

УДК 519.2

С. А. ГАВРИЛОВ, Н. Н. ИШИН, А. М. ГОМАН, А. С. СКОРОХОДОВ

ВИБРОМОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПЛАНЕТАРНЫХ РЕДУКТОРОВ

Вирішуться завдання пошуку ознак зміни технічного стану зубчастих коліс планетарної зубчастої передачі, використовуваних при вібродіагностики. Наведено результати досліджень віброактивності редуктора мотор–колеса самоскида БЕЛАЗ в експлуатаційних умовах. Пропоновані в якості критеріїв оцінки технічного стану елементів редуктора дискримінанти однозначно залежать від стану зубчастих коліс і можуть бути використані при вібромоніторингу технічного стану планетарних редукторів мобільних машин.

Ключові слова: планетарний редуктор, зубчаста передача, вібрація, спектр, синхронне усереднення, діагностика, дискримінант.

Решается задача поиска признаков изменения технического состояния зубчатых колес планетарной зубчатой передачи, используемых при вибродиагностике. Приведены результаты исследований виброактивности редуктора мотор–колеса самосвала БЕЛАЗ в эксплуатационных условиях. Предлагаемые в качестве критериев оценки технического состояния элементов редуктора дискриминанты однозначно зависят от состояния зубчатых колес и могут быть использованы при вибромониторинге технического состояния планетарных редукторов мобильных машин.

Ключевые слова: планетарный редуктор, зубчатая передача, вибрация, спектр, синхронное усреднение, диагностика, дискриминант.

The problem of search of signs of change of a technical condition of gear wheels of the planetary gear transmission used in vibration diagnostics. The results of studies of vibratory activity of the gear motor–wheel dump truck BELAZ operating conditions. Proposed as criteria for the assessment of technical condition of gear unit components, discriminants are uniquely dependent on the condition of gear wheels and can be used in the vibration monitoring of the technical condition of the planetary gear units of mobile machines.

Keywords: planetary reducer, gear, vibration, spectrum, synchronous averaging, diagnostics, discriminant.

Введение. Актуальность задачи. Одной из основных задач при вибродиагностике планетарных редукторных систем в условиях эксплуатации является выявление зарождающихся дефектов отдельных элементов механизма. Для оценки состояния редуктора в целом в качестве диагностического признака можно использовать общий уровень вибрации, но необходимость детализации вида неисправностей заставляет применять более чувствительные характеристики виброакустических процессов [1]. Наиболее простой путь – применение спектрального анализа, получившего широкое распространение в системах виброакустического контроля механизмов [2].

Однако специфика кинематики планетарных редукторов, особенно многоступенчатых, приводят к получению чрезвычайно насыщенных информативными частотами узкополосных спектров. Если же проводится диагностика трансмиссии мобильной машины в условиях эксплуатации, спектры вибрации будут также содержать составляющие, вызванные колебаниями не только всех ее узлов, но и колебаниями самой машины при движении по неровностям и т.д. В результате анализ таких спектров становится трудноразрешимой проблемой.

Таким образом, необходимость поиска надежных признаков изменения технического состояния элементов зубчатых передач планетарных рядов является, несомненно, весьма актуальной задачей.

Анализ проблемы. Постановка задачи. Суммарный сигнал, воспринимаемый вибродатчиком, установленным на корпусе переборного редуктора, в простейшем случае состоит из трех компонент (рис. 1, а) [1]. При появлении поврежденных контактирующих поверхностей зубьев возникает амплитудная модуляция колебаний с частотой вращения дефектного колеса ω_1 .

Особенностью планетарной передачи является циклическое перемещение точек приложения сил в зацеплении относительно датчика, установленного на неподвижном корпусе редуктора, что создает дополнительную помеху в виде балансной амплитудной модуляции с частотой ω_2 перемещения источника возмущения в пространстве относительно датчика. Результирующий сигнал, воспринимаемый вибродатчиком, установленным на корпусе планетарного редуктора, для

того же локального дефекта контактирующих поверхностей в простейшем случае состоит из девяти компонент (рис. 1, б) с частотами $(\omega_z \pm \omega_1)$ и $(\omega_z \pm \omega_2 \pm \omega_1)$ [1].

