

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <https://naukovedenie.ru/>

Том 9, №5 (2017) <https://naukovedenie.ru/vol9-5.php>

URL статьи: <https://naukovedenie.ru/PDF/49TVN517.pdf>

Статья опубликована 19.10.2017

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Степанова Д.Л., Никулин П.А., Крауиньш П.Я., Байдали С.А. Исследование параметров точности волнового редуктора для обеспечения корректной работы в условиях пониженных температур // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №5 (2017) <https://naukovedenie.ru/PDF/49TVN517.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

*Работа финансировалась в рамках договора с Министерством образования и науки Российской Федерации от 27.04.2016 г. №02.G25.31.0190, выполняемого в соответствии с Постановлением Правительства №218 от 09.04.2010 г.*

**УДК 621.833.681**

**Степанова Дарья Леонидовна**

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, Томск<sup>1</sup>  
Аспирант, магистр  
E-mail: ami@tpu.ru

**Никулин Павел Андреевич**

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, Томск  
Аспирант, магистр  
E-mail: Niko91@tpu.ru

**Крауиньш Петр Янович**

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, Томск  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: peterkrau@tpu.ru

**Байдали Сергей Анатольевич**

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, Томск  
Проректор по научной работе и инновациям  
E-mail: basa@tpu.ru

**Исследование параметров точности волнового редуктора для обеспечения корректной работы в условиях пониженных температур**

**Аннотация.** Современные тенденции развития в области редукторостроения направлены на улучшение таких характеристик как: увеличение нагрузочной способности, уменьшение габаритов, увеличение срока службы, увеличение кинематической точности и уменьшение люфта выходного звена. Все эти новшества достигаются в основном при помощи двух основных характеристик, таких как тип зацепления зубчатых колес и геометрия зуба зубчатого колеса и шестерни.

В данной работе представлен новый тип редуктора на основе волновой передачи с модифицированным профилем зуба близким к профилю зацепления Новикова. Такой профиль

---

<sup>1</sup> 634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, дом 30

зуба и применение волновой передачи позволяет создать передачу, с разницей количества зубьев колеса и шестерни в один зуб, что является характерной особенностью редуктора с модифицированной формой зуба. Благодаря этому волновой кинематический редуктор с модифицированным профилем зуба, обеспечивает следующие свойства: высокое значение передаточного числа, малый габарит, высокая кинематическая точность и малый люфт выходного звена.

Волновой кинематический редуктор разрабатывается для привода точного позиционирования работающий при пониженных температурах. В связи с этим для оценки работоспособности на стадии проектирования следует провести исследование, по оценке параметров точности волнового кинематического редуктора для оценки его работоспособности.

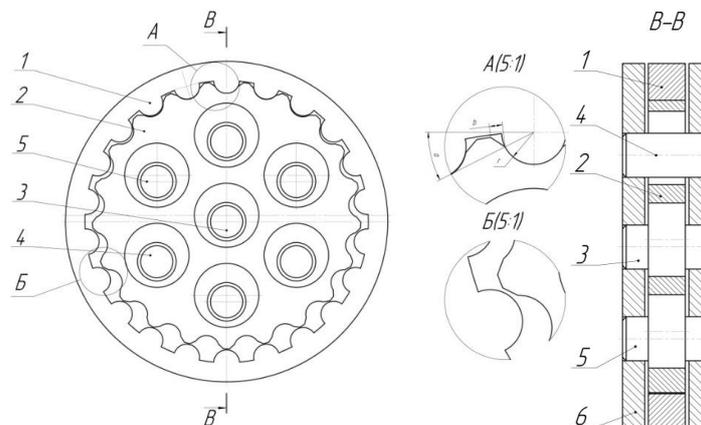
**Ключевые слова:** редуктор; зубчатое зацепление; профиль зуба; волновая передача; эксцентриситет; точность изготовления; климатические испытания

### Введение

В работе рассматривается новый тип редуктора: волновой редуктор с модифицированным профилем зуба близким к профилю зуба зацепления Новикова. Данный профиль зубьев колеса обеспечивает возможность создания передачи, с разницей количества зубьев колеса и шестерни в один зуб, что является характерной особенностью редуктора с модифицированной формой зуба. В связи с этими конструктивными особенностями обеспечивается большая площадь контакта и непрерывность касания зубьев шестерни и колес позволяя получить высокое значение нагрузочной способности, т.к. нагрузку воспринимает не один зуб, а ряд зубьев. Упрощенная схема редуктора с модифицированным профилем зуба изображена на рисунке 1.

