

УДК 621.833

В. Е. Антонюк, доктор технических наук
А. М. Гоман, кандидат технических наук, доцент
Н. Н. Ишин, доктор технических наук, доцент
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск
М. М. Кане, доктор технических наук, профессор
Белорусский национальный технический университет, Минск
В. В. Комиссаров, кандидат технических наук, доцент
Белорусский государственный университет транспорта, Гомель
А. С. Скороходов, кандидат технических наук
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск
Л. А. Сосновский, доктор технических наук, профессор
ОАО «Трибофатика», Гомель, Беларусь
В. Е. Старжинский, доктор технических наук
Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого
Национальной академии наук Беларуси», Гомель
Е. И. Тескер, доктор технических наук, профессор
Волгоградский технический университет

ПРОБЛЕМЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ В ОБЛАСТИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ. ЧАСТЬ 2. СТАНДАРТИЗАЦИЯ В ОБЛАСТИ ИСПЫТАНИЙ, НОРМИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ВИБРОДИАГНОСТИКИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

В первой статье, опубликованной в журнале «Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (2017, т. 20, № 2), было рассмотрено современное состояние и общие тенденции в развитии системы стандартизации в области зубчатых передач. Обсуждались проблемы гармонизации стандартов ГОСТ, СТБ с международными и национальными стандартами других стран, в частности, стандартов, регламентирующих требования по геометрии исходных контуров, показателям точности, детерминированным и вероятностным методам расчета на прочность. В данной статье рассматриваются вопросы гармонизации стандартов в области расчета несущей способности зубчатых передач и прогнозирования их ресурса. Показано, что простого механического перевода стандартов ISO недостаточно, так как в ряде отечественных стандартов имеются методики, в стандартах ISO отсутствующие. Относительно стандартов ISO по расчету нагрузочной способности зубчатых передач отмечается также, что их эффективное использование доступно только высококвалифицированным специалистам. В контексте определения рациональных норм надежности проектируемой техники в статье рассматривается случай оценки надежности проектируемого объекта с учетом взаимной коррелированности между отказами элементов на примере промежуточного вала редуктора ведущего моста грузовика с двойной центральной главной передачей. Рассматривается также целесообразность развития национальной системы стандартов в области «Надежность в технике» с точки зрения современных достижений мировой и отечественной науки в области оценки технического состояния и диагностики машин и их наиболее ответственных узлов. Отдельные разделы посвящены конкретному описанию стандартов, касающихся методов совмещенных испытаний на изгибную и контактную усталость образцов материалов для изготовления зубчатых колес; нормирования надежности механического привода и некоторых вопросов развития нормативной базы вибродиагностики.

Ключевые слова: зубчатые передачи, стандартизация, гармонизация, комбинированные испытания, надежность, вибродиагностика.

Введение

Одной из актуальных проблем в стандартизации зубчатых передач с учетом современного состояния их производства в разных отраслях машиностроения является гармонизация национальных стандартов ГОСТ с международными и национальными стандартами зарубежных стран. Заметим, что при разработке стандартов далеко не всегда можно идти путем чисто механического перевода стандартов ISO с английского языка. Например, если говорить о международных стандартах по расчету несущей способности зубчатых передач, то существенным недостатком этих стандартов является, с нашей точки зрения, отсутствие вероятностного прогнозирования их ресурса. Между тем в 1990-х годах под руководством профессоров Н. Ф. Бочарова и Г. А. Снесарева и при участии профессора П. К. Попова (МГТУ им. Н. Э. Баумана) Институтом надежности машин НАН Беларуси была разработана первая редакция ГОСТ «Прогнозирование ресурса промышленных приводов», в которой

предлагалась методика вероятностной оценки ресурса зубчатых передач. Впоследствии эта работа была продолжена выпуском монографии по нормированию надежности технических систем [1], а также получила отражение в СТБ 1917-2008 [2], в котором дана оценка надежности промежуточного вала ведущего моста грузового автомобиля с двойной центральной главной передачей с учетом взаимной коррелированности между отказами элементов системы (вала, подшипников и зубчатых колес). Отметим также, что при разработке стандартов, и в частности стандартов по оценке ресурса зубчатых передач, следует гармонизировать термины и обозначения с существующими международными стандартами. Частично такая работа была проделана включением в словарь-справочник по зубчатым передачам [3] раздела по расчету зубьев на прочность и заедание.

