

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОМПЬЮТЕРНОГО АНАЛИЗА И УСТРАНЕНИЯ ИЗБЫТОЧНЫХ СВЯЗЕЙ В ПЛАНЕТАРНЫХ ПЕРЕДАЧАХ ГУСЕНИЧНЫХ ТРАКТОРОВ**

**Пивоваров А.О.**

*ФГБОУ ВПО «Волгоградский Государственный Технический Университет», Волгоград, Россия (400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28).*

---

Исследование динамики планетарных механизмов трактора показали, что основной причиной преждевременного выхода из строя является неравномерное распределение нагрузки между сателлитами, вызванное погрешностями изготовления и сборки. При этом чувствительность к этим погрешностям обусловлена наличием избыточных связей. На статически определимый механизм изменение размеров звеньев не влияет. Следовательно, статически определимые механизмы дают не только снижение трудоемкости, но и одновременно повышают долговечность. В данной работе было рассмотрено 3 конструкции планетарных передач без избыточных связей. Использование данных статически определимых конструкций позволяет увеличить долговечность механизма поворота в 2 раза, за счет равномерного распределения нагрузки между сателлитами и дает возможность работать механизму поворота трактора в более нагруженных условиях. Полученные конструкция и результаты исследования могут быть полезны разработчикам автотракторной техники при проектировании трансмиссий с планетарными механизмами поворота.

---

Ключевые слова: компьютерный анализ, планетарная передача, избыточные связи, гусеничный трактор, долговечность, механизм поворота.

## **DEVELOPMENT OF COMPUTER ANALYSIS METHODS AND REDUNDANT LINKS REMOVAL IN PLANETARY GEARS OF CRAWLER TRACTORS**

**Pivovarov A.O.**

*Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia (400005, Volgograd, Lenin Avenue, 28)*

---

Dynamics research of the tractor planetary mechanism has revealed that the main cause of premature mortality is the load unequal distribution between the satellites caused by errors in manufacturing and assembly. The sensitivity to these errors happens due to the presence of redundant links. Change of links sizes doesn't influence statically definable mechanism. Therefore, statically definable mechanisms do not only decrease the labor input, but also at the same time increase durability. In this work we study three constructions of a planetary gears with no redundant links. The use of this statically determinate constructions increases the durability of a slewing mechanism in 2 times by load equal distribution between the satellites and provides an opportunity to work mechanism for turning of the tractor more loaded conditions. The giving constructions and results of the research can be useful for automotive engineering developers in designing of transmission with planetary rotation mechanism.

---

Keywords: computer analysis, planetary gear, redundant links, crawler tractor, durability, mechanism for turning.

### **Введение**

Одной из ключевых проблем современного тракторостроения является проблема повышения долговечности тракторов, это связано с постоянным ростом требований к данному показателю и необходимостью снижения затрат на производство. Решение данной проблемы в первую очередь заключается в повышении долговечности лимитирующих узлов, к которым относятся планетарные передачи, применяемые на серийных отечественных (ДТ, ВТ, ЧЕТРА, ХТЗ) и зарубежных (John Deere, Caterpillar) гусеничных сельскохозяйственных и промышленных тракторах в механизмах поворота, конечных и в коробках передач.

Исследования динамики планетарных механизмов тракторов показали, что основной причиной преждевременного выхода их из строя является неравномерное распределение нагрузки между сателлитами и по длине зубчатых зацеплений шестерен, вызванное погрешностями изготовления и сборки [5]. При этом чувствительность к этим погрешностям обусловлена наличием избыточных связей или статической неопределимостью этих механизмов. Избыточными связями называются такие связи, устранение которых не увеличивает подвижности механизма, и мешают самоустанавливаться под действием нагрузки, т.е. ведут к неравномерному распределению нагрузки. Механизмы без избыточных связей или с уменьшенным количеством позволяют расширить допуски на изготовление, повысить долговечность узла, снижают трудоемкость, т.к. такие механизмы не требуют высокой точности изготовления.

В последние годы наблюдается тенденция роста нагруженности узла за счет увеличения рабочих скоростей движения и передаваемых мощностей, а достигнутый ресурс планетарных передач тракторов не превышает 7-10 тыс. моточасов, при необходимом ресурсе 15-17 тыс. моточасов.