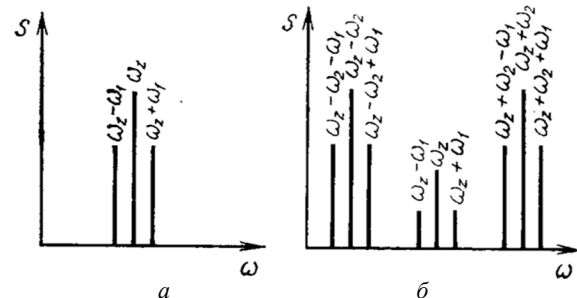


Рис. 1 – Спектр вибраций корпуса редуктора в окрестности зубцовой частоты при наличии локальных дефектов контактирующих поверхностей [1]:

а – переборный редуктор; б – планетарный редуктор

Таким образом, с учетом полигармонического характера модулирующего воздействия и сложности кинематической схемы, сигнал, воспринимаемый вибродатчиком, установленным на корпусе планетарного редуктора, может содержать следующие частотные компоненты: ω_z , $(\omega_z \pm k\omega_1)$ и $(\omega_z \pm l\omega_2 \pm k\omega_1)$ где $k, l = 1, 2, 3, \dots$

Кроме того, при диагностировании планетарного редуктора в условиях движения машины будет иметь место модуляция из-за непостоянства частоты вращения вала за время проведения замера (рис. 2), что вызовет получение дополнительного набора компонент с частотами $(\omega_z \pm m\omega_3)$, которые также модулируются в свою очередь частотами ω_1 и ω_2 .

Проведем для примера расчет вынужденных частот 1-го планетарного ряда (число зубьев солнечной шестерни $z_1 = 21$, сателлитов $z_2 = 47$, коронной шестерни $z_3 = 117$) редуктора мотор–колеса (РМК) самосвала БЕЛАЗ грузоподъемностью 130 тонн при его движении со скоростью $v \approx 16$ км/ч, рекомендуемой для транспортировки груза (табл. 1) [3]. Пример реального спектра РМК приведен на рис. 3.

Как расчет, так и измерения показывают, что кроме основной зубцовой частоты $f_{z1} \approx 274$ Гц, наблюдается на спектре (даже при $k, l, m = 1$) сплошной ряд частотных составляющих в диапазоне 250...300 Гц (рис. 3).

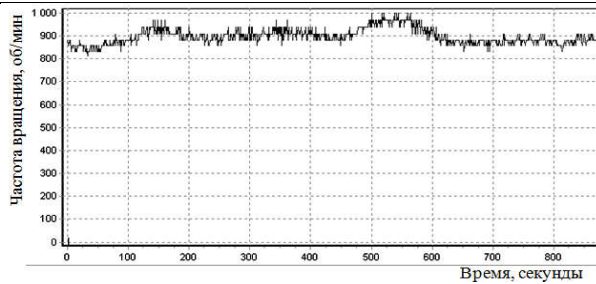


Рис. 2 – Колебания частоты вращения вала электродвигателя самосвала БЕЛАЗ

Таблица 1 – Расчет вынужденных частот 1-го планетарного ряда РМК самосвала БЕЛАЗ

Частоты 1-го планетарного ряда РМК	Обозначение	Значение*, Гц
Вращения вала эл/двигателя (894 мин ⁻¹)	f_0	15
Зубцовая 1-го планетарного ряда	f_{z1}	274
Вращения вала солнца (относительно водила)	f_1	13
Вращения сателлита (относительно водила)	f_2	6
Вращения короны (относительно водила)	f_3	2
Вращения водила	f_4	2
Допустимое колебание частоты вала э/дв ± 15 %	Δf_0	2
Допустимое колебание частоты вала солнца	Δf_1	2
Допустимое колебание частоты вала сателлита	Δf_2	1