Данный тип редуктора разрабатывается в рамках договора с Министерством образования и науки Российской Федерации от 27.04.2016 г. №02.G25.31.0190, выполняемого в соответствии с Постановлением Правительства №218 от 09.04.2010 г.

Одними из основных требований для редуктора является повышенные требования к угловому люфту редуктора, который должен быть не более  $\pm 5$  угл. минут. Также редуктор должен работать в условиях пониженных температурах до минус 50 °С. Для подтверждения данных параметров следует провести анализ по модели редуктора сделанной в программе SolidWorks.



**Рисунок 1.** Упрощенная схема редуктора с модифицированным профилем зуба:  
1 – Выходное подвижное колесо; 2 – Шестерня; 3 – Эксцентриковый вал; 4, 5 – пальцы;  
6 – подвижное колесо

## 1. Расчёт углового люфта кинематических волновых редукторов

В зависимости от параметров люфта можно определить, насколько может быть повернут элемент управления, чтобы управляемая система не претерпела любых изменений. Чем больше показатель этой характеристики, тем серьезней нужно воздействовать на элемент управления. В нашем случае значение этого параметра указывает на величину точности позиционирования выходного вала.

Редуктор используется в механизме относящийся к области точной механики, и точность позиционирования выходного вала редуктора является одним из основных характеристик. В основном данная характеристика зависит от углового люфта, получаемого при изготовлении и сборке составных частей редуктора.

Угловой люфт имеет тангенциальное направление, и является суммой значений зазоров в тангенциальном направлении, которые формируются при посадке подшипника на эксцентрик и в зубчатом зацеплении (рис. 2, 3):

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2,$$

где:  $\varphi_1$  – угловой люфт, формирующийся при посадке подшипника на эксцентрик;  $\varphi_2$  – угловой люфт, формирующийся в зубчатом зацеплении.

Для определения максимально возможного углового люфта взяты максимально возможные зазоры, получающиеся при изготовлении и сборке составных частей редуктора.

