

УДК 62-233.3/.9

## Волновой редуктор с промежуточными телами качения и двумя волнами деформации

Вылуск Варвара Павловна<sup>(\*)</sup>

v.vylusk@yandex.ru

Ермолаев Михаил Михайлович

mmermolaev@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Аннотация.** В статье представлен вариант конструкции волнового редуктора с промежуточными телами качения и двумя волнами деформации на базе гибкого подшипника. Рассмотрены ключевые моменты расчета механизма и генератора волн, характеристики мотора, а также проектирования самого редуктора. Были выявлены преимущества выбранной компоновки и ее основные особенности, выбраны и рассчитаны ключевые характеристики, оказывающие наибольшее влияние на выходные параметры. Прототип разработанного механизма находится в процессе изготовления и в дальнейшем будет интегрирован в привод компактного робота-манипулятора.

**Ключевые слова:** редукторы, волновые редукторы, машиностроение, передача, привод

## Harmonic drive with two waves of deformation

Vylusk Varvara Pavlovna<sup>(\*)</sup>

v.vylusk@yandex.ru

Ermolaev Mixail Mixailovich

mmermolaev@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

**Abstract.** This paper proposes a design for a strain wave gear incorporating intermediate rolling elements and utilizing a flexible bearing. The study addresses the critical calculation steps for the wave generator and the mechanism, motor specifications, and the overall gear design. The advantages and principal features of the selected configuration were determined, and its key performance-influencing parameters were selected and calculated. A prototype of the developed mechanism is currently under manufacturing and is intended for future integration into a compact robotic drive.

**Keywords:** harmonic drive, mechanical engineering, gearbox, drive, mechanism

**Введение.** Редукторы — механизмы, применяющиеся в машиностроении для передачи крутящего момента от двигателя к подвижному элементу. Как правило, они используются для повышения крутящего момента за счет понижения частоты вращения выходного вала. Одной из разновидностей таких механизмов являются волновые мотор-редукторы, обладающие рядом преимуществ, благодаря чему широко используются в робототехнике, медицине и станкостроении. Волновые редукторы отличаются высоким КПД (в некоторых случаях более 90 %), бесшумностью и плавностью работы, а также компактностью.

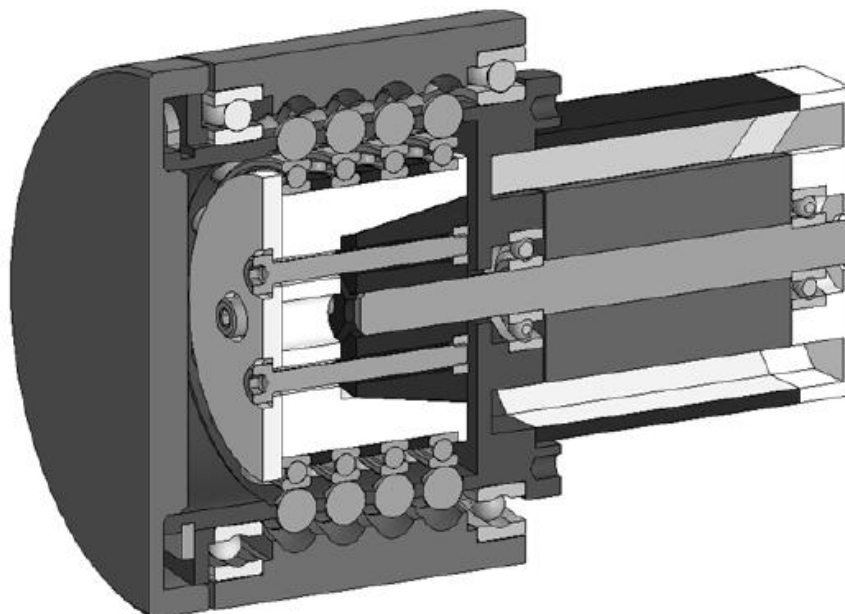


Рис. 1. ВПК в разрезе

**Материалы и методы.** Волновые редукторы с промежуточными телами качения (ВПК) являются разновидностью волновых передач, в которых вместо зубчатого зацепления присутствуют шарики или ролики. Такая компоновка позволяет упростить изготовление за счет отсутствия гибкого колеса, уменьшить износ, повысить КПД. В предлагаемой конструкции благодаря двум волнам деформации большее количество тел качения задействовано одновременно, что при меньших габаритах позволяет повысить передаточное отношение.