#### **Цели исследования:**

- разработка методики компьютерного анализа количества избыточных связей и зависимостей в планетарных механизмах;
- разработка конструкций планетарных передач с уменьшенным количеством избыточных связей, обеспечивающих повышенную долговечность.

#### **Методы исследования**

В ходе исследования использовались методы теории автомобиля и трактора, теории машин и механизмов. Применялись современные методы программного моделирования Autodesk Inventor.

Проверить механизм на наличие в нем избыточных связей можно путем подсчета их по структурным формулам. Формула предложена Малышевым А. П.[5]:

$$q = w - 6n + \sum_{i=1}^{i=5} ip_i, \text{ или в развернутом виде: } q = w - 6n + 5p_V + 4p_{IV} + 3p_{III} + 2p_{II} + p_I,$$

где  $q$  – число избыточных связей;  $n$  – число подвижных звеньев;  $w$  – подвижность механизма;  $p_i$  – число кинематических пар  $i$ -го класса, накладывает  $ip_i$  условий связи.

В ручную такой расчет часто оказывается ошибочный и трудоемким, поэтому была разработана методика компьютерного анализа избыточных связей и зависимостей в планетарных механизмах:

- строится 3D модель в программе Autodesk Inventor (рис. 1);

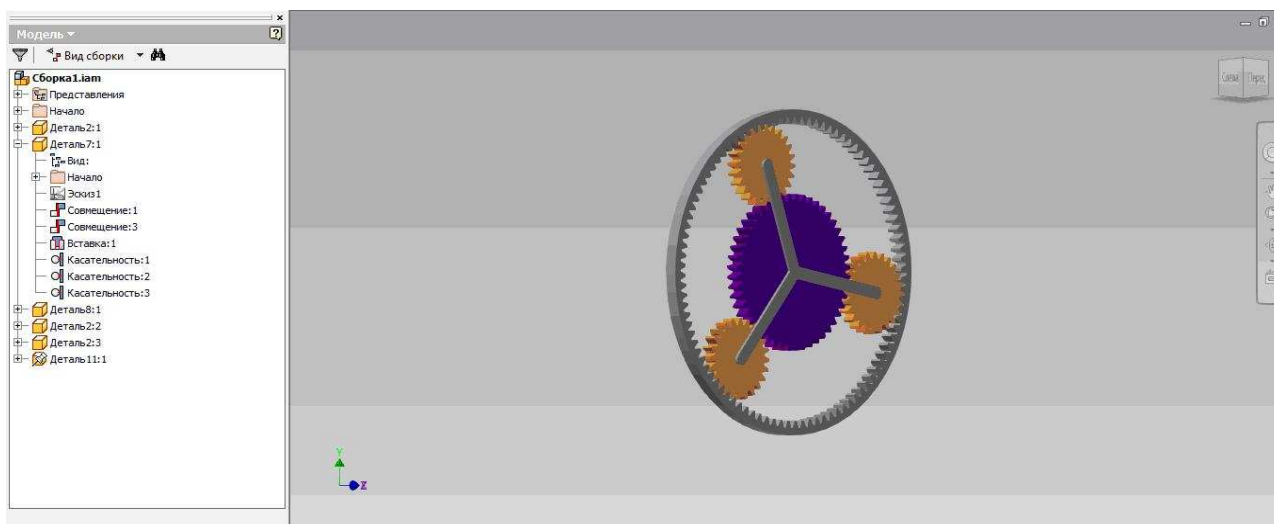


Рисунок 1 – 3D модель механизма в Autodesk Inventor

- в сборке задаются зависимости между деталями (расположение друг относительно друга). Для того чтобы задать связи между разными деталями в Autodesk Inventor существуют сборочные зависимости. При наложении зависимостей удаляются степени свободы, и ограничивается возможность перемещения компонентов;

- Так как в Autodesk Inventor не существует такого понятия, как кинематическая пара, то мы создали эквивалент таблице Решетова (таблица классов кинематических пар, известная в курсе теории машин и механизмов);

- Для подсчета количества избыточных связей под Inventor была написана программа, которая по формуле Малышева с высокой долей достоверности считает избыточные связи;

Получаем окно с описанием зависимостью и количеством избыточных связей:

Изм. зависимости				Анализ сборки	
Имя зависимости	Тип зависимости	Количество ограничений	Между деталями	Подвижность	
Совмещение:1	Совмещение		Нет	1	
Совмещение:3	Совмещение		Нет		
Вставка:1	Вставка	5	Да		
Вставка:2	Вставка	5	Да		
Касательность:1	Касательность	2	Да		
Вставка:3	Вставка	5	Да		
Вставка:4	Вставка	5	Да		
Касательность:2	Касательность	2	Да		
Касательность:3	Касательность	2	Да		
Совмещение:4	Совмещение		Нет		
Совмещение:5	Совмещение		Нет		
Касательность:4	Касательность	2	Да		
Касательность:5	Касательность	2	Да		
Касательность:6	Касательность	2	Да		

Анализ сборки

Количество подвижных деталей: 5

Количество избыточных связей: 3

Рисунок 2 – диалоговое окно вывода количество избыточных связей

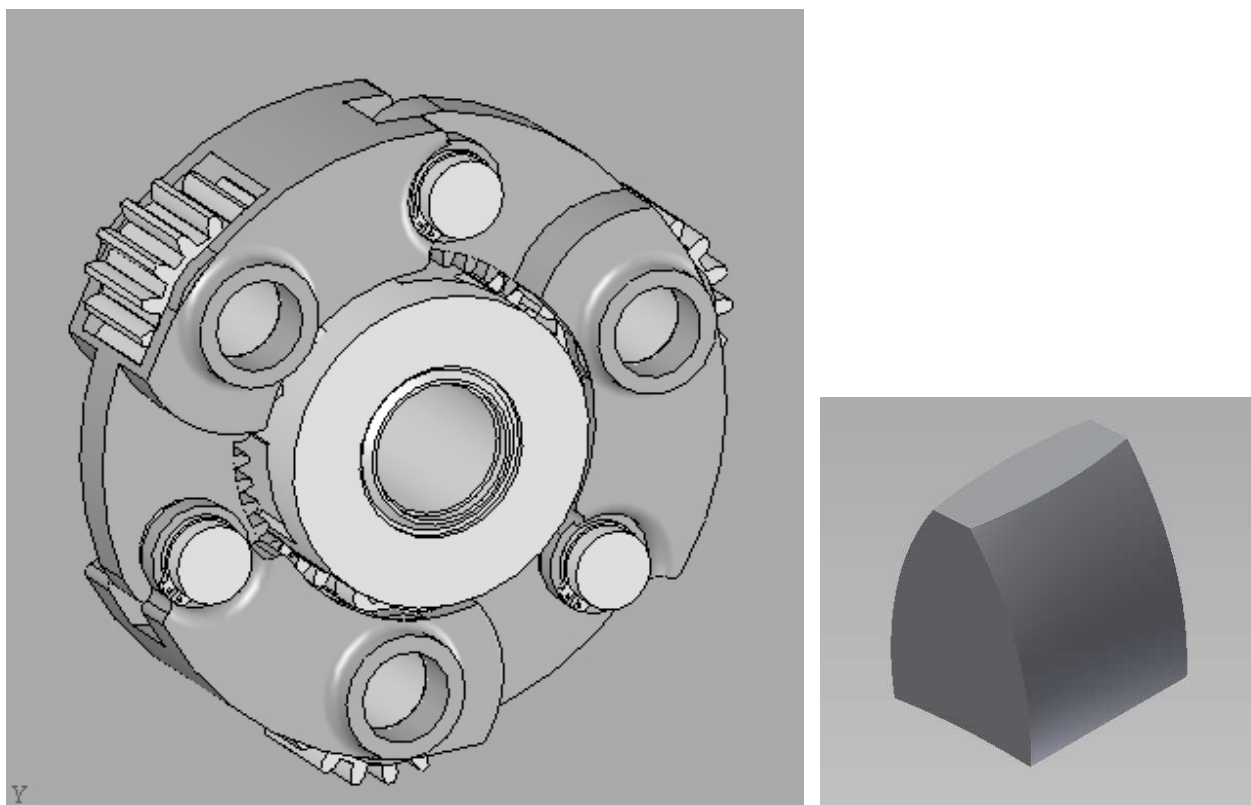
### Результаты исследования

С помощью приведенной выше методики, для решения проблемы статически неопределимых систем, на кафедре «автомобиле- и тракторостроение» Волгоградского Государственного Технического Университета были спроектированы различные конструкции

планетарных передач [1,2,3], которые не требуют повышенной точности изготовления и сборки и позволяют равномерно распределять нагрузку в планетарных механизмах поворота, коробках и конечных передачах гусеничных машин.