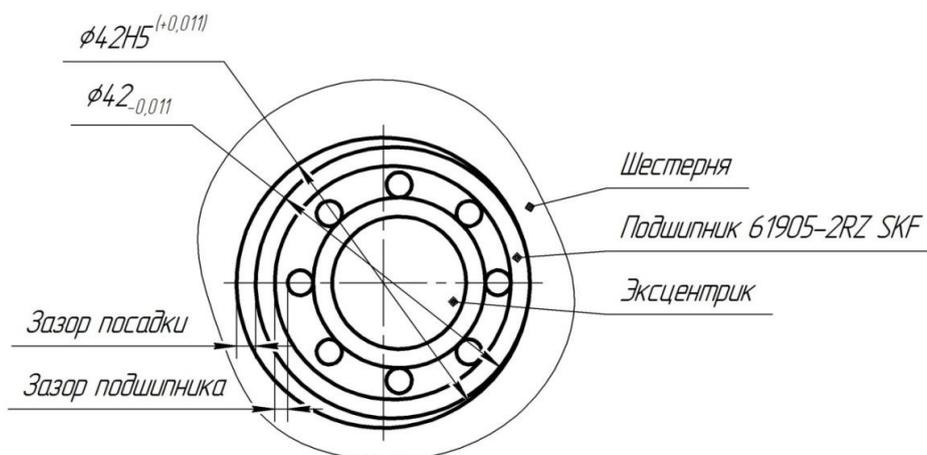


Рисунок 2. Зазор, формирующийся при посадке подшипника на эксцентрик и вал

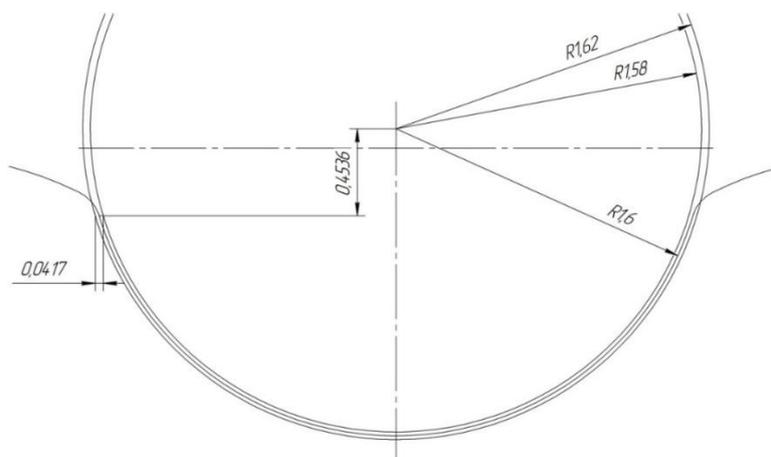


Рисунок 3. Зазор, формирующийся в зубчатом зацеплении

Зазор, формирующийся при посадке подшипника на эксцентриковый вал подшипников, состоит из четырех составляющих:

- переходная посадка внутреннего кольца подшипника и вала, гарантированно обеспечивает нулевой зазор в соединении, в связи с чем, зазор в данном соединении не учитывается;
- установленные подшипники 61905-2RZ SKF группы С4 имеют минимальное значение зазора 5 мкм и максимальное значение зазора 20 мкм между кольцами и шариками подшипника. Для расчета выбираем максимальное значение зазора между кольцами и шариками подшипника – 20 мкм;
- внешний диаметр кольца подшипника 61905-2RZ SKF группы С4 выполнен с допуском на размер в пределах от 0 до 11 мкм в системе вала. Для расчета выбираем максимальное значение допуска на размер внешнего диаметра кольца подшипника 61905-2RZ SKF – 11 мкм (рис. 2);
- внутренний диаметр отверстия 42 мм в шестерни для установки подшипников эксцентриков выполнен с допуском от 0 до 11 мкм по пятому качеству в системе отверстия (Н5). Для расчета выбираем значение допуска 11 мкм т. к. на зазор влияет верхнее значение допуска.

Таким образом, суммарное значение зазора на сторону, формирующийся при посадке подшипника на эксцентриковый вал состоит зазора между кольцами и шариками подшипника, верхнего значения допуска на размер внешнего диаметра кольца подшипника и верхнего значения допуска на внутренний диаметр отверстия:

$$\Delta_1 = (20 + 11 + 11) = 42 \text{ мкм}$$

Угловой люфт, от суммарного зазора формирующийся при посадке подшипника на эксцентриковый вал:

$$\varphi_1 = \arctg(\Delta_2/R_0) = \arctg(0,042/46) = 0,0523^\circ = 3,139 \text{ угл. минут}$$

Зазор, формирующийся в зубчатом зацеплении, зависит в первую очередь от качества изготовления колеса и шестерни редуктора. Зазор между зубьями колеса и шестерни редуктора определяется как сумма поставленных допусков на размеры радиуса зуба и впадины колеса и шестерни. Значение зазора определим графически на основе рисунка 3, его значение равно 0,0417 мкм.

Угловой люфт формирующийся в зубчатом зацеплении:

$$\varphi_2 = \arctg(2 \cdot \Delta_3 / (D_1 - 2 \cdot l)) = \arctg(2 \cdot 0,0417 / (158,4 - 2 \cdot 0,4536)) = 0,0303^\circ = 1,82 \text{ угл. минут}$$

Суммарный угловой люфт составит

$$\varphi = 3,139 + 1,82 = 4,959 \text{ угл. минуты}$$

Для ступеней редукторов остальных исполнений значение углового люфта будет меньше, так как радиус положения эксцентриков и диаметр шестерен больше.

## 2. Анализ температурной деформации деталей редуктора при воздействии пониженной температуре среды

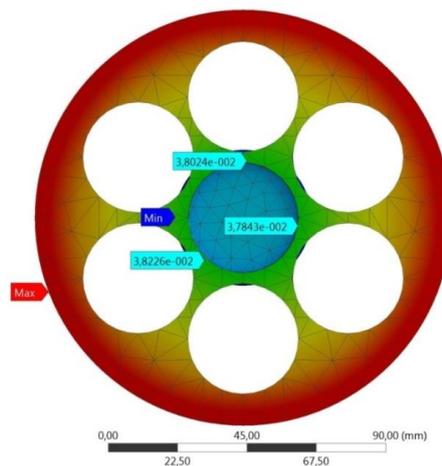
В соответствии с требованиями по разработке редуктор должен работать в условиях пониженных температур до минус 50 °С. Под действием низких температур, детали,

изготовленные из стали, подвергаются температурным деформациям. При малых значениях углового люфта, зазоры в зацеплении имеют небольшие значения, в связи с чем следует убедиться в работоспособности редуктора при пониженных температурах до минус 50 °С для исключения вероятности заклинивания редуктора, в следствии деформация входного вала и эксцентриков. В случае если значение деформации входного вала и эксцентриков больше минимального значения зазора в подшипниках, редуктор будет подвергаться заклиниванию.