* Значения частот округлены в расчете на разрешающую способность анализатора $\Delta f = 1$ Гц

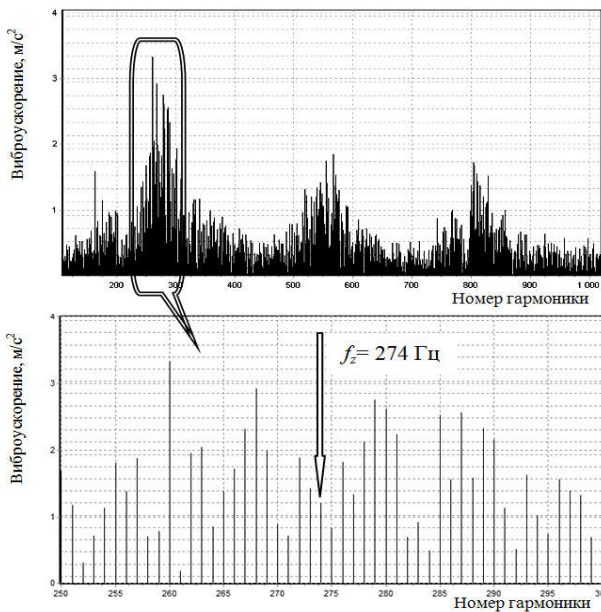


Рис. 3 – Узкополосный спектр РМК самосвала БЕЛАЗ в районе зубцовой частоты 1-го планетарного ряда

Анализ подобных узкополосных спектров механизмов планетарного типа вызывает значительные затруднения как при ручной обработке данных, так и при попытке автоматизировать данный процесс. Следовательно, необходимо разрабатывать методы, которые позволят упростить задачу вибродиагностики планетарных редукторов, особенно в автоматическом режиме.

Результаты исследований. Опыт использования разработанной в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси системы вибромониторинга редукторов мотор-колес (СВМ-РМК-611) показал, что применение для обработки результатов измерений вибрации алгоритма синхронного усреднения способствует выделению периодических составляющих вынужденных колебаний диагностируемого узла на фоне собственных колебаний механизма и вынужденных колеба-

ний других узлов. Улучшения отношения сигнал/помеха в этом случае удастся добиться выделением составляющих гармонического ряда, связанных с кинематикой диагностируемого узла. При этом частота вращения каждого вала редуктора является образующей для целого гармонического ряда, содержащего, в частности, характерные частоты зубчатых пар, что позволяет выделять из временного сигнала виброускорений составляющие, характеризующие отдельные элементы планетарного редуктора и отдельно диагностировать состояние солнечных шестерен, сателлитов и коронных шестерен [4].

Проведенный в Полтавском ГОК вибромониторинг состояния РМК нескольких 130-тонных самосвалов БЕЛАЗ в эксплуатационных условиях показал, что анализ изменения среднего квадратического значения (СКЗ) виброускорений и ПИК-фактора позволяет уверенно судить о состоянии редуктора в целом. Графики изменения этих параметров в зависимости от пробега для одного из РМК приведены на рис. 4. Полученные зависимости показывают, что редуктор находится в предаварийном состоянии.

Наряду с замерах СКЗ и ПИК-фактора, проводился также анализ гармонических спектров всех зубчатых колес РМК.