- Планетарная передача с «бочкообразным зубом»

Указанный технический результат в данной конструкции достигается тем, что внешние шлицы и зубья сателлитов выполнены с бочкообразным продольным профилем. Это позволяет секторам сателлитного блока, за счет того что они приобретают угловую подвижность, самоустанавливаться между центральными колёсами, выравнивать нагрузку между сателлитами и по длине их зубьев с учетом погрешностей изготовления всех элементов планетарной передачи [4]. Сателлитный блок, составленный из секторов, имеет не менее чем четыре сателлита, что позволяет получить дополнительную степень свободы, в противном случае образуется жесткая конструкция, которая не позволит в достаточной степени выравнивать нагрузку между сателлитами и самоустанавливаться секторам сателлитного блока между центральными колесами.



а)

б)

Рисунок 3 – Планетарная передача с «бочкообразным зубом» (а - водило, б - бочкообразный зуб в разрезе)

Результаты расчета на избыточные связи приведены в таблице 1:

Таблица 1

Результаты расчета планетарной передачи с «бочкообразным зубом»

	Подвижность механизма, $w$	Число подвижных звеньев, $n$	$P_v$	$P_{lv}$	$P_l$	Число избыточных связей, $q$
3-ех сателлитное исполнение	8	11	8	3	6	0
4-ех сателлитное исполнение	10	14	10	4	8	0
5-ти сателлитное исполнение	12	17	12	5	10	0

- Планетарная передача с «карданным шарниром»

Технический результат в данной конструкции планетарной передачи достигается за счет того, что участки узкого шлицевого соединения ступицы и сателлитного блока [7], составленного из секторов, имеют осевые и радиальные зазоры, которые в совокупности с возможностями относительных поворотов секторов сателлитного блока за счет карданных шарниров позволяют сателлитному блоку самоустанавливаться между центральными колёсами, выравнивая нагрузку между сателлитами и по длине их зубьев.

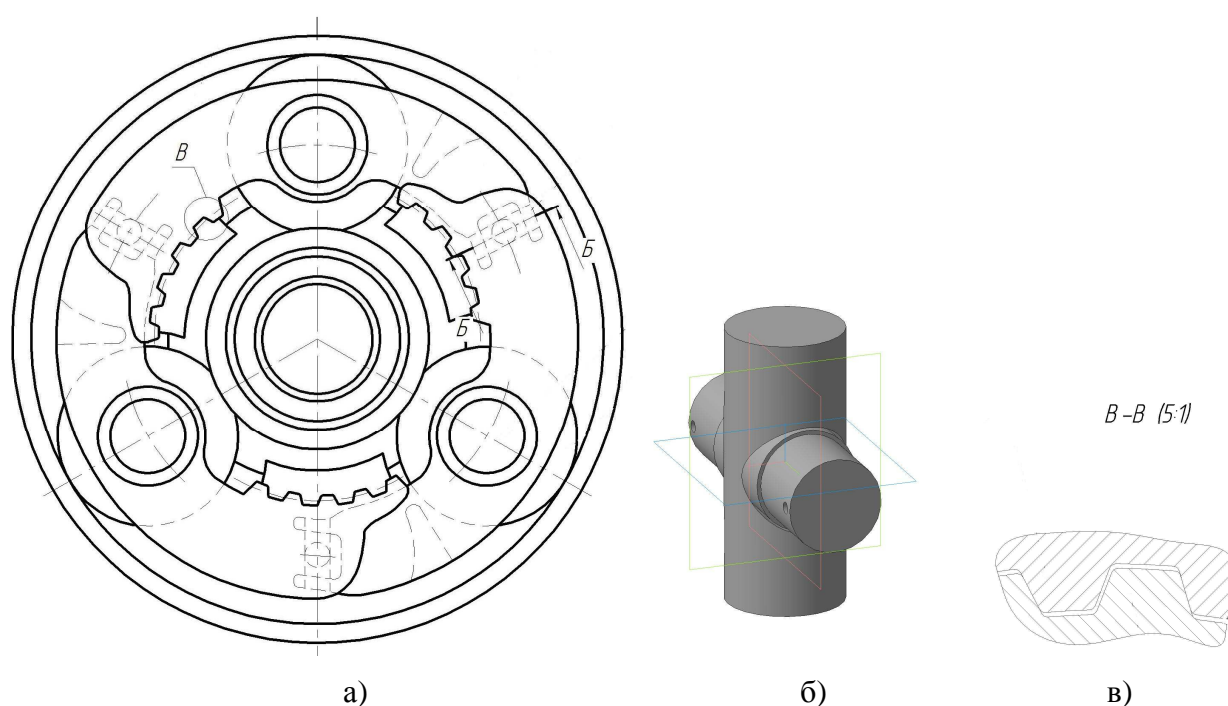


Рисунок 4 – Планетарная передача с «карданным шарниром» (а - водило, б – карданный шарнир, в – шлицевое соединение)