Отдельно хотелось бы коснуться вопроса разработки стандартов по расчету нагрузочной способности зубчатых передач, которые, безусловно, должны

быть гармонизированы с международными стандартами в отношении используемых терминов и обозначений. Простого механического перевода стандартов ISO недостаточно и в этом случае, что подтверждается следующим фактом. В Беларуси в 1966 г. под руководством профессора И. С. Цитовича был разработан нормативный документ (нормаль) по проектированию и расчету зубчатых колес автомобилей и тракторов, который успешно использовался автомобильными, тракторными и комбайновыми заводами России, Беларуси и Украины. Разработанная нормаль позволяла получить вероятностную оценку ресурса зубчатых передач. Такая возможность в стандартах ISO отсутствует, что следует учитывать при гармонизации стандартов СНГ с международными стандартами. Относительно стандартов ISO по расчету нагрузочной способности зубчатых передач следует отметить также, что для их практического применения, как указывают сами авторы, необходимо задаться большим числом исходных данных, которое, в зависимости от используемых методов, может быть более 90. Естественно, что эффективное использование таких стандартов доступно только высококвалифицированным специалистам.

Государственный стандарт РБ на метод совмещенных испытаний материалов для зубчатых колес на изгибную и контактную усталость

Стандарт [4] регламентирует порядок испытаний на изгибную и контактную усталость материалов, предназначенных для изготовления зубчатых колес. Стандарт базируется на концепции механики износоусталостного повреждения, развиваемой коллективом исследователей, возглавляемым профессором Л. А. Сосновским. Первые лекции по основам этой дисциплины были прочитаны в 1985/86 учебном году в Белорусском институте инженеров железнодорожного транспорта (БелИИЖТ) – ныне Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ) и опубликованы в 1988 г. [5]. С основными положениями этого направления в механике твердого деформируемого тела и современным состоянием исследований в этой области можно познакомиться по учебному пособию [6] и в трудах VI Международного симпозиума по трибофатике МСТФ-2010 [7]; библиография публикаций по этой теме с 1985 по 2005 год приведена в [8].

Стандарт устанавливает методы контрольных и исследовательских совмещенных испытаний материалов для зубчатых колес на изгибную и контактную усталость. Стандарт предусматривает испытания в многоцикловой области при нормальных значениях климатических факторов внешней среды.

Характеристики, определяемые при испытаниях, могут быть использованы:

- при выборе конструкционных материалов для зубчатых колес и обосновании конструктивно-технологических решений;
- контроле качества металлопродукции;
- расчетах на этапе проектирования зубчатых передач, работающих в условиях контактно-механической усталости;

- создании материалов с заданными физико-механическими свойствами для обеспечения требуемых характеристик сопротивления контактно-механической усталости зубчатых колес.

Стандарт снабжен справочными и рекомендуемыми приложениями, в которых изложен порядок расчета параметров площадки контакта, напряженного состояния в области контакта, опасных объемов при контактном нагружении, а также информационными материалами по экспериментальному определению параметров кривых усталости и расчетно-экспериментальному методу построения функций распределения пределов выносливости.

Нормирование надежности механического привода

В общем случае определение рациональных норм надежности проектируемой техники производится исходя из условия оптимизации коэффициента k_{ef} эффективности ее использования, представляющего отношение суммарной стоимости выполненных работ к общей стоимости жизненного цикла

$$k_{ef} = \frac{Q - C_{LS}}{C_{LS}} \rightarrow \max ,$$

где Q – общая стоимость продукции, произведенной за жизненный цикл изделия; C_{LS} – суммарные затраты на производство и эксплуатацию изделия.

