

Г. А. Костюкович, канд. техн. наук, Е. В. Овчинников, докт. техн. наук,  
Д. А. Линник, канд. техн. наук, А. В. Попрукайло, магистр  
Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, г. Гродно, Беларусь  
ОАО «Белкард», г. Гродно, Беларусь  
Тел./Факс: +375 (152) 684108; E-mail: [ovchin@grsu.by](mailto:ovchin@grsu.by)

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ КАРДАНЫХ ПЕРЕДАЧ

*В статье рассмотрены конструкции карданных передач, для которых велось построение твердотельных моделей, разработаны схемы, структуры отдельных модулей и пилотной программы реализации системы. Система построена на эксклюзивной технологии, содержит средства создания, хранения и доступа к справочной информации, выполнения расчетов, составления отчетных расчетных документов для получения твердотельных моделей карданных передач. Изучены конструкции карданных передач, для которых велось построение конечно-элементных моделей деталей карданных валов для предварительных расчетов, разработаны схемы, структуры отдельных модулей и программа, позволяющая проводить автоматизацию выполнения расчетов элементов и конструкций карданных валов различного назначения, обеспечения интеграции выполнения кластерных (С-вычисления) и инженерно-технических расчетов (Е-вычисления) инженерами и конструкторами различного уровня компьютерной подготовки.*

**Ключевые слова:** карданная передача, модели, высокопроизводительная мультимикропроцессорная техника, свойства.

G. A. Kostyukovich, Y. V. Auchynnika, D. A. Linnik, A. V. Poprukailo

## COMPUTER SIMULATION OF HEAVY LOADED FRICTION UNITS OF CARDAN GEARS

*The article considers the designs of cardan gears, for which the construction of solid models was carried out, schemes, structures of individual modules and a pilot program for the implementation of the system were developed. The system is built on an exclusive technology, contains tools for creating, storing and accessing reference information, performing calculations, compiling reporting settlement documents to obtain solid-state models of cardan gears. The designs of cardan gears were studied, for which finite element models of cardan shaft parts were built for preliminary calculations, schemes, structures of individual modules and a program were developed that allow automating the calculations of elements and structures of cardan shafts for various purposes, ensuring the integration of performing cluster (C-calculations) and engineering calculations (E-calculations) by engineers and designers of various levels of computer training.*

**Keywords:** cardan transmission, models, high-performance multiprocessor technology, properties.

### 1. Введение

Современное производство тесно связано с уровнем информационных технологий, доступных на предприятии. Комплексная автоматизация процессов конструирования и технологической подготовки производства с использованием станков с ЧПУ играет ключевую роль в повышении эффективности производства.

Внедрение систем автоматизированного проектирования высокого уровня способствует улучшению качества продукции и сокращению времени разработки чертежей. Параметрические системы трехмерного моделирования, нацеленные на машиностроение и приборостроение, активно внедряются в современную практику.

С помощью современных систем автоматизированного проектирования уже на этапе разработки можно провести анализ технологичности, собираемости, прочности и динамических характеристик продукции. Это позволяет оптимизировать процесс про-

ектирования и создания продукции, уменьшая вероятность дефектов и снижая себестоимость.

Таким образом, использование современных информационных технологий и систем автоматизированного проектирования является важным элементом повышения конкурентоспособности предприятия на рынке [1-10].

Карданные передачи являются важнейшим агрегатом современных модификаций автотракторной техники и функциональных устройств различного значения. Они представляют собой приводные валы с универсальными шарнирами, обеспечивающими передачу передвижения автомобилей, тракторов или устройств конкретного назначения. Карданные валы выполняют следующую задачу: передают вращающийся момент и движение исполнительному механизму при различных углах перемещения осей [2].

Различные виды техники, использующей карданные передачи, имеют свои уникальные особенности эксплуатации. Из-за этого существует множество различных конструктивных решений для такого вида передач.

Одним из типовых вариантов карданных передач, который наиболее распространен в грузовых автомобилях, включает в себя следующие компоненты:вилку, подшипник, крестовину, фланец, уплотнение и другие детали. Эти элементы работают вместе для обеспечения надежности и эффективности работы карданных передач, что является важным аспектом их функционирования. В конечном итоге, выбор конструкции карданной передачи зависит от специфики применения техники и требований к ней (рисунок 1).

