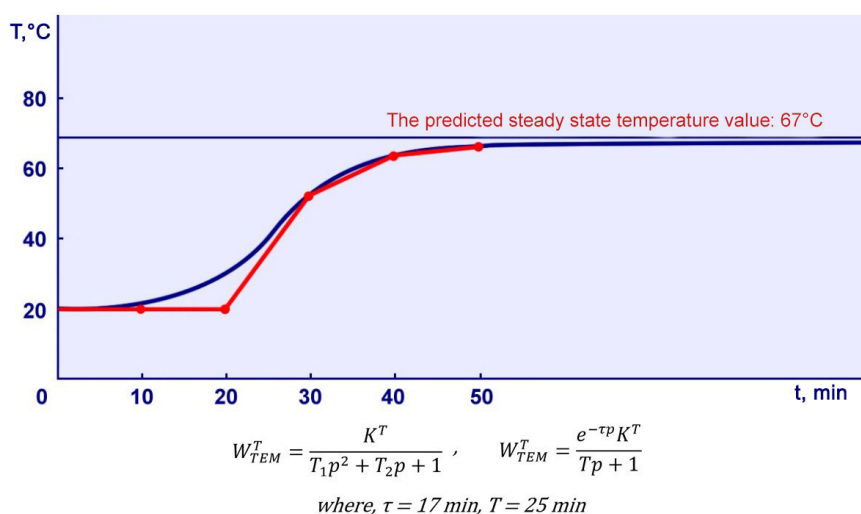


Figura 8 - Modello dinamico di riferimento e temperatura effettiva dell'ingranaggio.

Figure 8 - Reference dynamic model and actual temperature of the gear.

verificarsi durante il funzionamento non possono essere rilevati durante le prove in regime stazionario [11]. Un metodo per la diagnosi delle apparecchiature ad azionamento elettrico basato sulla corrente di consumo in un regime stazionario è fornito nelle opere scientifiche [12]. Gli autori non sono a conoscenza di alcun lavoro dedicato alla ricerca delle modalità dinamiche (transitorie) delle apparecchiature elettriche per il materiale rotabile al fine di diagnosticarlo.

Pertanto, lo sviluppo della diagnosi delle apparecchiature elettriche in funzione consentirà di identificare guasti precedentemente non rilevati o di identificare guasti incipienti.

5. Diagnostica diesel in modalità transitoria

Proprio come i motori elettrici delle locomotive, i generatori diesel (DG) delle locomotive funzionano in modalità transitoria per lunghi periodi. Per le loco di manovra diesel questo periodo è di circa il 50% [11]. La diagnosi e la messa a punto dei motori diesel di tipo locomotore sono regolate ed eseguite presso i laboratori di prova a resistenza determinando i valori dei singoli parametri dei generatori diesel (DG) in condizioni di funzionamento stazionario.

Durante il funzionamento quando si commuta il controller principale, la durata dei processi transitori in un generatore diesel (DG) varia da 15–25 secondi a 6–8 minuti [11]. Lo stesso autore nota l'opportunità di diagnosticare un generatore diesel (DG) in modalità transitoria e afferma che "diagnosticare un motore diesel in modalità instabile durante il funzionamento corrente sembra essere piuttosto difficile".

L'analisi delle fonti di informazione disponibili ha mostrato che il lavoro sullo studio delle modalità dinamiche (transitorie) di un generatore diesel (DG) al fine di diagnosticarlo non è diventato di uso comune sul sistema ferroviario. Lavori di studio scientifico in questo campo in altri settori, ad esempio nella agricoltura, mostra anche che la ricerca viene condotta solo su modelli sperimentali.

Dopo aver condotto la ricerca, gli autori ritengono che l'analisi delle modalità operative dinamiche consenta di effettuare sia una valutazione integrale del funzionamento e dell'allineamento del generatore diesel, sia di rilevare guasti di componenti e assiemi.

Il lavoro sperimentale svolto dagli autori sui generatori diesel (DG) delle locomotive 2TE10, TEM2, TGM4 durante le prove di resistenza ha mostrato la possibilità di implementare sistemi diagnostici basati sull'analisi di vari processi dinamici. Ad esempio, è stato valutato il contributo di ciascun cilindro diesel sulla potenza totale sviluppata, determinando i componenti istantanei dell'accelerazione angolare dell'albero motore (quando ci si sposta da una posizione all'altra). Le informazioni ottenute nello studio, insieme ai segnali di vibrazione analizzati sulle condotte del carburante ad alta pressione e dagli iniettori,

4. Electrical machines diagnosis

At the present time to determine the state of the locomotive electrical system diagnostic analyzers are used, for example, the "Doctor" type, which measure static parameters such as intermediate and starting resistance, insulation resistance, inductance, capacitance.