При этом в ходе выполнения проектирования должны быть решены следующие основные задачи:

- построение структурных схем надежности проектируемой техники;
- рациональное нормирование надежности отдельных систем и подсистем;
- нормирование надежности комплектующих изделий;
- проектирование отдельных деталей и сборочных единиц, удовлетворяющих установленным требованиям надежности;
- расчетная проверка надежности технического объекта в сборе.

Общие принципы данного подхода изложены в монографии [9] и стандарте РБ [10]. В контексте рассматриваемой тематики остановимся на частном случае оценки надежности проектируемого объекта с учетом взаимной коррелированности между отказами элементов на примере промежуточного вала редуктора ведущего моста грузовика с двойной центральной главной передачей.

Кинематическая схема редуктора ведущего моста приведена на рис. 1, промежуточный вал ведущего моста – на рис. 2. Блок-схема надежности редуктора показана на рис. 3, на рис. 4 – дерево отказов редуктора.

Приведенные блок-схема надежности и дерево отказов позволяют осуществить качественный анализ надежности редуктора. Для количественного анализа надежности необходимо учитывать количественные характеристики надежности отдельных элементов, а также взаимосвязь между их отказами.

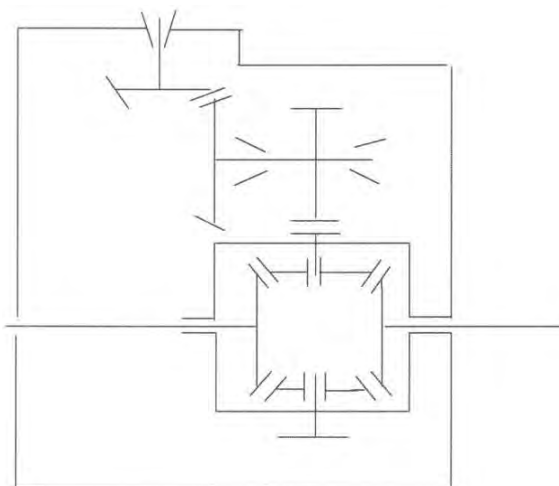


Рис. 1. Кинематическая схема редуктора ведущего моста

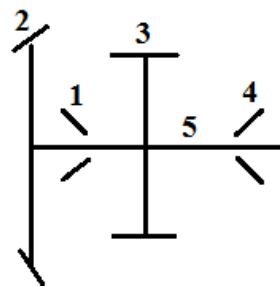


Рис. 2. Кинематическая схема промежуточного вала редуктора ведущего моста грузового автомобиля: 1 – подшипник левый; 2 – ведомое коническое колесо; 3 – ведущая цилиндрическая шестерня; 4 – подшипник правый; 5 – вал

