

## О ВОЗМОЖНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ УТВЕРЖДЕНИЯ О РАВНОМЕРНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ НАГРУЗКИ ПО САТЕЛЛИТАМ В ПЛАНЕТАРНОЙ ПЕРЕДАЧЕ

*Серг Я.А.<sup>1</sup>, Серебряков И.А.<sup>2</sup>, Жуков И.А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский горный университет, г.Санкт-Петербург;*

<sup>2</sup>*Сибирский государственный индустриальный университет, г.Новокузнецк*

**Ключевые слова:** планетарный редуктор, многосателлитный планетарный механизм, спутник, распределение мощности.

**Аннотация.** В статье изложена задача полного уравнивания самоустанавливающегося многосателлитного планетарного механизма. Рассчитана новая конструкция трехспутникового планетарного редуктора, обеспечивающего равномерное распределение мощности по всем спутникам при одновременном уменьшении его размеров и увеличении КПД механизма. Проведен вычислительный эксперимент, отражающий характер распределения нагрузки по трем спутникам.

## ON THE POSSIBILITY OF EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE STATEMENT ABOUT THE UNIFORM DISTRIBUTION OF THE LOAD ON SATELLITES IN THE PLANETARY TRANSMISSION

*Serg Ya.A.<sup>1</sup>, Serebryakov I.A.<sup>2</sup>, Zhukov I.A.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Saint-Petersburg mining university, Saint-Petersburg;*

<sup>2</sup>*Siberian state industrial university, Novokuznetsk*

**Keywords:** planetary gearbox, multi-satellite planetary mechanism, satellite, power distribution.

**Abstract.** The article describes the problem of complete balancing of the self-aligning multi-satellite planetary mechanism. The new design of a three-satellite planetary gearbox is calculated, which ensures uniform power distribution across all satellites while reducing its size and increasing the efficiency of the mechanism. The computational experiment was performed that reflects the nature of the load distribution across three satellites.

В настоящее время планетарные редукторы используются в разных областях, поэтому любое усовершенствование данных механизмов, в частности увеличение КПД или повышение надежности имеет весьма актуальное значение. Несмотря на преимущественные показатели планетарного механизма, такие как малые массо-габаритные размеры, простота компоновки механизмов, существует проблема распределения нагрузки по спутникам [1-4].

В работе Дворникова Л.Т. и Герасимова С.П. [5] подробно излагаются проблемы современного состояния теории планетарных механизмов. В общем виде проблема может быть описана так: все существующие планетарные механизмы, а также создающиеся на данный момент при расчете их массо-габаритных параметров, прочности и передаваемой мощности могут быть рассмотрены как механизмы, в которых есть один спутник, передающий всю мощность от ведущего колеса к водилу, а также наоборот, независимо от количества спутников в передаче.

В исследованиях профессора Кудрявцева В.Н. [1] приведено утверждение о том, что при работе многосателлитных планетарных передач мощность до 80% по факту передается через один сателлит, в то время как другие сателлиты не имеют зацеплений с центральными колесами. В любой момент времени данная нагрузка может передаваться через разные сателлиты, поэтому каждый из сателлитов должен иметь прочность, удовлетворяющую полному его нагружению. Из этого следует, что необходимо силовой расчет производить с учетом условия, что вся мощность от ведущего колеса к ведомому передается через один сателлит. Это нужно для обеспечения необходимой прочности элементов передачи. Кроме того, участие других сателлитов в передаче мощности может всего лишь дополнить прочность редукторов и их долговечность.

Актуальным становится вопрос об изменении конструкции многосателлитных планетарных передач таким образом, чтобы можно было гарантировать одинаковое участие всех сателлитов в передаче мощности. В случае удачного изменения конструкции, нагрузки, которые действуют на каждый сателлит, возможно уменьшились бы в (число сателлитов) раз, а это в свою очередь привело бы к уменьшению массо-габаритных параметров передач (в разы), что дало бы высокий экономический эффект, имеющий инновационный результат.