Целью исследований является разработка компьютерных моделей карданных передач для оптимизации эксплуатации данных конструкций в тяжелонагруженных условиях

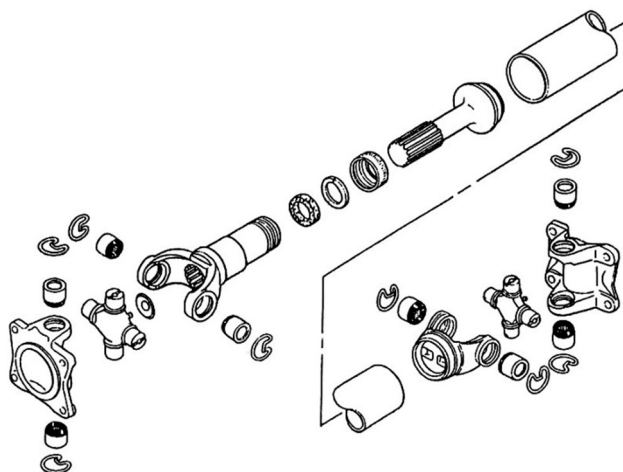


Рисунок 1. Принципиальная схема двухшарнирного вала с внутренним скольжением

## 2. Методика исследований

В настоящее время наиболее перспективным методом расчета напряженно-деформированного состояния для контактных, упруго-пластических, нелинейных и др. задач является метод конечных элементов (МКЭ). Лидером среди пакетов, позволяющих решать нелинейные задачи МКЭ с реалистическими математическими моделями

материалов является LS-DYNA. Более того, возможности этого пакета позволяют решать задачи как в квазистатической, так и в динамической постановке. LS-DYNA является, по существу, лишь решателем, данные для которого готовятся в других программных пакетах. То же самое можно сказать и об анализе результатов расчета (пост-процессинге). По-видимому, наиболее удачным в настоящий момент препроцессором является ANSYS/LS-DYNA, который по геометрической модели делает сетку конечных элементов необходимого для упруго-пластических задач качества. LS-DYNA – многоцелевой конечно-элементный комплекс, предназначенный для анализа нелинейных и быстротекающих процессов в задачах механики деформируемого твердого тела.

### 3. Результаты исследований

Наличие в конструкции компонентов различного назначения обуславливает их напряженно-деформированное состояние при различных режимах эксперимента.

Карданная передача – это комплексная система, устойчивость которой определяется воздействием разнообразных факторов. На долговечность передачи влияют инерционные силы, колебания, ударные нагрузки, износ вследствие коррозии и различных физико-химических процессов в зоне трения.

Исследования показывают, что износ карданной передачи зависит от конструктивного решения, где как полимерный, так и металлический компоненты играют важную роль. Для повышения устойчивости к износу необходимо улучшать конструкцию и материалы металлических деталей, особенно крестовины универсального шарнира и деталей шлицевого соединения.

Для оптимизации работы сложной системы карданной передачи необходим комплексный подход, учитывающий материаловедческие, конструкторские, технологические и эксплуатационные аспекты.

Системный анализ процессов при эксплуатации карданной передачи позволит решить проблемы надежности и износа. Эта система рассматривается как особый тип трибосистемы. Гипотеза о том, что технология формирования физико-химической структуры с градиентом прочности в деталях трения шарниров карданных передач является оптимальным методом снижения коррозии и износа, была выдвинута при использовании системного подхода к проблеме. Этот метод также позволяет компенсировать вредные воздействия, возникающие при эксплуатации шарниров.

Для получения материалов с заданным градиентом характеристик используются металлические и полимерные материалы, а также функциональные среды. Наполнители и модификаторы различного состава применяются для создания материалов на основе углеродистых и легированных сталей, а также полимерных связующих [6-10].

Исследования в основном направлены на конструкционные материалы, производимые промышленно в республике, что позволяет снизить затраты на импортные комплектующие. Для создания градиентных материалов на основе железных сплавов использовались стали пониженной прокаливаемости, включая продукцию Белорусского металлургического завода. Особое внимание уделялось универсальному шарниру, ресурс которого в 50-75% существенно влияет на характеристики передачи в целом.

Качество карданной передачи зависит от статических и динамических характеристик. Ручные методики расчета прочности основаны на определении размеров карданного вала и максимального передаваемого крутящего момента. Последующая проверка включает анализ изгиба, кручения и угла закручивания, а также напряжений в поперечных сечениях с минимальным моментом сопротивления.

