

Проанализировав фрагменты спектров акустического сигнала на рисунках 6–7, видно, что наиболее чувствительной к изменению уровня масла и уровня нагрузки на выходном валу является составляющая f_z . Также можно утверждать, что с увеличением амплитуды одной из значимых частотных составляющих f_z не происходит симметричного увеличения амплитуд комбинированных частот $f_{z \pm 5f_0}$. Этот факт напрямую повлиял на корректную работу используемой нейросетевой модели, т. е. происходила некорректная классификация предоставляемого для анализа набора данных по ранее обученным классам состояния зубчатого колеса. Но, несмотря на это, анализируя данные таблиц 1–3, можно выделить, что искусственная нейросетевая модель на основе нейронов Кохонена со 100% вероятностью идентифицировала два класса диагностируемого параметра зубчатого колеса: целый зуб и без зуба, а во всех остальных случаях результаты соответствовали соседним классам состояния зуба. Таким образом, можно сказать, что при работе искусственная нейросетевая модель ориентируется не только на абсолютные значения амплитуд информативных составляющих анализируемого акустического сигнала, но и их соотношение.

Заключение. Таким образом, в ходе экспериментальных исследований доказано, что формируемый набор данных (зубцовые частоты f_z кратные им гармоники lf_z и комбинированные частоты $lf_z \pm nf_0$ в окрестности частоты пересопрежения зубьев) для характеристики состояния зубчатого колеса является информативным и достаточным, а используемая нейросетевая модель на основе нейронов Кохонена при аналогичных условиях работы объектов в процессе диагностирования и обучения показывает достаточно хорошие результаты. Корректность ее работы нарушается лишь при введении в ход эксперимента дополнительных составляющих (изменение уровня масла и нагрузки на выходном валу), которые не были учтены в процессе обучения. В ходе дальнейших экспериментальных исследований используемая нейросетевая модель будет адаптироваться к новым дополнительным критериям, со-

провожающих работу многовалных зубчатых механизмов, что позволит усовершенствовать процедуру диагностики за счет комплексной оценки акустической активности.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Генкин, М. Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М. Д. Генкин, А. Г. Соколова. – М. : Машиностроение, 1987. – 288 с.
2. Герике, Б. Л. Мониторинг и диагностика технического состояния машинных агрегатов : учеб. пособие. – В 2-х ч. Ч.1 : Мониторинг технического состояния по параметрам вибрационных процессов. – Кемерово : Кузбасский государственный технический университет, 1999. – 188 с.
3. Костюков, В. Н. Основы виброакустической диагностики машинного оборудования : учеб. пособие / В. Н. Костюков, А. П. Науменко [и др.] – Омск : НПЦ «Динамика», 2007. – 286 с.
4. Драган, А. В. Выявление локальных повреждений зубьев зубчатых колес многовалных приводов с использованием методов искусственного интеллекта / А. В. Драган, А. Н. Парфиевич // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2017. – № 4. – С. 27–31.
5. Драган, А. В. Использование нейросетевого детектора при акустической диагностике многовалных зубчатых приводов / А. В. Драган, А. Н. Парфиевич, С. В. Безобразов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2017. – № 2. – С. 58–70.
6. Заленский, В. С. Подъемно-транспортные и строительные машины / В. С. Заленский, Ф. Ф. Мовчан – М. : Госстройиздат, 1957. – 286 с.
7. Драган, А. В. Новые аппаратно-программные средства для исследования и диагностики механических систем / А. В. Драган, И. П. Стецко, Д. А. Ромашко, Н. В. Левкович // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2006. – № 4. – С. 17–26.

12.12.2019

PARFIEVICH A. N., DRAGAN A. V., SOKOL V. A. The influence of changing operating conditions on the previously trained neural network model in identifying local damage to the working surface of the gear wheel

The article considers the possibility of diagnosing local damage to the working surfaces of gear teeth in the multi-shaft gear drive based on the analysis of the acoustic signal previously trained neural network model based on Kohonen neurons under changing operating conditions. The proposed artificial neural network proved its effectiveness under similar conditions of objects in the process of diagnosis and training, however, with the introduction of additional components in the course of the experiment (changes in the oil level and the load on the output shaft) was able to classify only three classes of tooth condition: whole, defective tooth and without tooth.