На рис. 1 приведена 3D-модель спроектированного редуктора. На эллиптическом колесе, закрепленном на валу двигателя, зафиксированы «гибкие» подшипники, которые за счет деформации наружного кольца создают две волны и приводят к касанию шариков и выходной обоймы в двух диаметрально противоположных областях.

**Результаты.** В качестве исходного элемента был выбран уже имеющийся двигатель Nema23 57HS76-3004A со следующими характеристиками:

#### Параметры двигателя Nema23 57HS76-3004A

|                              |               |
|------------------------------|---------------|
| Диаметр вала, мм .....       | 8             |
| Крутящий момент, Н · м ..... | 1,6           |
| Ток, А .....                 | 3             |
| Шаг, град .....              | 1,8           |
| Длина корпуса, мм .....      | 76            |
| Вид ротора .....             | Лыска на валу |

На основе анализа конструкции готового манипулятора было определено требуемое передаточное отношение редуктора для последующего его интегрирования в механизм. Требуемый момент на выходном валу составляет  $T = 14$  Н, соответственно получим передаточное число  $U_w = 9$ .

Эпициклоида выходного вала получена с помощью системы уравнений:

$$C_x = \frac{R \sin t}{\sqrt{1 - \frac{2\lambda}{u} \cos^2(ut)}};$$

$$C_y = \frac{R \cos t}{\sqrt{1 - \frac{2\lambda}{u} \cos^2(ut)}}$$

Передаточное отношение рассчитывается по формуле

$$u = \frac{z}{2} + 1 = \frac{16}{2} + 1 = 9,$$

где  $z$  — число тел качения (в нашем случае шариков), которое было заранее установлено.

С помощью программы для расчета волновых редукторов с промежуточными телами качения, габаритов робота-манипулятора и требований к моменту на тихоходном валу редуктора были установлены оптимальные параметры ВПТК (рис. 2, 3):

количество тел качения  $z = 16$ .

количество рядов тел качения  $n = 4$ .