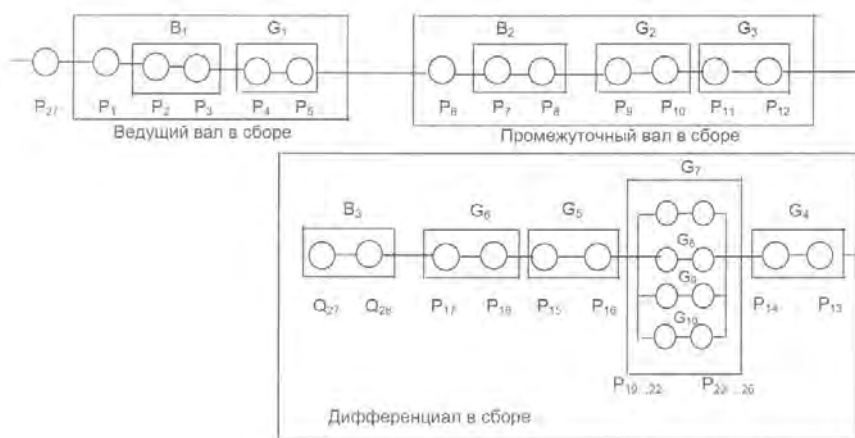


Рис. 3. Блок-схема надежности редуктора

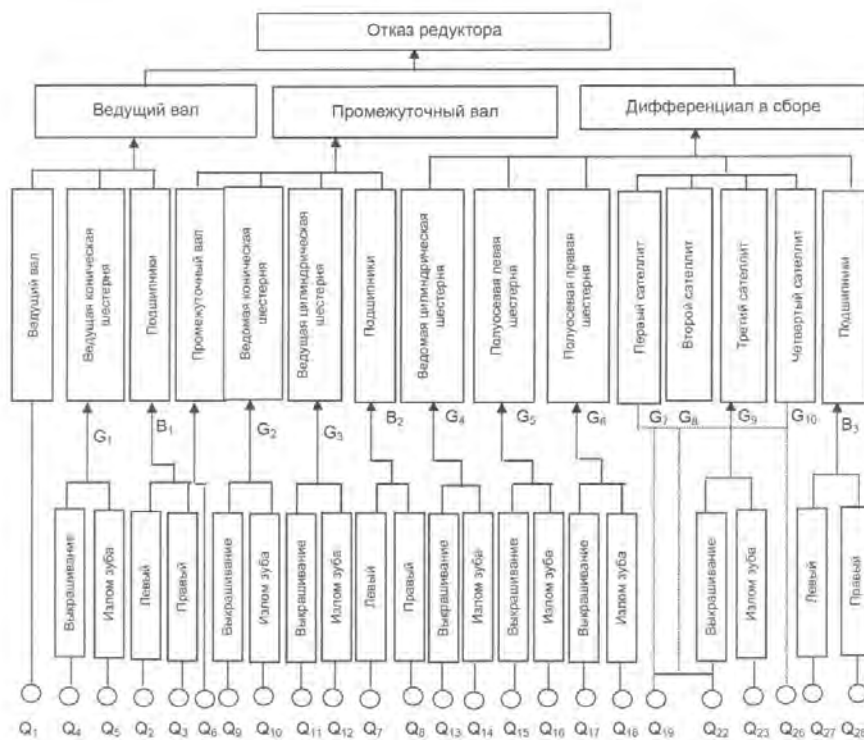


Рис. 4. Дерево отказов редуктора

Структурная последовательная блок-схема расчета надежности вала в сборе при независимости отказов элементов представлена на рис. 5.

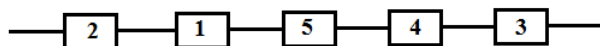


Рис. 5. Структурная блок-схема надежности вала в сборе

Граф надежности вала в сборе с учетом взаимной коррелированности отказов показан на рис. 6.

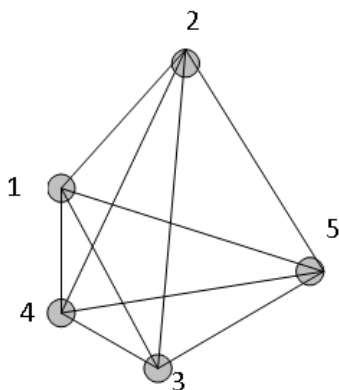


Рис. 6. Граф надежности промежуточного вала

Расчет надежности элементов промежуточного вала свидетельствует, что надежность ряда элементов практически близка к единице и не изменяется за рассматриваемый период эксплуатации. Это означает, что надежность этих элементов практически не влияет на надежность рассматриваемой системы. В приведенном примере такими свойствами обладают надежность конической шестерни по изгибной выносливости зубьев R2F, надежность левого подшипника по контактной выносливости R1 и надежность вала по сопротивлению кручению R5.