621.891.67-762

Введение. В отраслях промышленности большую группу составляют транспортные, строительные грузоподъемные и другие машины и оборудование, у которых узлы трения работают в тяжелых условиях эксплуатации, когда смазкой трущихся деталей являются рабочие среды, многие из которых содержат механические примеси или являются химически активными. Выполнение таких узлов трения в масляной ванне конструктивно практически невозможно по причине сложности и дороговизны такого устройства.

Иногда стоимость такого устройства достигает 70% от стоимости нового изделия [1].

В условиях модернизации и совершенствования конструкций узлов трения особый интерес представляют композиционные материалы, что объясняется возможностью широкого регулирования их свойств, путем создания композиций, в которых собраны в одно целое лучшие качества составляющих их компонентов. Пара трения из таких материалов сочетает в себе одновременно антифрикционные

свойства, высокую прочность и износостойкость.

Антифрикционность пары трения, согласно молекулярно-механической теории трения [2], обеспечивается положительным градиентом механических свойств по глубине разделительной пленки смазки и материала в сочетании с упругим деформированием материала, приводящим к минимальной работе трения.

Если смазочным материалом служит рабочая среда, не обладающая хорошей смазывающей способностью, то возможно обеспечить положительный градиент механических свойств в самом материале пары трения. Последнее возможно при таком составе материала, который в процессе трения обеспечивает на контактной поверхности образование защитной пленки из структурных составляющих материала в сочетании со смазывающей рабочей средой.

Наилучшие результаты в этом отношении показывают антифрикционные материалы, структура которых имеет каркас из твер-

Голуб Владимир Михайлович, к. т. н., доцент, заведующий кафедрой "Машиноведение" Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

дых зерен, распределенных в пластичной основе (рис. 1).



Рисунок 1 – Микрофотография поверхности композиционного материала

При этом последняя должна обладать избирательной растворимостью (эффект безызносности) при воздействии смазочного материала (рабочей среды) и температуре в контакте, а твердые структурные составляющие – твердостью, превосходящей твердость абразивных частиц, которые попадают на контакт пары трения. Избирательному растворению в активных средах подвержены медьсодержащие материалы, в результате чего контактные поверхности обогащаются медью [2].

Такие спеченные композиционные материалы получены методами порошковой металлургии. Нами разработан способ нанесения их на контактные поверхности пар трения. Определен оптимальный состав материалов, включающий карбид вольфрама, медь, никель, кобальт, хром, бор, марганец и другие элементы.

Технологический процесс нанесения износостойких покрытий и порошковых материалов. Технологический процесс нанесения износостойких покрытий предусматривает приготовление шихты, ее прессование, спекание и пропитку сплавом, который цементирует твердые частицы карбидов металлов и прочно соединяет получаемый композиционный материал с материалом заготовки.

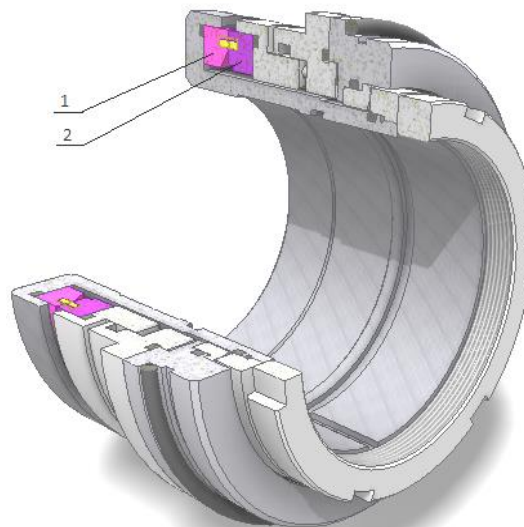
Для изготовления шихты применяют твердосплавные тонкодисперсные порошковые (4...10 мкм) смеси карбида вольфрама с кобальтом (ВК-6 или ВК-8) и литой зерновой карбид вольфрама – релит зернистостью 15–25 мкм. Исходные компоненты смешивают. Смешивание может быть сухое или мокрое. В последнем случае в смесь добавляют пластификаторы. Для улучшения формуемости шихты при прессовании производят грануляцию – образование временно устойчивых комочков. С целью удаления влаги, шихту сушат в сушильном шкафу при температуре 80–90 °С. Нагрузки прессования принимают из расчета плотности спрессованного брикета.