Выбор размеров шлицов зависит от максимального и среднего удельного давления. Расчет прочности карданных валов с использованием компьютерных методов инженерного анализа включает создание трехмерных параметризованных математических моделей. Построение библиотеки таких моделей позволяет избежать ошибок при проектировании и обеспечивает правильную геометрическую форму.

По каталогу ОАО "Белкард" карданные валы разделены на семь основных схем с разными типоразмерами от трех до двенадцати схем. Всего в каталоге около 380 изделий, охватывающих все семь типоразмеров.

Анализ показал, наиболее типичными являются 6 разнотипных по структуре конструкций. Предложенные схемы охватывают около 70% изделий типа «карданные валы», показанных в каталоге для увеличения степени унификации при разработке изделий, не относящихся к 6 схемам, предложенным ранее, предлагается применять отдельные параметризованные элементы. Эти элементы можно разбить на две большие группы: «Вилки» и «Соединения вилок». Конструкция этих элементов определяется как часть изделия определенного типоразмера соответствующей схемы. Поэтому код и схема типового элемента задается через номер типоразмера и номер схемы в типоразмере. Применение типовых элементов при создании моделей может увеличить степень унификации до 80-90%.

Для предварительного построения 3D-модели карданной передачи, возможно, использовать программный пакет Pro/ENGINEER, который позволяет проводить модельные испытания частей карданной передачи в статическом режиме. Для изучения физико-механических характеристик карданной передачи в сборе при воздействии внешних факторов в динамическом режиме мощности современных компьютеров для обработки большого массива данных не хватает. Поэтому для решения данных задач используют суперкомпьютеры и специальные программные пакеты. В данном случае результаты исследований были получены с помощью программного пакета Pro/ENGINEER, которые адаптировались под программный пакет LS-DYNA и обрабатывались на суперкомпьютере семейства «СКИФ».

В ходе проведенных работ исследованы традиционные методики проектирования конструктивно и технологически подобных групп карданных валов (КВ), исходя из проведенных исследований сформулированы основные требования к сквозной компьютерной технологии конструирования – моделирования - виртуальных испытаний карданных валов. Выявлены конструктивные параметры карданных валов, определяющие возможность создания гаммы конструкций неизменной структуры. Доработаны электронные модели деталей и сборки карданного вала и комплекта ассоциативных чертежей, анализ геометрии деталей и их собираемости. Разработана рациональная методика формирования конечно-элементных сеток деталей КВ в глобальной системе координат изделия. Сформированы граничные условия динамического расчета для одного типа универсальных шарниров: величины внешних нагрузок, скоростей, ускорений, характер их изменения во времени, параметры закреплений деталей (учет структуры, прочностных свойств по объему детали: сердцевина-поверхность), типы контактных взаимодействий и др. Выполнены экспериментальные расчеты динамической прочности на суперкомпьютере СКИФ и в режиме удаленного доступа. Анализ влияния технологии сварки на выходные параметры карданных валов. Разработана технология удаленного доступа к суперкомпьютерам на пропускных каналах с низкой пропускной способно-

стью. Проведены работы по разработке конструкций карданных передач с применением мультипроцессорной техники для агропромышленного комплекса. В зависимости от назначения сельскохозяйственной машины применяется карданный вал либо с предохранительной, либо с обгонной муфтой. Предохранительная муфта служит для защиты от перегрузок сельхозмашин и тракторов, вызванных большими пусковыми моментами, перегрузкой рабочих органов (блокировок), пульсацией нагрузок привода. Карданные валы с такой муфтой устанавливаются на картофеле уборочных комбайнах.

Карданный вал АК-40.016.3000-065/098 с обгонной муфтой применяется для приводов сеялок точного высева (СТВ). Конструкция карданного вала АК-40.016.3000-065/098 представлена на рисунке 2.