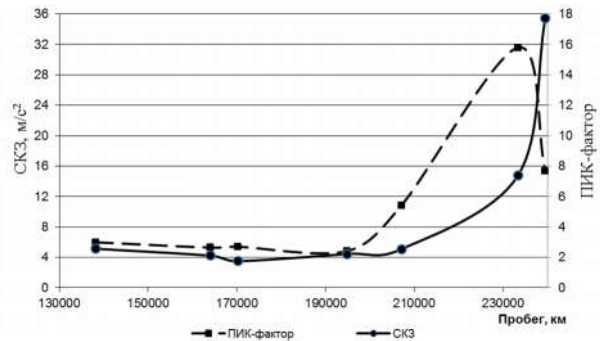


Рис. 4 – СКЗ и ПИК-фактор РМК самосвала БЕЛАЗ

Мониторинг спектров показал, что наиболее активный рост зубцовой и кратных ей составляющих наблюдался у солнечной шестерни и сателлитов 2-го планетарного ряда РМК. Так, на рис. 5 в качестве примера приведены гармонические спектры вала солнечной шестерни 2-го планетарного ряда РМК, полученные при различных значениях пробега самосвала.

На спектрах наблюдается ряд гармоник, характерных для установленной на нем солнечной шестерни с числом зубьев $z = 22$ (гармоники №№ 22, 44, 66, 88 и 110 зубцовой f_z и кратных ей частот $2f_z, 3f_z, 4f_z$ и $5f_z$).

Результаты обработки приведенных на рисунке 5 спектров с определением величин зубцовых составляющих S_{fz} , а также обобщенных показателей вибрации (размерного (1) и безразмерного (2) дискриминантов) приведены в табл. 2 и на рис. 6.

$$S_{fz} = \sqrt{\sum_{k=1}^N S_{kfz}^2}; \quad (1) \quad \beta_{fz} = \frac{(S_{fz} - S_{fz0})}{S_{fz0}}, \quad (2)$$

где S_{fz0} – значение S_{fz} во время начала мониторинга.

Анализ полученных данных показывает, что не все амплитуды гармонических составляющих, кратных зубцовой частоте f_z , стабильно возрастают с ростом величины пробега. Постоянную тенденцию к росту показали в данном примере только гармоники $3f_z$ и $4f_z$. В связи с этим для мониторинга состояния зубчатых пар лучше пользоваться комплексными показателями – дискриминантами [1, 5], например, (1) или (2).

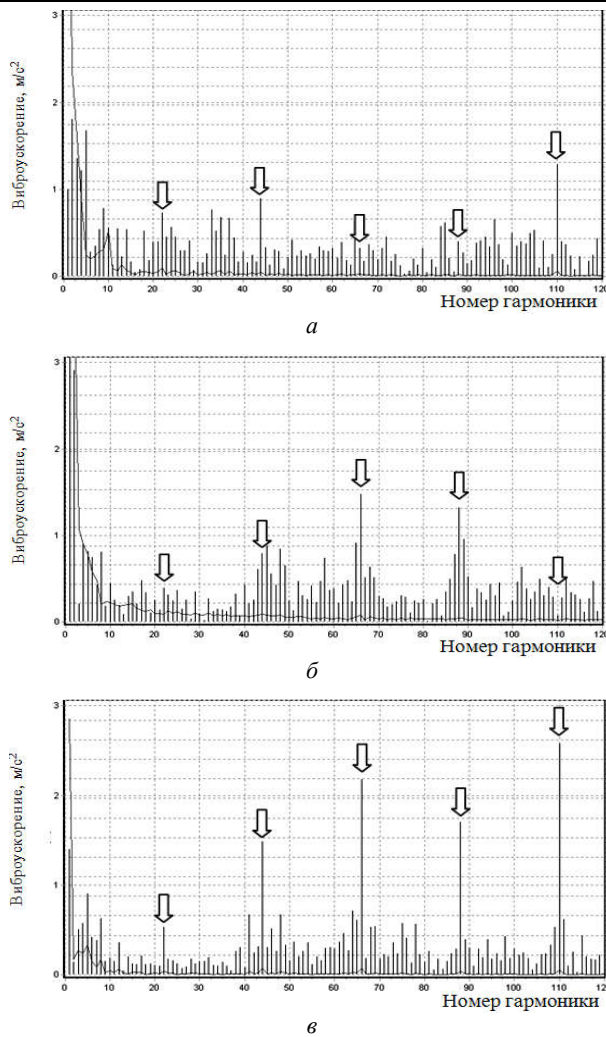


Рис. 5 – Гармонические спектры вибрации вала солнечной шестерни 2-го ряда РМК в зависимости от пробега
Пробег самосвала:
а – 164044 км; б – 194809 км; в – 233357 км