For electric motors functional diagnostics is usually based on vibration spectrum analysis, phase current and voltage, measured in stationary operating condition [10]. Electric motors of locomotives are operated in transient modes for a considerable amount of time. Such modes are characterized by current values that can be several times higher than the values in stationary operating condition. As a result, faults that may arise under operation cannot be detected during a steady state tests [11]. A method for diagnosing electrically-operated equipment based on consumption current in a steady state is given in the scientific works [12]. The authors are not aware of any works devoted to researching the dynamic (transient) modes of electric equipment for rolling stock in order to diagnose it.

Thus, the development of diagnosing electrical equipment under operation will make it possible to identify previously undetected faults or identify incipient faults.

5. Diesel diagnostics in transient modes

Just like electric motors of locomotives, diesel generators (DG) of diesel locomotives operate in transient modes for long periods. For diesel shunters this period is about 50% [11]. Diagnosing and tuning locomotive-type diesel engines are regulated and carried out at resistance test stations by determining the values of the individual parameters of diesel generators (DG) in stationary operating condition.

Under operating when switching the principal controller the duration of transient processes in a diesel generator (DG) varies from 15–25 seconds to 6–8 minutes [11]. The same author notes the expediency of diagnosing a diesel generator (DG) in transient modes and states that "diagnosing a diesel engine in an unsteady-state mode during current operation seems to be quite difficult."

The analysis of available information sources showed that work on studying the dynamic (transient) modes of a diesel generator (DG) in order to diagnose it has not become common use on the railway system. Studying scientific work in this area in other industries, for example, in agriculture, also shows that research is being conducted on experimental models only.

After conducting the research the authors believe that analyzing dynamic operating modes makes it possible to carry out both an integral assessment of the diesel generator operation and alignment and to detect faults in components and assemblies.

Experimental work carried out by the authors on diesel generators (DG) of diesel locomotives 2TE10, TEM2, TGM4 during resistance tests showed the possibility of implementing diagnostic systems based on the analysis of various

consentono di rilevare il guasto e identificarlo (si tratta di un gruppo cilindro-pistone che indica un cilindro specifico o elementi del sistema di alimentazione). I dettagli e i risultati del lavoro sperimentale non sono forniti in questa sede, in quanto sono oggetto di discussione in un articolo separato.

Gli esperimenti per studiare i processi transitori nel condotto di flusso gas-aria (GAFD) della locomotiva diesel 2TE10 hanno permesso di creare il suo modello matematico per il parametro del flusso d'aria come sistema dinamico di secondo ordine con la seguente funzione di trasferimento:

$$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1} \quad (7)$$

dove:

p – l'operatore Laplace,

T – costante di tempo,

k – coefficiente di trasferimento,

ξ – coefficiente di smorzamento.

L'utilizzo di un modello ottenuto sulla base di dati empirici consente di affinare o correggere modelli matematici creati per valutare le condizioni del condotto di flusso gas-aria dei motori di locomotive diesel [13].

Gli autori considerano appropriato e promettente lo sviluppo e l'utilizzo di sistemi diagnostici per modalità transitorie basati su modelli di riferimento. Questo approccio consentirà non solo di rilevare condizioni operative inammissibili e identificare i guasti, ma creerà anche i prerequisiti per l'implementazione di sistemi di messa a punto automatici. Un approccio simile è stato testato dagli autori in esperimenti modello sulla messa a punto dei regolatori del carburante per motori aeronautici [14] [15], che è stato ulteriormente sviluppato [16].

6. Conclusioni

Pertanto, l'uso di modalità transitorie (dinamiche) nella diagnosi dei principali componenti del materiale rotabile ridurrà i costi di manutenzione e riparazione, aumenterà il livello di prestazioni dei componenti e aumenterà la disponibilità delle locomotive.

Tale approccio dovrebbe essere considerato promettente, soprattutto se si tiene conto del livello di sviluppo della tecnologia digitale e dei moderni metodi matematici di elaborazione dei dati.

dynamic processes. For example, the contribution of each diesel cylinder to the total developed power was assessed by determining the instantaneous components of the angular acceleration of the crankshaft (when moving from one position to another). The information obtained in the study, together with the analyzing vibration signals from high-pressure fuel pipes and injectors, makes it possible to detect the fault (either it is a cylinder-piston group indicating a specific cylinder or fuel system elements) and identify it. The details and results of the experimental work are not given here, as they are a subject for discussion in a separate article.