Выбор состава пропиточного сплава представляет собой наибольшую трудность при создании композиционных материалов, отвечающих заданным свойствам. Сплав должен смачивать поверхность пористого каркаса спрессованного брикета и материала заготовки, свободно затекать в капиллярные зазоры при нагреве, иметь температуру плавления ниже температуры плавления материала заготовки, иметь достаточную устойчивость к химически активным средам и обладать склонностью к избирательному переносу при трении и прочном абсорбировании смазки.

Наличие абразивных частиц в перекачиваемых жидкостях приводит к износу деталей и узлов. При этом наиболее интенсивно изнашиваются детали и узлы, работающие по закрытой схеме, то есть когда абразивные частицы попадают между контактирующими поверхностями.

В насосах таким узлом является узел уплотнения вала – торцовое уплотнение (рис. 2). Самым ответственным и в то же время наиболее подверженным износу элементом торцового уплотнения яв-

ляется контактная пара трения. Абразивные частицы, попадающие в контакт пары трения, интенсивно изнашивают поверхности уплотняющих колец, вызывая потерю герметичности и в конечном итоге выход из строя уплотнения.

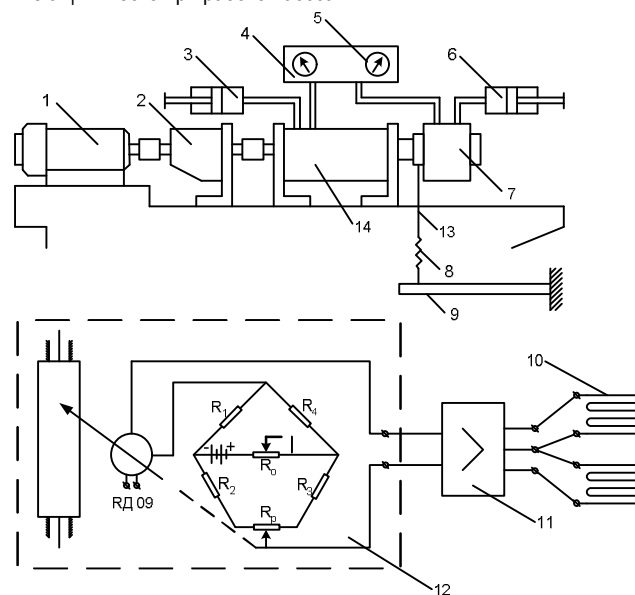


1 – кольцо неподвижное; 2 – кольцо вращающееся

Рисунок 2 – 3D-модель торцового уплотнения типа УТН-120С

Это обстоятельство выдвигает определенные требования к выбору материалов пар трения торцовых уплотнений в отношении износостойкости, твердости, долговечности, антифрикционности и т. д. Исследование этих характеристик невозможно без создания экспериментального лабораторного стенда, позволяющего воспроизводить схему трения и износа контактных поверхностей пары трения торцового уплотнения в условиях работы с абразивной жидкостью.

С этой целью был разработан стенд (рис. 3) для испытания материалов пар трения торцовых. Данный стенд позволяет наиболее полно приблизить испытания пары трения к реальным условиям, имеющим место при работе насоса.

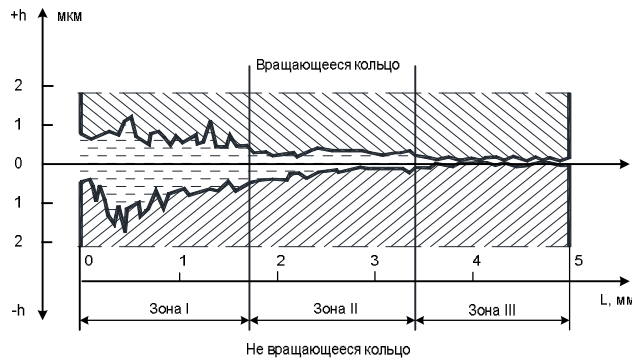


1 – электромотор; 2 – коробка перемены передач; 3 – поршневой нагнетатель для создания нагружения контактной пары; 4 – панель приборов; 5 – манометры; 6 – поршневой нагнетатель для поддержания давления в рабочей камере; 7 – испытательная головка; 8 – динамометр; 9 – тензобалочка; 10 – тензодатчики; 11 – усилитель; 12 – потенциометр

Рисунок 3 – Общий вид стенда и схема измерительной аппаратуры

Проведенные на стенде испытания торцовых уплотнений в абразивосодержащих жидкостях позволили вскрыть механизм процесса изнашивания материалов пар трения. При этом оказалось, что механизм изнашивания имеет общий характер, практически независимый от соотношения твердости абразивных частиц и материалов пары трения.