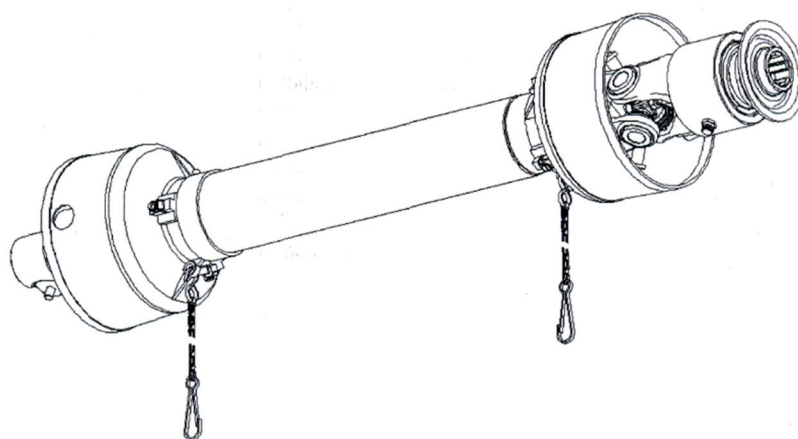


Рисунок 2. Конструкция карданного вала АК-40.016.3000-065/098

Необходимость комплектования СТВ и других сельхозмашин такими валами диктуется условиями их эксплуатации, когда возникают большие инерционные моменты, которые при быстром (резком) отключении вала отбора мощности трактора могут приводить к разрыву ремней сеялки, поломке карданного вала и других деталей и агрегатов в цепи привода сеялки. Основные технические характеристики карданного вала АК-40.016.3000-365/098 приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные технические характеристики карданного вала АК-40.016.3000-365/098

момент поворота на угол не менее 55°	не более 5 Н-м
усилие осевого перемещения в шлицевом соединении	не более 200 Н
масса карданного вала	не более 14 кг
длина карданного вала: - минимальная в сжатом до упора положении $L_{min}$	650 мм
- максимальная в рабочем положении $L_{max}$	980мм
максимальный крутящий момент: - без остаточной деформации - без разрушения деталей	не менее 980 Н-м не менее 1500 Н м

Карданные валы сельскохозяйственных машин, предназначенные для передачи крутящего момента от вала отбора мощности (ВОМ) трактора к валу приема мощности (ВПМ), по типам и основным параметрам согласно ГОСТ 13758-89 подразделяются на:

- телескопические с универсальными карданными шарнирами без защитного кожуха;
- нетелескопические с универсальными карданными шарнирами без защитного кожуха;
- телескопические с универсальными карданными шарнирами с защитным кожухом;
- телескопические с универсальным карданным шарниром и карданным шарниром равных угловых скоростей с защитным кожухом;
- телескопические с двумя карданными шарнирами равных угловых скоростей с защитным кожухом;
- телескопические с предохранительной муфтой и универсальными карданными шарнирами с защитным кожухом;
- телескопические с предохранительной муфтой и универсальным карданным шарниром, карданным шарниром равных угловых скоростей с защитным кожухом.

Карданные валы сельскохозяйственных машин сохраняют работоспособность при температуре окружающей среды от минус 20°C до плюс 40°C. Работоспособность защитного кожуха карданного вала из полимерных материалов определяется температурным диапазоном окружающей среды от минус 40°C до плюс 50°C. Конструкция защитного кожуха карданных валов сельхозмашин в сочетании с защитными козырьками ВОМ трактора и ВПМ машины обеспечивают взаимное перекрытие для безопасных условий работы механизатора. Цвет защитного кожуха желтый или оранжевый (по требованию потребителя допускается карданные валы не окрашивать).

Твердотельная модель карданной передачи для сельскохозяйственной техники, представленная на рисунке 3, подвержена влиянию различных факторов. Среди них - инерционные силы и резонансные колебания, вызванные массой и условиями эксплуатации; ударные нагрузки, возникающие в сопряжениях из-за нестабильной эксплуатации, наличия зазоров и осевых перемещений; а также коррозионно-механический износ, обусловленный воздействием окружающей среды и продуктов физико-химических превращений в зоне трения.

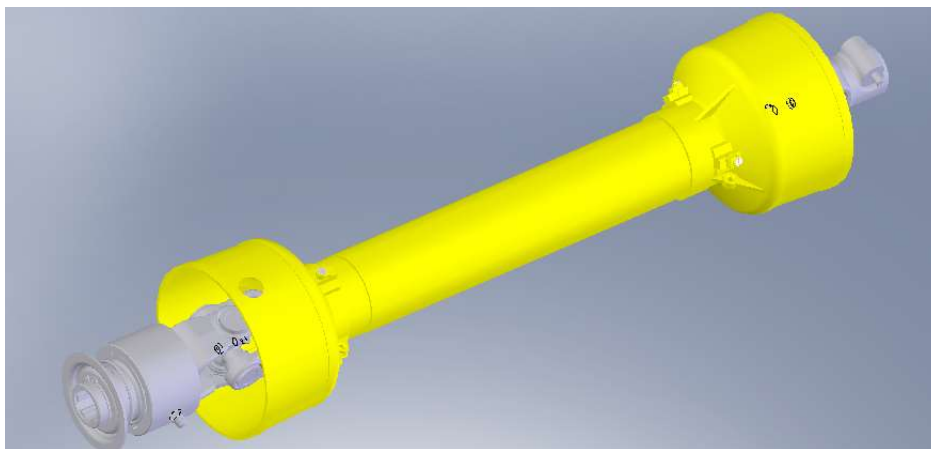


Рисунок 3. Твердотельная модель карданной передачи для сельскохозяйственной техники.