Experiments to study transient processes in the gas-air flow duct (GAFD) of the 2TE10 diesel locomotive made it possible to create its mathematical model for the air flow parameter as a second-order dynamic system with a transfer function:

$$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1} \quad (7)$$

where:

p – the Laplace operator,

T – time constant,

k – transfer coefficient,

ξ – damp coefficient.

Using a model obtained on the basis of empirical data allows to refine or correct mathematical models created to assess the health of the gas-air flow duct of diesel locomotive engines [13].

The authors consider developing and using diagnostic systems for transient modes which are based on reference models to be appropriate and promising. This approach will allow not only to detect inadmissible operating conditions and identify faults, but will also create the prerequisites for implementing automatic tuning systems. A similar approach was tested by the authors in model experiments on tuning fuel regulators for aircraft engines [14][15], which was further developed [16].

6. Conclusion

Thus, using transient (dynamic) modes when diagnosing major components of rolling stock will reduce maintenance and repair costs, increase the level of performance of components and increase the availability of locomotives.

This approach should be considered promising, especially if taking into account the developmental level of digital technology and modern mathematical methods of information data processing.

BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] GOST 27518-87. Product diagnostics. General requirements. Moscow.: Standartinform, 2009.
- [2] TETTER V.YU., MOLCHANOV V.V., GOLOVASH A.N., SMIRNOV V.A. (2004), "End-to-end monitoring and diagnosing wheel-motor units of rolling stock // Scientific and technical conference proceedings "Increasing the service life of traction motors"". – VNIIZHT, Moscow.

- [3] KONOVALOV V.I. (2010), *"System diagnostics and identification: educational aid: Tomsk Polytechnic University"*. Tomsk. p. 163.
- [4] COMBET F., THOMAS X. (2023), *"Modelling and diagnosis of a crack of a bearing inner ring. Surveillance, Vibrations, Shock and Noise"*, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace [ISAE- SUPAERO], Jul., Toulouse, France. hal-04179598
- [5] RYABTSUN A.A., BARKOV A.V., RYABTSUN S.A., *"The method of vibration diagnostics for rolling bearings and the equipment for its implementation"*: patent N. 2336512 Russian Federation: MPK G01M13/04.
- [6] BARKOV A.V., BARKOVA N.A., AZOVCEV A.YU. (2012), *"Rotary machines vibration monitoring and diagnosing"*. St Petersburg.
- [7] BARKOV A.V., BARKOVA N.A., MITCHELL J.S. (1995), *"Condition Assessment and Life Prediction of Rolling Element Bearings"*. Part 1 // Sound and Vibration. - N 6. - P. 10-17.
- [8] BARKOV A.V., BARKOVA N.A., MITCHELL J.S. (1995), *"Condition Assessment and Life Prediction of Rolling Element Bearings"*. Part 2 // Sound and Vibration. - N 9. - P. 27-31.
- [9] TETTER V.YU., BUYALSKII A.L. (2000), *"Measuring and predicting dynamic temperature of rotor mechanisms. Basic and applied researches"*. Scientific and technical conference proceedings / Ural State Transport University. Ekaterinburg. Part 1].
- [10] CHERNOV D.V. Functional diagnostics of induction motors in transient modes: Ph.D. thesis: 05.11.01: Ulyanovsk, 2005. p.129.
- [11] NAGOVITSYN V.S. (2004), *"Rolling stock health monitoring system based on information technology"*. Moscow: VINITI, 2004. p. 246.
- [12] BARKOV A.V., BARKOVA N.A., BORISOV A.A., FEDORISHCHEV V.V., GRISHCHENKO D.V. (2012), *"The current diagnostic technique of motor-operated mechanisms"*. St Petersburg.
- [13] TITANKOV D.A. (2005), *"Gas-air flow duct health monitoring in diesel locomotive engines"*. Ph.D. thesis 05.22.07: Omsk. p.173.
- [14] TETTER V. YU., SHENDALEVA E. V., *"The method of testing the fuel regulator of a gas turbine driver and the equipment for its implementation"*, 1515889 USSR, MGZh G 01M 15/00.
- [15] TETTER V. YU., SHENDALEVA E. V., *"The test bench for a fuel regulator of the automatic gas turbine driver control system"*.
- [16] SHENDALEVA E.V. (2002), *"Developing and researching a multi-purpose simulation test bench for automatic control systems for small gas turbine drivers"*: Ph.D. thesis: 05.07.07: Omsk. p.253.