На рисунке 4 показаны профили уплотнительных колец торцового уплотнения, испытанного на лабораторном стенде в абразивной жидкости.

**Рисунок 4** – Характер износа пары трения в абразивосодержащих средах

Поверхности трения в радиальном направлении можно разбить на три зоны. Наибольший износ имеет место в зоне I, расположенной со стороны гидросмеси. Суммарная глубина износа превышает крупность изнашивающих абразивных частиц. В этой зоне контактных поверхностей имеет место гидроабразивный износ материалов пары трения.

В зоне II абразивные частицы, попадающие в щель между поверхностями, не имеют возможности выйти из зоны трения и разламываются до мельчайших частиц, изнашивая поверхности трения и придавая им характерную клиновидность. В этой зоне определяющим видом износа, очевидно, является износ полузакрепленным абразивом. В зоне III износ происходит в результате взаимодействия поверхностей трения без учета абразивных частиц.

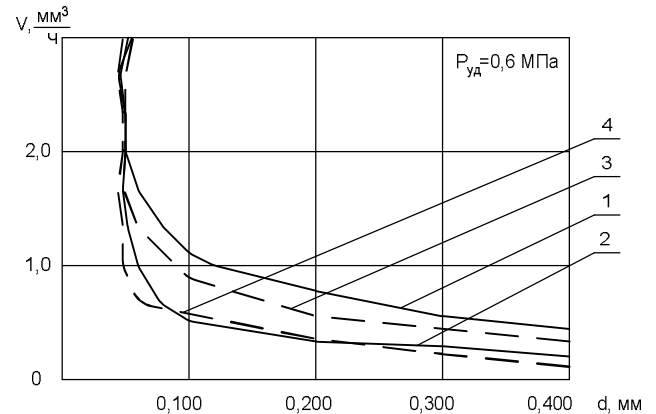
В некоторых случаях на профиле изношенных поверхностей зоны I и II сливаются, при этом износ по всей поверхности трения носит характер изнашивания полузакрепленными абразивными частицами.

При проведении исследований в качестве абразивного материала использовался кварцевый песок. Испытанию подвергали следующие материалы пар трения: силицированный графит (СГ-П), композиционный материал ТМ-1 (карбид вольфрама, медь, никель), СНГН, нанесенный плазменным напылением. Трение осуществлялось по одноименным материалам. Переменными факторами при испытании были: процентное содержание абразива в жидкости, крупность абразивных частиц, время испытания и т. д. Исследование влияния крупности абразивных частиц на износ материала пары трения было проведено на паре трения СГ-П – СГ-П, для чего были приготовлены четыре фракции кварцевого песка крупность: менее 0,050; 0,050 – 0,063; 0,063 – 0,100; 0,100 – 0,315 мм в количестве, составляющем 3,8% от объема гидросмеси. На рисунке 5 видно, что наибольший износ имеет место при крупности абразивных частиц менее 100 мкм, так как при большей крупности суммарная скорость изнашивания пары трения изменяется очень медленно и, очевидно, уже мало зависит от наличия абразивных частиц в жидкости.

Таким образом, на износ пары трения оказывают влияние абразивные частицы размером менее 0,100 мм, при этом чем меньше будет размер частиц, тем больше износ. Очевидно, что наибольший износ будет наблюдаться при крупности абразивных частиц, сопоставимой с величиной зазора в паре трения, то есть 3–5 мкм.