Анализ полученных результатов дает основание рекомендовать рассмотренный метод определения надежности сборочных единиц механических систем по постепенным отказам с учетом корреляционных зависимостей между ними. Рекуррентное применение изложенного метода к прогнозированию надежности по усталостным отказам агрегата, состоящего из нескольких таких сборочных единиц, и трансмиссии, включающей несколько агрегатов, позволяет с приемлемой для практических целей точностью прогнозировать надежность механической трансмиссии и путем выбора рациональных параметров типовых элементов последней обеспечивать требуемые нормы ее надежности.

Состояние и предложения по развитию нормативной базы вибродиагностики

Оценка и обеспечение надежности в процессе всего жизненного цикла изделия как направление получает все большее развитие. При этом контроль и диагностика состояния мобильных машин являются необходимой составляющей процесса оценки расхода ресурса технически сложных изделий (ТСИ). Это связано с растущими возможностями интерактивных и онлайн-технологий, что позволяет организовать

мониторинг технического состояния ТСИ не только при производстве, но и в процессе эксплуатации. Одной из перспективных областей, основанных на мониторинге ресурса изделий в эксплуатации, является переход от планово-предупредительного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию. Однако практическая реализация этих рекомендаций возможна только при наличии эффективных методов и средств оценки и мониторинга изменений основных критериальных параметров, лимитирующих работоспособность машин и приводных механизмов. Одним из наиболее перспективных направлений в этом плане являются безразборные методы вибродиагностики.

В настоящее время наибольшее применение методы вибродиагностики нашли в нефтегазотранспортной отрасли, при оценке технического состояния электродвигателей, компрессоров, насосов и др. нефтегазоперекачивающего оборудования. Измерение интегральных вибрационных характеристик позволяет определить общее техническое состояние машины. В основу нормирования абсолютной вибрации заложены рекомендации международного стандарта ИСО 2372-74, в котором в качестве критерия используется среднее квадратическое значение (СКЗ) виброскорости в диапазоне частот от 10 Гц до 1 кГц. Рекомендации основаны на допущении, что подобные по мощности, высоте оси вращения, частоте вращения, способам установки, условиям монтажа и эксплуатации агрегаты имеют примерно одинаковые допустимые значения вибрации при достижении предельного состояния. Базовым нормативным документом по вибрации в настоящее время является ГОСТ ИСО 10816-1-97, введенный в действие на территории РФ в 1999 г., в котором указано, что при сосредоточении значительной части вибрационной энергии за пределами диапазона 10–1000 Гц дополнительному нормированию подвергается СКЗ виброперемещения и виброускорения в соответствующей полосе частот. Причем в качестве критериев оценки используют не только абсолютное значение вибрации, но и их изменение в процессе эксплуатации. Нормы вибрации на машины конкретных типов разработаны в частях 2–6 базового стандарта ГОСТ ИСО 10816-1-97, а также в ГОСТ 25364-97.

Общие требования измерения относительной вибрации указаны в ГОСТ Р ИСО 7919-1-99, в котором используются те же два критерия. В качестве измеряемого параметра принят размах виброперемещения вала относительно корпуса подшипника. На базе этого стандарта в различных его частях разработаны нормы для различных машин.

Вопросы диагностики состояния мобильных машин в процессе эксплуатации слабо отражены не только в отечественной системе стандартов, но и в стандартах ГОСТ Российской Федерации и межгосударственных стандартах. Этим во многом объясняется обострение проблемы обеспечения надежности отечественных технически сложных изделий.

Следует отметить, что в настоящее время российскими организациями подготовлены в области на-

дежности и безопасности новые редакции некоторых стандартов ГОСТ, например:

– ГОСТ Р ИСО 13379-1–2015 «Контроль состояния и диагностика машин. Методы интерпретации данных и диагностирования. Часть 1. Общее руководство» (дата введения в действие 01.12.2016);

– ГОСТ Р ИСО 17359-2015 «Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство» (дата введения в действие 01.12.2016).