Важно учитывать влияние различных факторов на износ компонентов, таких как типы нагрузок, скорости вращения и температурные условия.

Для решения проблемы коррозионно-механического изнашивания необходимо производить постоянный мониторинг состояния деталей карданной передачи и проводить профилактические работы. Также важно улучшить качество материалов, используемых для изготовления компонентов, с целью повышения их стойкости к коррозии.

Исследования в области триботехники и материаловедения позволят разработать новые конструкции и материалы, способные увеличить срок службы карданной передачи и снизить износ ее компонентов. Анализ нагрузок и условий эксплуатации позволит оптимизировать работу трибосистемы и повысить ее надежность.

Таким образом, комплексный подход к проблеме износа карданной передачи позволит разработать эффективные стратегии по улучшению ее работы и повышению долговечности компонентов. Важно учитывать все аспекты процесса изнашивания и принимать меры по его предотвращению, чтобы обеспечить безопасность и надежность работы технических устройств на основе карданных передач.

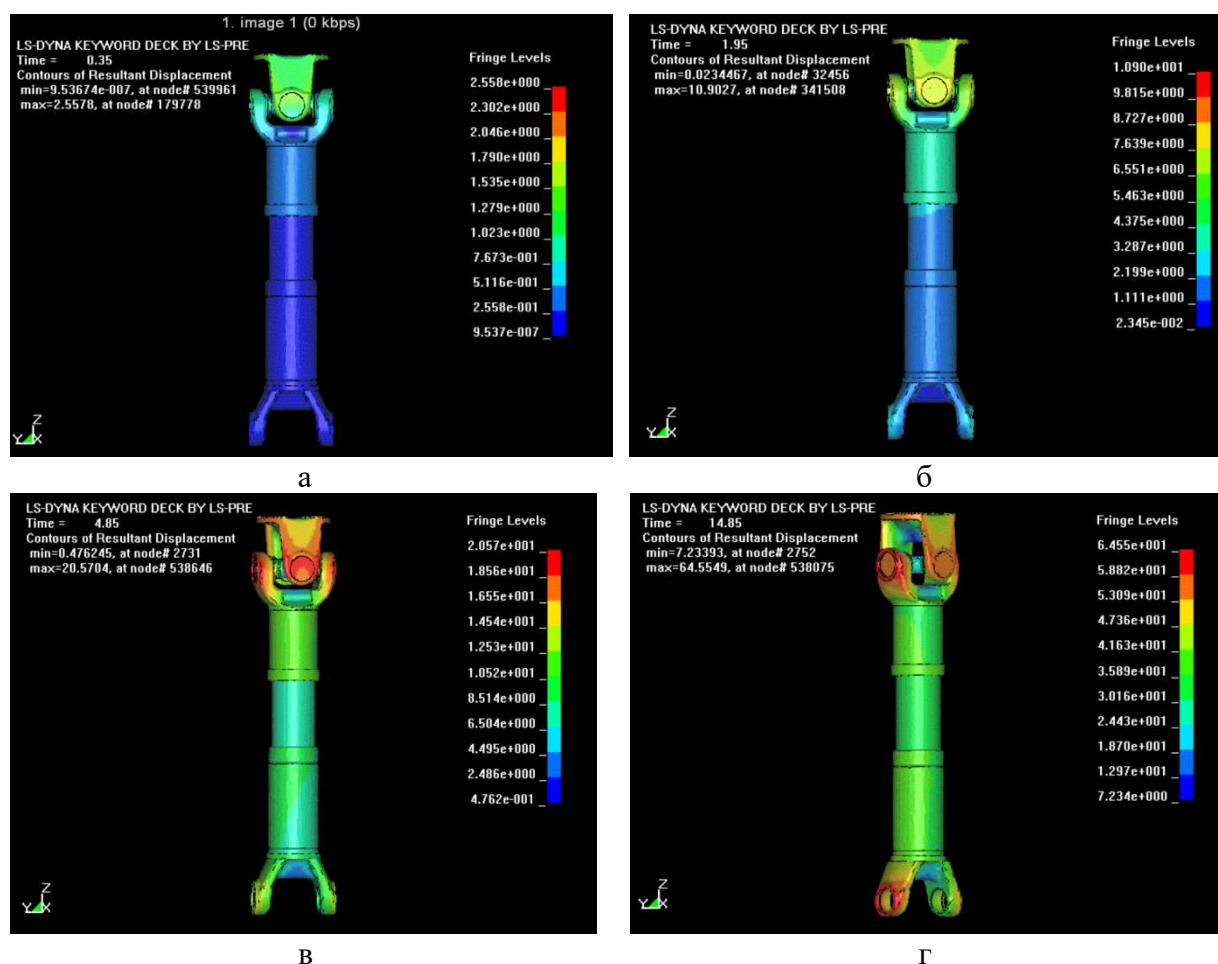


Рисунок 4. Визуализация напряженно-деформированного состояния карданной передачи в начальный промежуток времени передачи крутящего момента от двигателя к ведущему мосту,

где: а – 0.35с; б – 1.95с; в – 4.85с; г – 14.85с.

При создании нового типоряда карданных передач для оптимизации конструкции использовали программную среду LS-DYNA и суперкомпьютер «Скиф» (ОИПИ НАН Беларуси). В ходе проведенных исследований был осуществлен анализ напряжённо-деформированного состояния карданной передачи грузового автомобиля в различных условиях нагружения с помощью компьютерных технологий на базе мультипроцессорных вычислительных систем. Определены критические нагрузки, возникающие в карданной передаче в момент пуска (рисунок 4).