Содержание абразивных частиц в жидкости, в зависимости от условий, колеблется в широких пределах (от 0,02 до 60% и более) и различно по фракционному составу. Наиболее опасная для пары

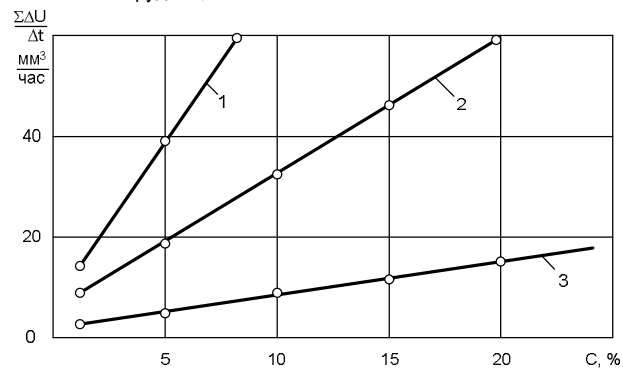
трения фракция (с размером частиц менее 100 мкм) может составлять до 20% от общего содержания абразивных частиц в жидкости.



1 и 3 – вращающегося кольца; 2 и 4 – не вращающегося кольца; после одного часа работы (кривые 1, 2) и после двух часов работы (кривые 3, 4)

Рисунок 5 – Зависимость скорости изнашивания пары трения СГ-П – СГ-П от крупности абразивных включений в гидросмеси

На рисунке 6 представлена зависимость суммарной скорости износа, вращающегося и не вращающегося колец от процентного содержания абразивных частиц в жидкости. Исследуемые материалы – СГ-П, ТМ-1, и СНГН – испытывались при концентрации абразива от 2 до 20%. Крупность абразива менее 0,050 мм. Удельное нагружение контакта руд = 0,6 МПа.



1 – СНГП – СНГП; 2 – СГ-П – СГ-П; 3 – ТМ-1 – ТМ-1; $v = 15$ м/с, руд = 0,6 МПа

Рисунок 6 – Зависимость суммарной скорости объемного износа от процентного содержания абразивных частиц в гидросмеси для пары трения

Скорость износа с повышением концентрации абразива можно описать следующей зависимостью:

$$u = k \cdot c^m,$$

u – скорость износа, мм³/ч; c – концентрация абразива в жидкости, %; k и m – параметры кривой, зависящие от физико-механических свойств материалов пар трения.

В данном случае m , k принимают значения, соответствующие каждому из испытанных материалов. Характерно, что для материала ТМ-1 скорость износа значительно меньше чем у СГ-П и, тем более чем у СНГП. Это говорит о том, что использование в качестве материалов пары трения в торцовом уплотнении композиционных материалов типа ТМ-1 предопределяет повышение надежности работы уплотнения.

Заключение. Исследованы контактные кольца торцового уплотнения на трение и износ в абразивных средах.

Установлено, что на износ пары трения оказывают влияние абразивные частицы размером менее 0,100 мм, при этом чем меньше будет размер частиц, тем больше износ.

Наличие абразива в уплотняемой среде увеличивает скорость изнашивания колец, сужает диапазон допустимых нагрузок на кон-

такт пары трения. Более интенсивному износу в гидроабразивной среде подвержены вращающиеся кольца пар трения.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Голуб, М. В. Износостойкие композиционные материалы на основе карбида вольфрама, меди и никеля / Долговечность трущихся деталей машин. – М. : Машиностроение. – Вып. 1. – 1975.

2. Джонс, В. Основы порошковой металлургии. Прессование и спекание. – М. : Мир, 1965. – 425 с.

03.12.2019

GOLUB V. M. Methods of increasing wear resistance and durability of friction units of machines

Investigated composite materials based on tungsten carbide powder and copper-containing matrix binder. A stand has been developed for testing the contact rings of mechanical seals for friction and wear. The dependence of the wear rate of contact rings on the concentration of abrasive in a waterjet mixture is obtained.

621.833

. " . " . " . .

Введение. Поддержание функциональных свойств и безотказной работы машин в течение всего периода эксплуатации достигается за счет ремонтов и технического обслуживания. Важной задачей современного производства является переход от системы планово-предупредительных ремонтов (ППР) к обслуживанию машин по фактическому состоянию (ОФС), которое позволяет снизить объем ремонтных работ, увеличить межремонтный ресурс и повысить надежность машин, а, значит, и снизить эксплуатационные расходы.

Одним из основных условий применения ОФС для технических систем является использование методов диагностики для оценки их текущего состояния. Для установления достоверных критериев, по изменению которых оценивается состояние механизма, необходимы данные о влиянии различных дефектов и неисправностей элементов редукторных узлов на параметры их вибраций.