Таблица 2 – Амплитуды гармонических составляющих и обобщенных показателей вибрации солнечной шестерни 2-го планетарного ряда РМК в зависимости от пробега самосвала

Пробег, км	Амплитуды гармоник, м/с ²					Дискриминанты	
	S_{1f_z}	S_{2f_z}	S_{3f_z}	S_{4f_z}	S_{5f_z}	S_{f_z} , м/с ²	β_{f_z}
164044	0,70	0,85	0,30	0,35	1,4	1,84	0
194809	0,40	0,75	1,50	1,40	0,20	2,23	0,21
233357	0,50	1,50	2,25	1,75	2,60	4,17	1,27

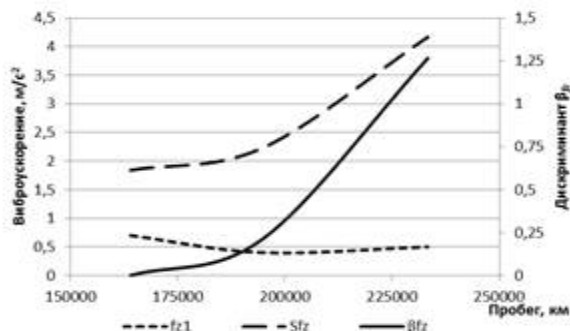


Рис. 6 – Тенденции роста гармонических составляющих и дискриминантов в зависимости от пробега самосвала

Причем использование размерного дискриминанта (1) также имеет определенные недостатки. Так, для зубчатых колес 1-го ряда РМК абсолютная величина S_{f_z} значи-

тельно больше, чем для зубчатых колес 2-го ряда, а значение S_{f_z} для находящихся в зацеплении солнечной шестерни и сателлитов 2-го ряда мало отличаются как по величине, так и по степени возрастания с ростом пробега (рис. 7, а).

Указанных недостатков лишено безразмерный дискриминант β_{f_z} , использование которого наиболее удобно для мониторинга состояния зубчатых пар РМК (рис. 7, б).

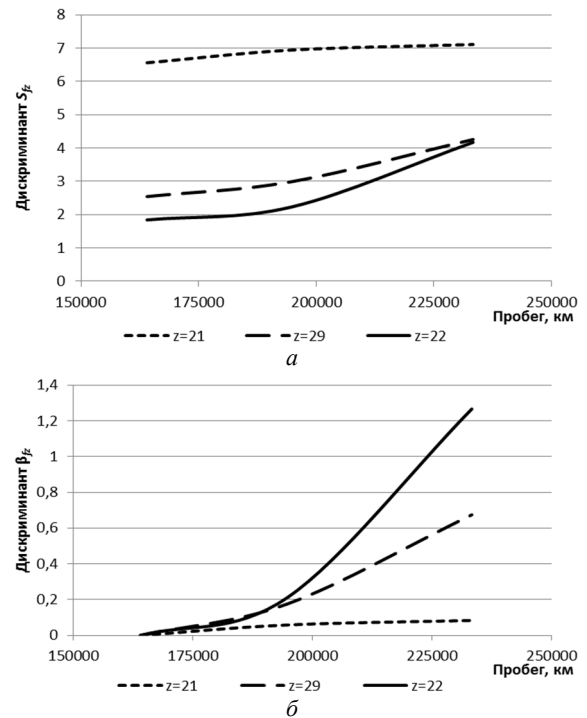


Рис. 7 – Тенденции роста дискриминантов в зависимости от пробега самосвала
а – дискриминант S_{f_z} ; б – дискриминант β_{f_z}

Еще одним показателем, позволяющим определить наиболее критичный с точки зрения выхода из строя элемент редуктора, является наличие на гармонических спектрах амплитудной модуляции колебаний с частотой вращения дефектного колеса. Появление данных боковых гармоник достаточно хорошо на спектрах при большом пробеге самосвала.