Результаты расчета на избыточные связи приведены в таблице 2:

Таблица 2

Результаты расчета планетарной передачи с «карданным шарниром»

	Подвижность механизма, $w$	Число подвижных звеньев, $n$	$P_v$	$P_{IV}$	$P_{II}$	Число избыточных связей, $q$
3-ех сателлитное исполнение	8	11	5	6	6	3
4-ех сателлитное исполнение	10	14	6	7	8	0
5-ти сателлитное исполнение	12	17	7	8	10	-3

- Планетарная передача с «тросовым соединением»

Технический результат данной конструкции достигается за счет того, что тросы связывают между собой сателлиты и обеспечивают только одно вращательное движение вокруг оси, тем самым устраняя две избыточные связи, что позволит увеличить долговечность механизма поворота тракторов, за счет равномерного распределения нагрузки между сателлитами и по длине их зубьев. Наличие цангового зажима позволит регулировать расстояние между секторами сателлитного блока и тем самым устранить погрешность изготовления деталей планетарной передачи для самоустановки сателлитного блока по внешней поверхности венца ступицы, что повысит надежность.



Рисунок 5 – Планетарная передача с «тросовым соединением»

Результаты расчета на избыточные связи приведены в таблице 3:

Таблица 3

### Результаты расчета планетарной передачи «с тросовым соединением»

	Подвижность механизма, $w$	Число подвижных звеньев, $n$	$P_V$	$P_{IV}$	$P_{II}$	$P_I$	Число избыточных связей, $q$
3-ех сателлитное исполнение	14	11	5	6	6	3	0
4-ех сателлитное исполнение	18	14	6	8	8	4	0
5-ти сателлитное исполнение	22	17	7	10	10	5	0

Для проверки адекватности полученных конструкций, воспользуемся коэффициентом неравномерности распределения нагрузки. Из полученных графиков, следует вывод о снижении данного показателя при применении новых конструкций ПП.