Планируются к изданию еще три части стандарта ИСО 13381 «Контроль состояния и диагностика машин. Прогнозирование технического состояния»:

– Часть 2: Performance based approaches.

– Часть 3: Cyclic-driven life usage techniques.

– Часть 4: Useful-life-remaining prediction models.

В результате система стандартов ГОСТ, с одной стороны, перестает соответствовать сбалансированной системе стандартов «советской» школы, а с другой – не согласуется с международными стандартами в области «Надежность в технике».

Поэтому целесообразно развитие национальной системы стандартов в области «Надежность в технике», учитывающей современные достижения мировой и отечественной науки в области оценки технического состояния и диагностики машин и их наиболее ответственных узлов. В частности, целесообразно разработать СТБ «Вибрационный контроль состояния зубчатых приводов технически сложных изделий».

Основное требование к предлагаемому государственному стандарту – представить методическую основу для проведения оценок расхода ресурса технически сложных изделий на стадиях эксплуатации и вывода из эксплуатации, а также использования эксплуатационной информации для совершенствования конструкции производимых и модернизируемых изделий.

Корректное определение расхода ресурса изделия позволит решать задачи, основанные на вибромониторинге и использовании ресурсного потенциала изделия: оценка технического состояния изделия в целом, выбор режимов его дальнейшей эксплуатации, вопросы сроков и целесообразности вывода изделия из эксплуатации, целесообразность модернизации и другие.

Основные части стандарта должны включать: понимание вибромониторинга как необходимой составляющей процесса обеспечения надежности ТСИ; обоснование критериев диагностирования приводных зубчатых механизмов ТСИ; описание методов, алгоритмов и процессов анализа и интерпретации диагностической информации в процессе исчерпания ресурса основных частей ТСИ с учетом эксплуатационных воздействий и длительности эксплуатации; выбор моделей и подготовку данных для оценки расхода ресурса ТСИ.

Заключение

Рассмотрен ряд проектов по стандартизации зубчатых передач в части их производства, испытаний и эксплуатации.

1. Стандартизован метод испытаний материалов зубчатых колес на модельных образцах, обеспечи-

вающий совмещение условий испытания на изгибную и контактную усталость.

2. На базе СТБ 1917–2008 рассмотрен вопрос нормирования надежности механического привода с учетом взаимной коррелированности отказов элементов на примере промежуточного вала редуктора ведущего моста грузовика с двойной центральной главной передачей. Предлагаемый метод позволяет с приемлемой для практических целей точностью прогнозировать надежность механической трансмиссии и путем выбора рациональных параметров типовых элементов последней обеспечивать требуемые нормы ее надежности.

3. Для решения вопросов диагностики технического состояния мобильных машин в процессе эксплуатации обоснована необходимость разработки стандарта РБ «Вибрационный контроль состояния зубчатых приводов технически сложных изделий».

4. Приведенный в статье краткий обзор разработок, направленных на решение проблемы стандартизации зубчатых передач, показывает, что при наличии отдельных завершенных проектов и понимании первоочередных задач, стоящих перед специалистами-зубчатниками, вопрос о гармонизации стандартов ГОСТ с международными стандартами ISO и согласовании технических требований со стандартами DIN остается актуальным и требует оперативного решения, принятие которого позволит поднять уровень качества производимой промышленностью редукторной техники и механических трансмиссий мобильных машин.