Расчет значений деформации производился в среде конечно-элементного анализа SolidWorks Simulation для наиболее деформированных деталей редуктора, которыми являются опоры и шестерни.

При воздействии пониженной температуры в редукторе происходит неоднородное сжатие разных его элементов, из-за чего происходит нелинейная деформация.

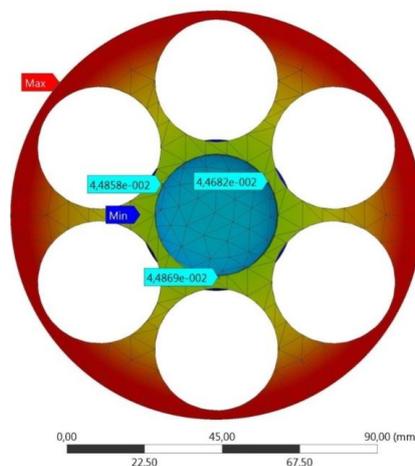
На рисунке 4 представлен результаты деформации шестерни при воздействии температурой минус 50 °С.



**Рисунок 4.** Шестерня под воздействием температуры минус 50 °С

Для оценки вероятности заклинивания при температуре окружающей среды минус 50 °С следует рассмотреть значение наименьшей деформации шестерни в области центрального отверстия. Данное значение температурной деформации при минус 50 °С равно  $\Delta_{t_{III}} = 0,0378$  мм.

При воздействии на опору температурой минус 50 °С происходит деформация, картина которой представлена на рисунке 5.



**Рисунок 5.** Опора под воздействием температуры минус 50 °С

Для оценки вероятности заклинивания при температуре окружающей среды минус 50 °С следует рассмотреть значение наименьшей деформации опоры в области центрального отверстия. Данное значение температурной деформации при минус 50 °С равно  $\Delta_{\text{топ}} = 0,0446$  мм.

Детали, входящие в состав конструкции кинематического волнового редуктора, представленного на рисунке 1 имеют не большие зазоры при контакте друг с другом во время работы редуктора. Для проверки работоспособности редуктора при температурных условиях минус 50 °С, исключим возможность заклинивания вала путем расчета суммарной относительной температурной деформации и сравнения ее с минимальными гарантированными зазорами формирующийся при посадке подшипника на эксцентриковый вал. Суммарная относительная температурная деформация рассчитывается как разность температурной деформации опоры и шестерни:

$$\Delta_{\text{отн}} = 0,0446 - 0,0378 = 0,0068 \text{ мм}$$

Рассмотрим гарантированный зазор, который компенсирует деформацию от пониженной температуры.

Гарантированное значение зазора при вращении эксцентрикового вала, формирующийся при посадке подшипника на эксцентриковый вал состоит минимальных зазоров между кольцами и шариками подшипника, нижнего значения допуска на размер внешнего диаметра кольца подшипника и нижнего значения допуска на внутренний диаметр отверстия:

$$\Delta_4 = (0 + 0 + 5) * 2 = 10 \text{ мкм}$$

Сравнивая значение гарантированного значения зазора при вращении эксцентрикового вала и суммарной относительной температурной деформации видно, что значение зазора больше чем значение температурной деформации. В связи с этим можно утверждать о том, что заклинивание деталей редуктора во время его работы при пониженных температурах до минус 50 °С не произойдет.

### **Вывод**

Проведенное исследование показало, что разработанная конструкция волнового кинематического редуктора соответствует требованиям точности позиционирования выходного вала путем расчета углового люфта в зацеплении редуктора, который не превышает установленной нормы в  $\pm 5$  угл. минут.