Пример ярко выраженной амплитудной модуляции с частотой вращения дефектного колеса приведен на рис. 8 для гармоники $3f_z$ солнечной шестерни 2-го ряда РМК.

На рисунке хорошо видны боковые частоты $3f_z \pm k f_{об}$, $k = 1 \dots 4$. Разборка данного редуктора подтвердила предположения о своевременности проведения ремонтных работ в связи с критическим износом солнечной шестерни второго ряда РМК.

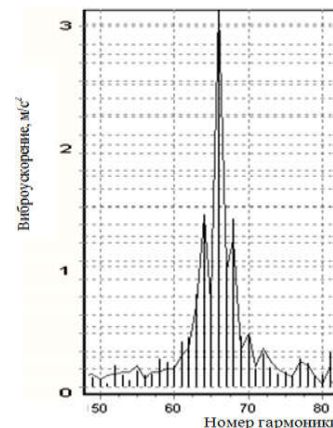


Рис. 8 – Гармонический спектр солнечной шестерни 2-го ряда РМК в районе гармоники $3f_z$

Выводы:

1. Использование узкополосных спектров вибрации для мониторинга технического состояния и диагностики редукторных планетарных редукторов мобильных машин сопряжено со значительными трудностями при обработке данных и проведении их анализа.

2. Применение метода синхронного усреднения и наиболее чувствительных к изменению технического состояния критериев (дискриминантов) значительно упрощает анализ данных вибромониторинга и может быть использован при автоматизированной диагностике отдельных зубчатых пар планетарных редукторов.

Список литературы

1. Генкин, М. Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М. Д. Генкин, А. Г. Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
2. Русов, В. А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам / В. А. Русов. – Пермь: Виброцентр, 1996. – 176 с.
3. Комплексный контроль и повышение качества зубчатых приводных механизмов для машиностроения. Методические рекомендации / О. В. Берестнев [и др.]. – Минск: БелГИСС, 2009. – 115 с.
4. Ишин, Н. Н. Применение метода синхронного накопления при вибродиагностике зубчатых передач в условиях эксплуатации / Н. Н. Ишин, А. М. Гоман, А. С. Скороходов, С. А. Гаврилов // Вестник Национального Технического университета "ХПИ". Збірник нау-

кових праць. Серія: Проблеми механічного приводу – X. : НТУ "ХПИ". – № 31 (2014). – С. 53–56.

5. Максимов, В. П. Измерение, обработка и анализ быстропеременных процессов в машинах / В. П. Максимов. – М.: Машиностроение. – 1987. – 208 с.

References (transliterated)

1. Genkin M. D., Sokolova A. G. *Vibroakusticheskaya diagnostika mashin i mekhanizmov* [Vibroacoustic diagnostics of machines and mechanisms]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1987. 288 p.
2. Rusov V. A. *Diagnostika defektov vrashchayushchegosya oborudovaniya po vibratsionnym signalam* [Diagnostics of defects of rotating equipment by vibration signals]. Perm, Vibrotsentr, Publ., 1996. 176 p.
3. Berestnev O. V., [et al.] *Kompleksnyj kontrol i povyshenie kachestva zubchatykh privodnykh mekhanizmov dlya mashinostroeniya. Metodicheskie rekomendatsii* [Complex control and improvement of the quality of gear drives for mechanical engineering. Guidelines]. Minsk, BelGISS, 2009. 115 p.
4. Ishin N. N., Goman A. M., Skorokhodov A. S., Gavrilov S. A. *Primeneniye metoda sinkhronnogo nakopleniya pri vibrodiagnostike zubchatykh peredach v usloviyakh ekspluatatsii* [The application of the method of synchronous accumulation during vibrodiagnostics of gears under operating conditions]. Visnik Natsional'nogo Tekhnichnogo universitetu "KHPI". Zbirk naukovikh prats'. Seriya: Problemi mekhanichnogo privodu [Bulletin of National Technical University "KHPI". The collection of scientific works. Series: Problems mechanical drive]. Kharkiv, 2014, no 31, pp. 53–56.
5. Maksimov V. P. *Izmerenie, obrabotka i analiz bystroperemennykh processov v mashinah* [Measurement, processing and analysis of fast-changing processes in machines]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1987. 208 p.