$\Omega$

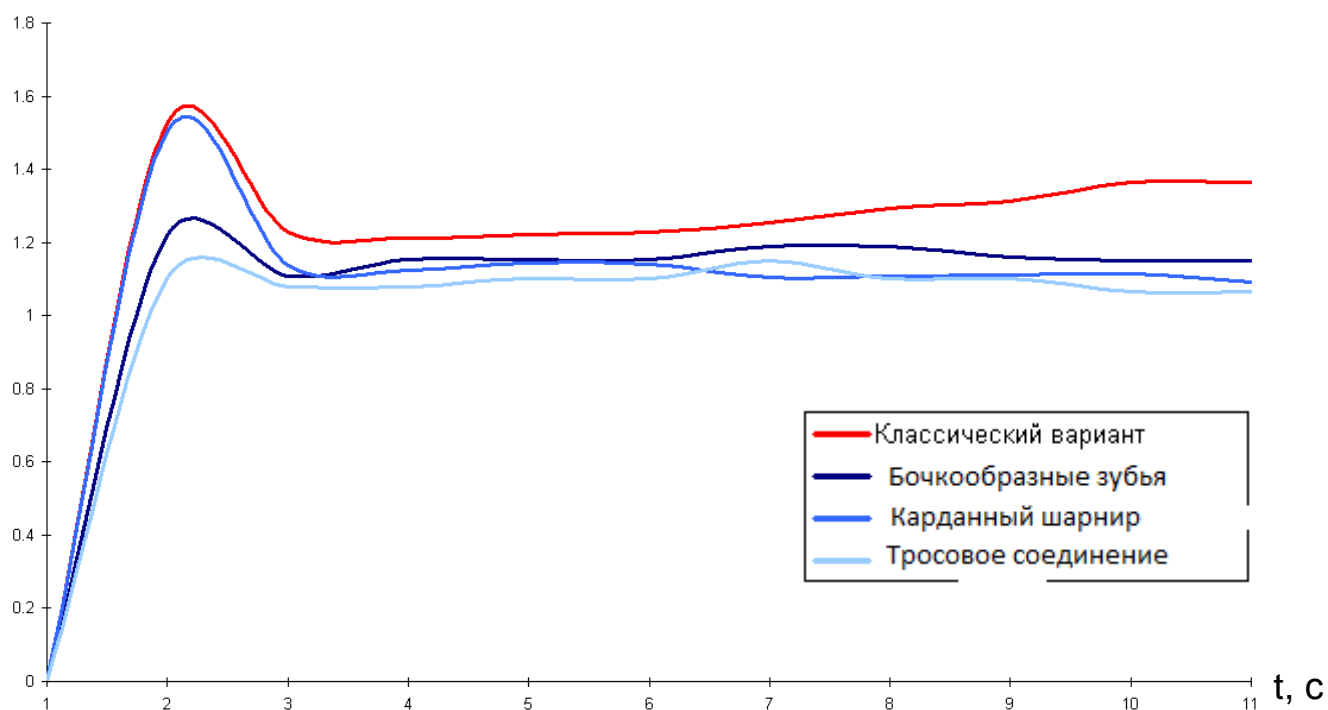


Рисунок 6 – Коэффициент неравномерности распределения нагрузки между сателлитами

Из данных графиков, можно сделать вывод о том, что конструкция с тросовым соединением сателлитного блока наиболее равномерно выравнивает нагрузку, а следовательно имеет большую долговечность из представленных конструкций.

### Заключение

Итогом работы является создание методики компьютерного анализа избыточных связей в планетарных механизмах. Которая позволяет, как анализировать старые конструкции, так и создавать новые конструкции без избыточных связей. т.е. статически

определимых. Данные конструкция должны не только равносильно заменять существующие, но и увеличивать ресурс работы механизмов поворота гусеничных тракторов в 1.5-2 раза, что равняется 13-17 тыс. моточасов.

### Список литературы

1. П. м. 103591 РФ, МПК F 16 Н 1/48. Планетарная передача / Вл.П. Шевчук, А.О. Пивоваров, М.В. Ляшенко, В.В. Шеховцов, А.В. Котовсков; ВолгГТУ. - 2011.
2. П. м. 108526 РФ, МПК F 16 Н 1/48. Планетарная передача / Вл.П. Шевчук, А.О. Пивоваров, А.В. Петренко, В.В. Шеховцов, М.В. Ляшенко, А.В. Калмыков; ВолгГТУ. - 2011.
3. П. м. 132514 РФ, МПК F16Н1/48. Планетарная передача / Вл.П. Шевчук, А.О. Пивоваров, И.В. Редькин, В.В. Шеховцов, М.В. Ляшенко, А.В. Морозов; ВолгГТУ. - 2013.
4. Пивоваров, А.О. Исследование применяемых планетарных передач и механизмов на избыточные связи / А.О. Пивоваров, Вл.П. Шевчук // Вестник Академии военных наук. - 2011. - № 2 (спецвыпуск). - С. 316-321.
5. Пивоваров, А.О. Повышение долговечности планетарного механизма поворота: монография / А.О. Пивоваров, Вл.П. Шевчук. - Saarbrucken (Germany) : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. - 105 с.
6. Пивоваров, А.О. Разработка конструкции планетарной передачи для механизма поворота сельскохозяйственного трактора Четра-6 / А.О. Пивоваров, Вл.П. Шевчук // Изв. ВолгГТУ. Серия "Наземные транспортные системы". Вып. 4 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2011. - № 12. - С. 38-41.
7. Пивоваров, А.О. Разработка конструкции планетарной передачи без избыточных связей / А.О. Пивоваров // Фундаментальные исследования. - 2013. - № 6 (ч. 3). - С. 556-560.
8. Редькин, И.В. Классификация оптимальных по избыточным связям планетарных передач типа 2КН / И.В. Редькин, Вл.П. Шевчук, А.О. Пивоваров // Успехи современного естествознания. - 2012. - № 6. - С. 79-80.

### Рецензенты:

Ляшенко М.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой АТС, Волгоградский государственный технический университет, г.Волгоград.

Шеховцов В.В., д.т.н., профессор, Волгоградский государственный технический университет, г.Волгоград.