Для подтверждения работоспособности редуктора при пониженных температурах до минус 50 °С, проведен анализ тепловой деформации деталей редуктора установивший, что при пониженных температурах до минус 50 °С гарантированное значение зазоров больше температурных деформаций, вследствие чего заклинивание редуктора исключается.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявцев В. Н. Планетарные передачи. М/Л.: Машиностроение, 1966. 308 с.
2. Полезная модель 76093 Российская Федерация, МПК7 F 16 Н 1/10. Самотормозящийся волновой редуктор / Крауиньш П. Я., Крауиньш Д. П., Смайлов С. А. №2008108467/22; заявл. 04.03.2008; опубл. 10.09.2008, Бюл. №4. 3 с.
3. Краснощекое Н. Н., Федякин Р. В., Чесноков В. А. Теория зацепления Новикова. М.: Наука, 1976. 175 с.
4. Юдин В. А. Основы теории планетарно-цевочного редуктора с внутренним внеполюсным зацеплением. Труды семинара по ТММ. Т. IV, вып.13. М., АН СССР, 1948.
5. Андожский В. Д. Расчет зубчатых передачах. М/Л., Машгиз, 1955, 268 с.
6. Степанова Д. Л. Кинематический волновой редуктор с модифицированным профилем зуба // Современные техника и технологии: сб. докл. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – Т. 1 – С. 201-202.
7. Степанова Д. Л. Выбор и обоснование параметров привода лебедки, с автоматическим управлением // Современные техника и технологии: сб. докл. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – Т. 1 – С. 283-284.
8. Степанова Д. Л., Крауиньш П. Я. Особенности кинематики волновой передачи с модифицированной формой зуба // И62 Инженерная мысль машиностроения будущего: сб. науч. работ – Екатеринбург: Изд-во Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2013 г. – С. 262-266.
9. Степанова Д. Л., Крауиньш П. Я. Оценка КПД волнового редуктора с модифицированным профилем зуба // Молодёжь и современные информационные технологии: сб. науч. работ – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – Т.1 – С. 154-155.
10. Степанова Д. Л., Крауиньш П. Я. Анализ нагрузок в зацеплении редуктора с модифицированным профилем зуба // МИКМУС-2015: сб. трудов – Москва: Изд-во ИМАШ РАН, 2015 – 133-136 с.
11. Степанова Д. Л., Никулин П. А., Крауиньш П. Я. Исследование распределения нагрузки волнового кинематического редуктора с модифицированным профилем зуба и зависимости нагрузочных способностей по отношению к его передаточному числу и габаритным размерам // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №4 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/96TVN416.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**Stepanova Daria Leonidovna**

Tomsk polytechnic university, Russia, Tomsk  
E-mail: ami@tpu.ru

**Nikulin Pavel Andreevich**

Tomsk polytechnic university, Russia, Tomsk  
E-mail: Niko91@tpu.ru

**Krauinsh Petr Yanovich**

Tomsk polytechnic university, Russia, Tomsk  
E-mail: peterkrau@tpu.ru

**Baydali Sergey Anatolevich**

Tomsk polytechnic university, Russia, Tomsk  
E-mail: basa@tpu.ru

## **Research of parameters of accuracy of a wave reducer for ensuring correct work in the conditions of the lowered temperatures**

**Abstract.** Modern development trends in the field of reduction are aimed at improving such characteristics as increasing the load capacity, reducing the dimensions, increasing the service life, increasing the kinematic accuracy and reducing the backlash of the output link. All these innovations are achieved mainly with the help of two main characteristics: such as the type of gear engagement and the geometry of tooth of the gear.

In this paper, we present a new type of gear based on wave gearing with a modified tooth profile close to the profile of Novikov gearing. This profile of the tooth and the use of wave gearing allows the creation of a gear with a difference in the number of teeth of the driven and driver wheel in one tooth, which is a characteristic feature of the gear with a modified tooth shape. Due to this, the wave kinematic reducer with a modified tooth profile provides the following properties: high gear ratio, small size, high kinematic accuracy and low backlash of the output link.

The wave kinematic reducer is developed for the drive precision positioning working at low temperatures. In this regard, to evaluate the performance at the design stage, a study should be conducted to evaluate the accuracy parameters of the wave kinematic reducer to assess its performance.

**Keywords:** reducer; gearing; tooth profile; the wave gear; involute; eccentricity; production accuracy; climatic tests