Постановка задачи. Одним из основных механизмов, в большой степени определяющих динамические и эксплуатационные характеристики машины в целом, являются механические приводы на основе зубчатых передач. Для контроля состояния зубчатых приводов и оценки их ресурса хорошо зарекомендовал себя метод вибрационной диагностики [1], который позволяет находить зарождающиеся дефекты, не требует сборки-разборки изделия, обеспечивает малое время диагностирования и возможность прогнозирования остаточного ресурса, характеризуется относительной простотой автоматизации съема, обработки и передачи измерительной информации.

В процессе эксплуатации машин происходит неизбежный износ трущихся поверхностей элементов зубчатых передач и подшипников. Увеличивающиеся при этом зазоры приводят к возрастанию ударных нагрузок, увеличению как общего уровня вибрации, в зависимости от вида повреждения элементов, лимитирующих надежность приводных зубчатых механизмов, так и спектральных составляющих вибраций в соответствующем частотном диапазоне [1, 2, 3].

Эффективная вибродиагностика возможна только при наличии достоверных критериев в виде предельно допустимых уровней параметров вибраций, по которым производится оценка состояния механизма. Вместе с тем, сформулировать эти критерии в общем виде достаточно сложно даже для механизмов одного типоразмера. Одним из объективных параметров нормирования вибрации зубчатых механизмов могут служить величины виброускорения и виброскорости [4].

Также необходимо отметить, что одной из основных тенденций

развития методов диагностики и мониторинга технического состояния зубчатых передач на сегодняшний день является переход от периодической диагностики к непрерывному мониторингу технического состояния привода в эксплуатации с прогнозированием остаточного ресурса его критичных элементов. Существующие на современном этапе методики прогнозирования остаточного ресурса зубчатых передач, описанные в стандартах [5, 6] и других нормативных документах, базируются на расчетных зависимостях, не учитывающих изменений условий работы элементов привода в процессе эксплуатации [7, 8]. Кроме того, действующие нормы расчета сроков службы оборудования предусматривают обеспечение прочности и износостойкости изделий при наиболее неблагоприятных режимах нагружения в заданных условиях эксплуатации, а также при минимальных уровнях механических характеристик конструкционных материалов, обеспечиваемых по нормативной документации. Фактические режимы нагружения при соблюдении правил эксплуатации, как правило, отличаются от расчетных, что обеспечивает резерв по остаточному ресурсу оборудования. В результате при применении указанных методик прогнозный ресурс может оказаться существенно заниженным или завышенным. Поэтому важной задачей является исследование изменений параметров вибрации технически исправных элементов привода ввиду нарушения работоспособности других важных элементов и их влияния на остаточный ресурс.

Таким образом, задачей данного исследования является оценка влияния неисправностей зубчатых механизмов в виде отсутствия части рабочей поверхности зуба на параметры вибрации как поврежденной зубчатой пары, так и технически исправных зубчатых колес редуктора при изменяющихся эксплуатационных условиях работы.

Объект и предмет экспериментальных исследований. Для изучения влияния отсутствия части зуба на изменение параметров вибрации были проведены натурные испытания на трехступенчатом редукторе с прямозубыми цилиндрическими зубчатыми колесами с моделированием на зубчатом колесе $Z_2=44$ (рисунки 1, 2) локального повреждения зуба различной степени развитости (повреждение 25%, 50% и 75% поверхности зуба и отсутствие зуба) при частоте вращения электродвигателя $n=1430$ мин⁻¹ и изменяющихся эксплуатационных условиях работы (без нагрузки, с нагружающим моментом $T=9$ Н·м, $T=18$ Н·м и $T=27$ Н·м, при разном уровне смазки – нормальном, установленном инструкцией по эксплуатации редуктора, на

Дакало Юрий Александрович, магистр технических наук, аспирант, старший преподаватель кафедры машиноведения Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Ишин Николай Николаевич, д. т. н., доцент, начальник НТЦ «Карьерная техника» ОИМ НАН Беларуси.

Гоман Аркадий Михайлович, к. т. н., доцент, начальник отдела динамического анализа НТЦ «Карьерная техника» ОИМ НАН Беларуси.

Скореходов Андрей Станиславович, к. т. н., ведущий научный сотрудник НТЦ «Карьерная техника» ОИМ НАН Беларуси.

Беларусь, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси 220072, г. Минск, ул. Академическая, 12.