В своих исследованиях профессор Дворников Л.Т. пришел к основополагающему выводу – установка на водило более одного сателлита является невозможной, потому что делает многосателлитную планетарную передачу неработоспособной, либо, благодаря зазорам в зацеплении, мощность в таком механизме передается только через один сателлит. В последующих исследованиях было доказано [6], что для создания уравновешенных многосателлитных планетарных передач к ведущему звену требуется добавлять группы звеньев, которые имеют нулевую подвижность, в структуру которых входят дополнительные сателлиты. Так, например, на рисунке 1 изображен рехсателлитный планетарный механизм, включающий в себя шестизвенную группу нулевой подвижности. Применение механизма в приведенном исполнении обеспечивает равномерную работу передачи, а также уравновешивание инерционных сил от сателлитов и рычажных звеньев.

В рассматриваемом механизме содержится центральное подвижное колесо 1 имеющее внешнее зацепление, неподвижный венец 8 с внутренним зацеплением, водило А-А', три сателлита 2,3,4, которые находятся в связи в шарниры с двумя трехпарными звеньями, выполненными в форме полуколец 5,6.

В рассматриваемом механизме число подвижных звеньев  $n=7$ , число кинематических пар  $p_5 = 7$ , число пар зацепления  $p_4 = 6$ .

Применив формулу Чебышева П.Л., получим подвижность:

$$W = 3n - 2p_5 - p_4 = 3 \cdot 7 - 2 \cdot 7 - 6, \quad (1)$$

что доказывает работоспособность рассматриваемого механизма, а также способность самоустанавливаться.

На основе представленной на рис. 1 схемы был рассчитан пример планетарного механизма и спроектирован стенд (рис. 2), который при

физическом исполнении может быть использован для проведения экспериментальных исследований и подтверждения предположения о том, что такая конструкция механизма позволяет равномерно передать мощность от ведущего колеса к ведомому звену всем сателлитами одновременно.

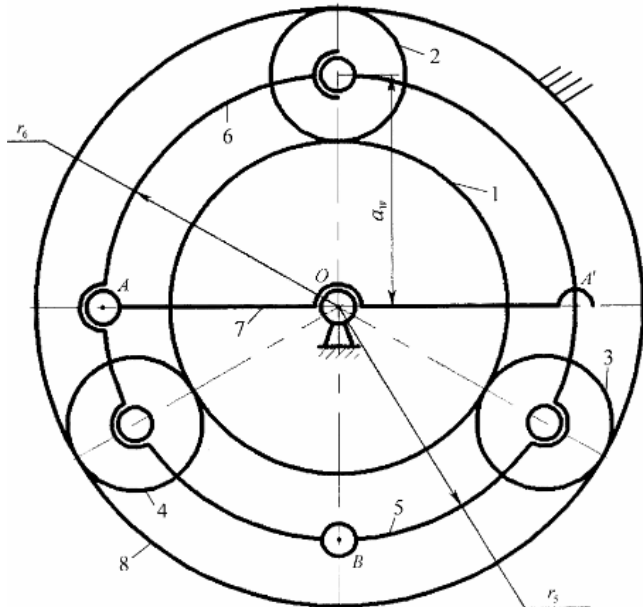


Рис. 1. Схематическое изображение трехсателлитного планетарного механизма, предложенного Хайдуковой Я.А. [7]