Библиографические ссылки

1. Берестнев О. В., Солитерман Ю. Л., Гоман А. М. Нормирование надежности технических систем. – Минск : УА «Технопринт», 2004. – 266 с.
2. СТБ 1917-2008. Техника сельскохозяйственная. Комплексная система обеспечения надежности. – Минск : Госстандарт РБ, 2009. – 115 с.
3. Словарь-справочник по зубчатым передачам. Русский-Английский-Французский-Немецкий / под ред. В. Е. Старжинского. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2011. – 220 с.
4. СТБ 1758-2007. Метод совмещенных испытаний на изгибную и контактную усталость материалов зубчатых колес (Стандарт Беларуси). – Минск : ГосСтандарт, 2007. – 45 с.
5. Сосновский Л. А. Комплексная оценка надежности силовых систем по критериям сопротивления усталости и износостойкости (Основы трибофатика) : учеб.-метод. пособие. – Гомель : БелИИЖТ, 1988. – 56 с.
6. Sosnovskiy L. A. Tribo-Fatigue: Wear-Fatigue Damage and its Prediction. – Springer. – 2005. – 410 p.
7. Труды VI Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2010) (25.10–1.11.2010, Минск, Беларусь). – Минск : БГТУ. – 2010. – Т. 1. – 839 с. ; Т. 2. – 727 с.
8. Трибофатика: библиографический указатель (1985-2015) / сост. С. А. Тюрин. – Гомель : БелГУТ, 2015. – 61 с.
9. Берестнев О. В., Солитерман Ю. Л., Гоман А. М. Нормирование надежности технических систем.
10. СТБ 1917-2008. Техника сельскохозяйственная. Комплексная система обеспечения надежности. – Минск : Госстандарт РБ, 2009. – 115 с.

* * *

V. E. Antonjuk, DSc in Engineering, Joint Institute of Mechanical Engineering of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk

A. M. Goman, PhD in Engineering, Associate Professor, Joint Institute of Mechanical Engineering of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk

N. N. Ishin, DSc in Engineering, Joint Institute of Mechanical Engineering of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk

M. M. Kane, DSc in Engineering, Professor, Belarusian National Technical University, Minsk

V. V. Komissarov, PhD in Engineering, Associate Professor, Belarusian State University of Transport, Gomel

A. S. Skorokhodov, PhD in Engineering, Joint Institute of Mechanical Engineering of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk

L. A. Sosnovskiy, DSc in Engineering, Professor, S&P Group Tribofatigue Ltd., Gomel, Belarus

V. E. Starzhinsky, DSc in Engineering, SSI "V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus", Gomel

E. I. Tesker, DSc in Engineering, Professor, Volgograd State Technical University

Problems in Gearing Standardization and Some Results in Normative Documentation Development

Part 2. Standardization in the Field of Testing, Rationing Reliability and Vibration Diagnostics of Gearing

In the first paper of this series, published in No 2, 2017 of "Bulletin of Kalashnikov ISTU" the current state and general trends in the development of the standardization system in the field of gears were considered. The problems of harmonization of GOST and STB standards with international and national standards of other countries, in particular, standards, regulatory requirements to the geometry of the basic rack tooth profiles, accuracy rate, deterministic and probabilistic methods of strength calculation were discussed. This paper discusses the issues of harmonization of standards calculation of load capacity of gears and their life-time forecasting. It is shown that simple mechanical translation of corresponding ISO standards is not enough, since there are methods in a number of national standards, that are missing in ISO standards. Regarding the ISO standards for the calculation of load capacity of gears it is also noted that their effective use is only available for highly qualified specialists. In the context of defining appropriate standards of reliability design technique the paper describes the case of assessment of reliability of the designed object, based on the mutual correlation between failures of elements on the example of the intermediate shaft of gearbox drive axle truck with dual CPU and main gear. The feasibility of development of national system of standards "Reliability in engineering" from the point of view of modern achievements of world and domestic science in the field of evaluation of technical condition and diagnostics of machines and their most critical components is considered too. Separate sections are devoted to specific description of the standards for methods of test for combined bending and contact fatigue samples of materials for the manufacture of gear wheels; the normalization of the reliability of mechanical drive and some questions of the normative basis of vibration diagnostics.

Keywords: gear drives, standardization, harmonization, combined tests, durability, vibration diagnostics.

Получено: 18.05.17