Поступила (received) 28.03.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вибромониторинг технічного стану зубчастих коліс планетарних редукторів / С. О. Гаврилов, М. М. Ишин, А. М. Гоман, А. С. Скороходов // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Проблеми механічного приводу. – X. : НТУ "ХПИ", 2017. – № 25 (1247). – С. 25–28. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0791.

Вибромониторинг технического состояния зубчатых колес планетарных редукторов / С. А. Гаврилов, Н. Н. Ишин, А. М. Гоман, А. С. Скороходов // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Проблеми механічного приводу. – X. : НТУ "ХПИ", 2017. – № 25 (1247). – С. 25–28. – Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0791.

The vibration condition monitoring of gears of planetary gearboxes / S. A. Gavrilov, N. N. Ishin, A. M. Goman, A. S. Skorokhodov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problem of mechanical drive. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 25 (1247). – P. 25–28. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0791.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гаврилов Сергій Олексійович – кандидат технічних наук, директор ПСП "Полтава-Автокомплект", м. Комсомольськ Полтавської обл., тел.: +38-05348-33832; e-mail: p.avtokomplekt@ukr.net.

Гаврилов Сергей Алексеевич – кандидат технических наук, директор ПСП "Полтава-Автокомплект", г. Комсомольск Полтавской обл., тел.: +38-05348-33832; e-mail: p.avtokomplekt@ukr.net.

Gavrilov Sergey Alekseevich – Candidate of Technical Sciences, Director PSP "Poltava-avtokomplekt", Komso-molsk Poltavskoj obl., tel.: +38-05348-33832; e-mail: p.avtokomplekt@ukr.net.

Ишин Николай Николаевич – доктор технічних наук, доцент, Об'єднаний інститут машинобудування НАН Білорусі, директор Науково-технічного центру "Кар'єрна техніка", м. Мінськ, Білорусь; тел.: (8017) 284-29-12; e-mail: nik_ishin@mail.ru.

Ишин Николай Николаевич – доктор технических наук, доцент, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, директор Научно-технического центра "Карьерная техника", г. Минск, Беларусь; тел.: (8017) 284-29-12; e-mail: nik_ishin@mail.ru.

Ishin Nikolay Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Docent, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Director of Scientific and Technical Center of Quarry Machinery, Minsk, Belarus, tel.: (8017) 284-29-12; e-mail: nik_ishin@mail.ru.

Гоман Аркадій Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, Об'єднаний інститут машинобудування НАН Білорусі, начальник відділу, м. Мінськ, Білорусь; тел.: (8017) 284-24-48.

Гоман Аркадий Михайлович – кандидат технических наук, доцент, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, начальник отдела, г. Минск, Беларусь; тел.: (8017) 284-24-48.

Goman Arkadiy Mikhailovich – Candidate of Technical Sciences, Docent, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Head of Department, Minsk, Belarus, tel.: (8017) 284-24-48.

Скороходов Андрій Станіславович – кандидат технічних наук, Об'єднаний інститут машинобудування НАН Білорусі, провідний науковий співробітник, м. Мінськ, Білорусь; тел.: (8017) 284-24-48.

Скороходов Андрей Станиславович – кандидат технических наук, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, ведущий научный сотрудник, г. Минск, Беларусь; тел.: (8017) 284-24-48.

Skorokhodov Andrey Stanislavovich – Candidate of Technical Sciences, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Leading Research Scientist, Minsk, Belarus, tel.: (8017) 284-24-48.