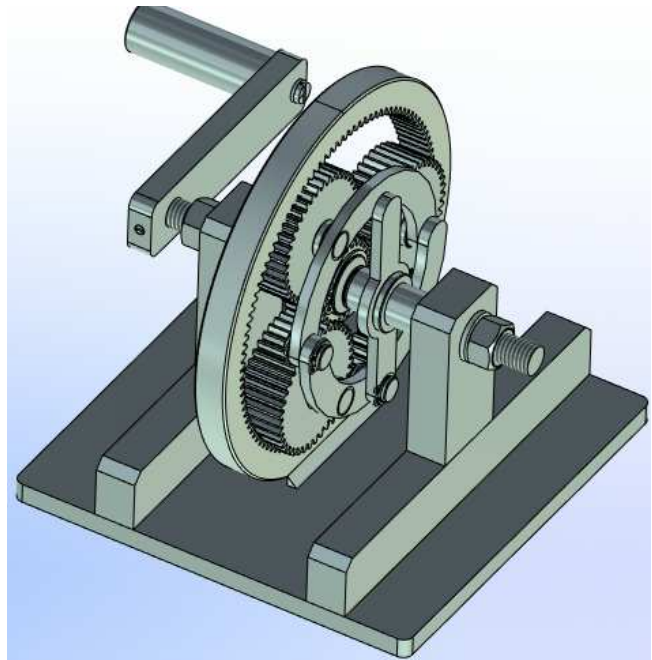


Рис. 2. Сборочная 3D модель экспериментального стенда

Для подтверждения возможности решения проблемы равномерного распределения нагрузки по сателлитам проведен вычислительный эксперимент в программном комплексе «Т-Flex Динамика». В расчетах учитывалась погрешность изготовления зубьев сателлитов путем уменьшения их размеров на величину 0,5% от действительного значения, что вполне согласуется с применяемыми в машиностроении допусками размеров и форм зубьев колес планетарных передач.

Ведущему звену задается вращательное движение и путем установки специальных датчиков на сателлиты определяется величина воспринимаемой нагрузки во время работы механизма.

Полученные результаты приведены на графиках на рисунках 3-5.

На графика отмечены точки, в которых проводился статистический анализ результатов экспериментальных вычислений. Проводя анализ между тремя графиками на выбранных десяти точках, наблюдаем, что сила реакции на всех трех сателлитах одинакова с допустимыми погрешностями до 6,3%, что свидетельствует о равномерном распределении нагрузки на каждый из сателлит в каждый момент времени работы механизма.

Таким образом, в таком трехсателлитном механизме нагрузка передается от ведущего вала к ведомому одновременно через все сателлиты, следовательно, размеры спроектированного по такой схеме редуктора могут быть значительно меньше в сравнении с традиционно применяемыми планетарными редукторами, что обеспечит снижение материальных затрат при изготовлении редуктора.