#### 4. Заключение

Моделирование деталей и изделий карданной передачи в программной среде «LS-DYNA» показало, что наиболее проблемными элементами конструкции карданной передачи являются шлицевые соединения, фланец-вилка. Проведенные исследования позволили оптимизировать конструкцию карданной передачи. В результате компьютерного моделирования шлицевого соединения и методами физико-математического анализа, была установлена оптимальная толщина полимерного покрытия в шлицевом соединении карданной передачи, при которой напряжения, возникающие в данной паре трения, минимальны. Результаты моделирования подтверждены результатами расчетов, проведенных в программной среде «LS-DYNA».

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Проектирование универсальных шарниров и ведущих валов. Л.: Машиностроение, 1984. -464 с.
2. Губич Л. В. Автоматизация процессов проектирования в машиностроении. - Мн: ОИПИ НАН Беларуси, 2002 - 308 с.
- Малаховский Я. В., Лапин А. А., Веденеев Н. К. Карданные передачи. – М.: Мир, 1962 – 269с.
3. Heinicke G., Fleischer G. Tribochemische Wirkungen in der Technik. Zum Einfluss tribochemischer Reactionen auf Reibungs-Schmierungs- und Verschleissprozesse. - Die Technik, Heft 31.1976. - S.458 - 461.
4. Кравченко, В. И. Карданные передачи: конструкции, материалы, применение. / В. И. Кравченко, Г. А. Костюкович, В. А. Струк; под ред. В. А. Струка. – Минск: Тэхналогія, 2006. – 523 с.
5. Patent Application USA 10/006.683/ 12.10.2001г. /Лобозов В. П., Шепеляковский К. З., Никитин С. И., Кузнецов А. А., Кравченко В. И., Костюкович Г. А., Гагасов А. М.
- Daskalov, A.Y. 'Kinematic analysis of cardan drives', Mechanism and Machine Theory – 1990 - Vol. 25 - №. 5 - P.479–486.
6. Krishna, V., Naganathan, N. G., Phadnis, R. and Dukkupati, R. V. (2000) Analysis of driveline loads in an automotive powertrain with multiple cardan joints', International Journal. Series C, Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing -2000- Vol. 214 - №5, P.509–522.
7. Карданный вал наземных транспортных средств. Пат РБ № 47. В60К17/22. – 2000. /Дроздов В. А., Костюкович Г. А., Кравченко В. И.
8. Шарнир карданного вала. Патент РФ на изобретение № 2176754 /Лобозов В. П., Шепеляковский К. З., Никитин С. И., Кузнецов А. А., Кравченко В. И., Костюкович Г. А., Семеняко М. М., Гагасов А. М.

Поступила в редколлегию 22.01.2024 г.