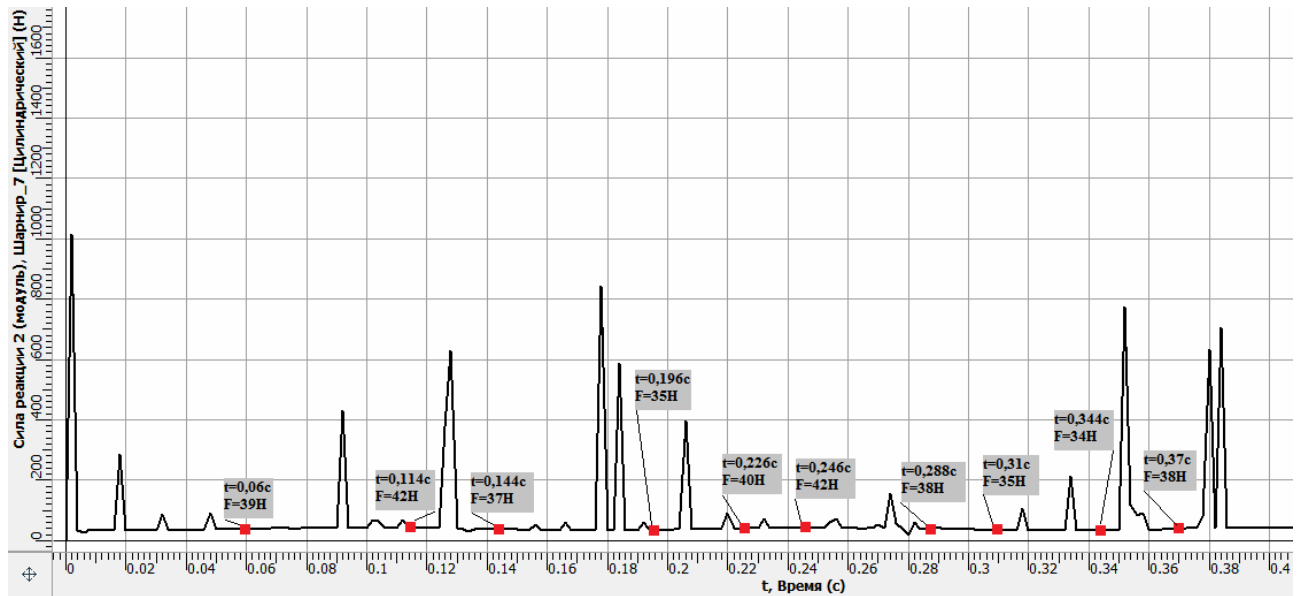


Рис. 3. График нагружений первого спутника

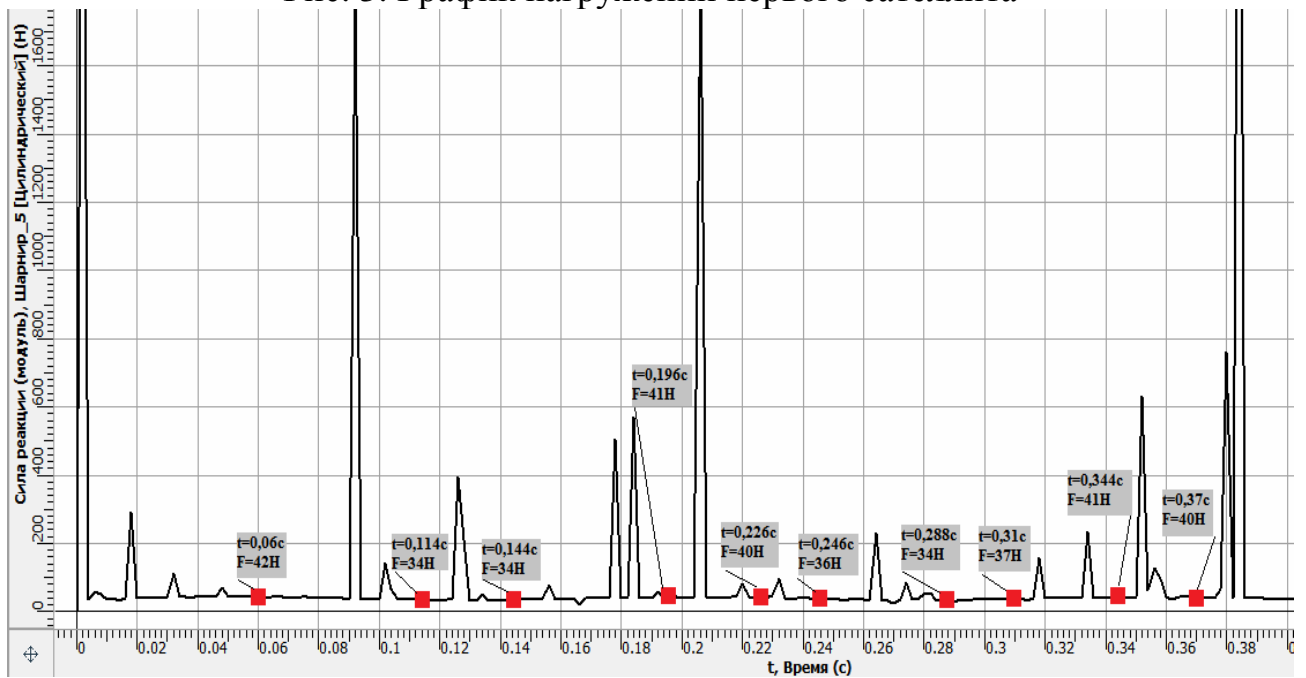


Рис. 4. График нагружений второго спутника

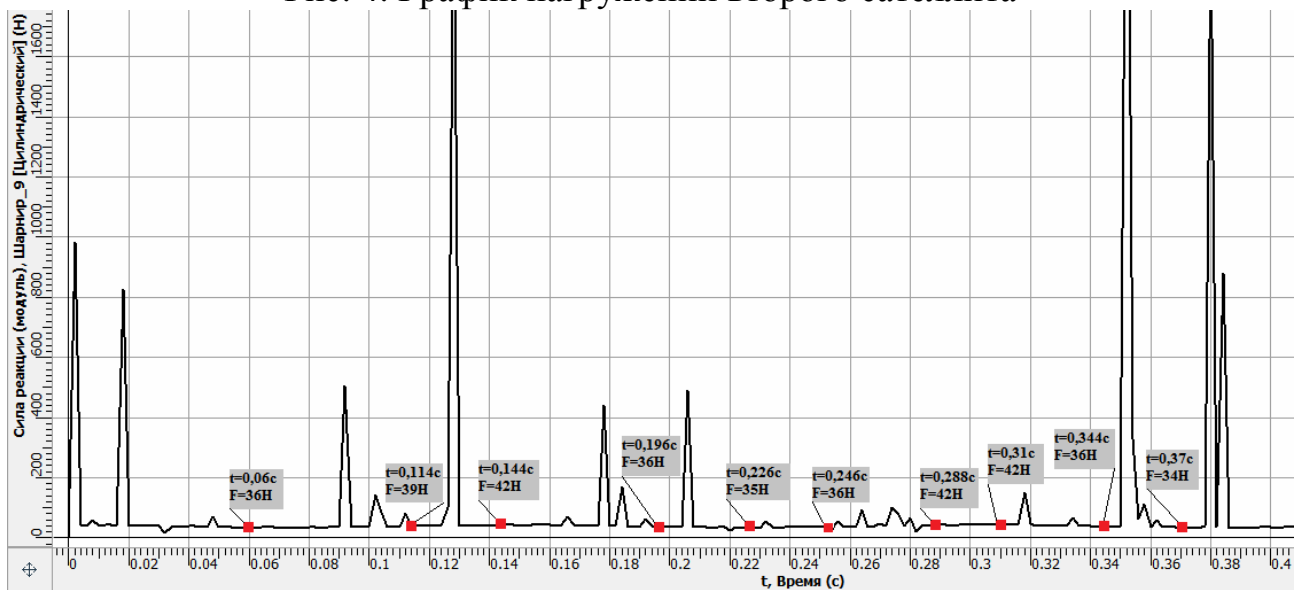


Рис. 5. График нагружений третьего

### Список литературы

1. Кудрявцев В.Н. Планетарные передачи: справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: машиностроение, 1966. – 308 с.
2. Руденко Н.Ф. Планетарные передачи. Теория, расчет, применение и проектирование. – 3-е изд., испр. и доп. – М.; Л.: Машгиз, 1947. – 756 с.
3. Дворников Л.Т., Дмитриев В.В. Проблема избыточных связей в планетарных зубчатых механизмах и ее разрешение // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 316. № 2. С. 13-15.
4. Дворников Л.Т., Дмитриев В.В. Теория структурного синтеза зубчатых механизмов как плоских кинематических цепей с высшими парами. – М.: Изд-во «Эдитус», 2014. – 116с.
5. Дворников Л.Т. Принципиальные проблемы многосателлитных планетарных зубчатых передач и возможные пути их разрешения / Л.Т. Дворников, С.П. Герасимов // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 12. – С. 44-51.
6. Андреева Я.А. Решение проблемы создания планетарных редукторов с равномерным распределением нагрузки по сателлитам / Я.А. Андреева, Л.Т. Дворников, И.А. Жуков // Машиностроение и инженерное образование. – 2013. – №4. – С. 2-8.
7. Патент №186099 РФ. Уравновешенный трёхсателлитный планетарный механизм / Хайдукова Я.А. – № 2017110534; заявл. 29.03.2017; опубл. 29.12.2018, Бюл. №32.

### Сведения об авторах:

*Серг Яна Андреевна* – аспирант, Горный университет, г.Санкт-Петербург;

*Серебряков Игорь Александрович* – аспирант, СибГИУ, г.Новокузнецк;

*Жуков Иван Алексеевич* – д.т.н., доцент, профессор кафедры машиностроения, Горный университет, г.Санкт-Петербург.