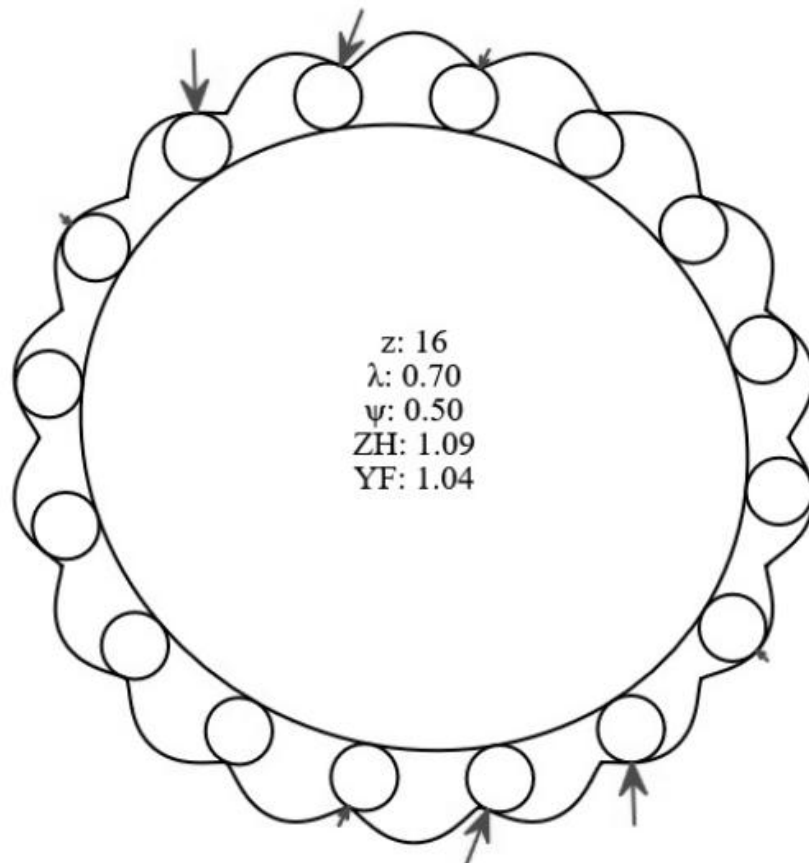


Рис. 2. Параметры передачи и визуализация работы

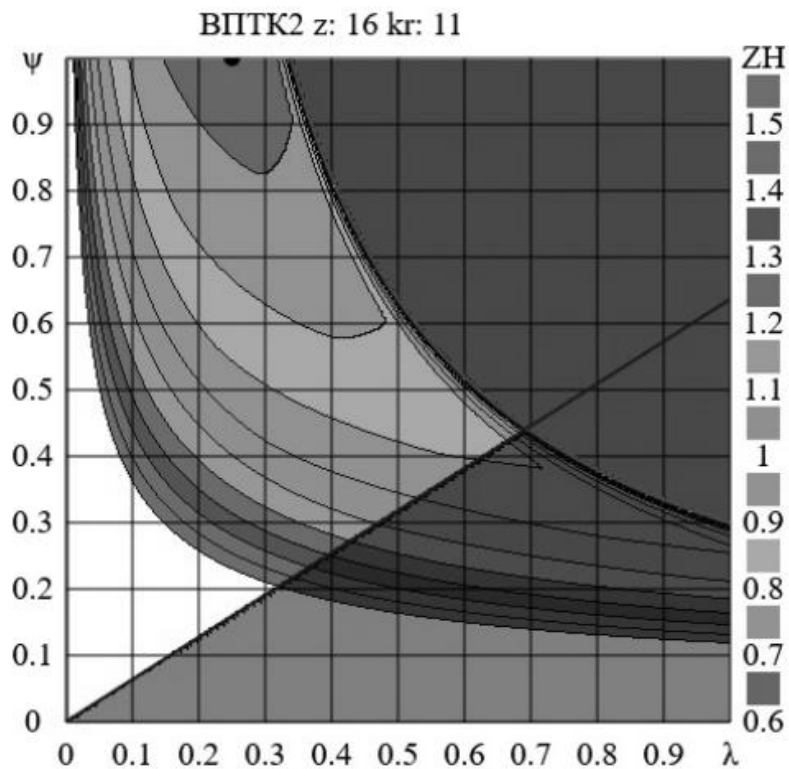


Рис. 3. Диаграмма параметров редуктора

### Характеристики материалов тела качения и выходного вала

|                            | PETG             | ШХ15 (закаленная) |
|----------------------------|------------------|-------------------|
| $\mu$                      | 0,4              | 0,3               |
| $\sigma_{\text{пр}}$ , МПа | 100              | 1500              |
| E, МПа                     | $2,1 \cdot 10^3$ | $2,1 \cdot 10^5$  |

$$\sigma_H = Z_{E3} Z_{H3} \sqrt[3]{\frac{Tz}{R^3 n}} \leq \sigma_{\text{пр}}.$$

$$Z_{E3} = \sqrt[3]{\frac{6E^{*2}}{\pi}} = 112 \text{ МПа}^{2/3}$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} = 0,000404 \text{ МПа}$$

$$Z_{H3} = 0,9;$$

$$R^3 = T \frac{z}{n} \left( \frac{\sigma_H}{Z_{E3} Z_{H3}} \right)^3 = T \frac{z}{n} \left( \frac{\sigma_H \pi}{6E^{*2} Z_{H3}} \right)^3 ;$$

$$R = \sqrt[3]{T \frac{z}{n} \frac{\sigma_H \pi}{6E^{*2} Z_{H3}}} = 31 \text{ мм}.$$

Диаметр шарика

$$r_w = R \frac{\pi\psi}{z} = 4 \text{ мм.}$$

Полуоси генератора волн (рис. 4) рассчитаем с помощью системы:  $a$  — большая полуось эллипса,  $b$  — меньшая полуось эллипса.

$$\frac{b^2}{a^2} = 1 - \varepsilon^2; \quad \frac{a+b}{2} = R;$$

$$\frac{b^2}{a^2} = 0,889; \quad \frac{a+b}{2} = 31;$$

$$a = 31,912 \text{ мм}; \quad b = 30,088 \text{ мм}$$

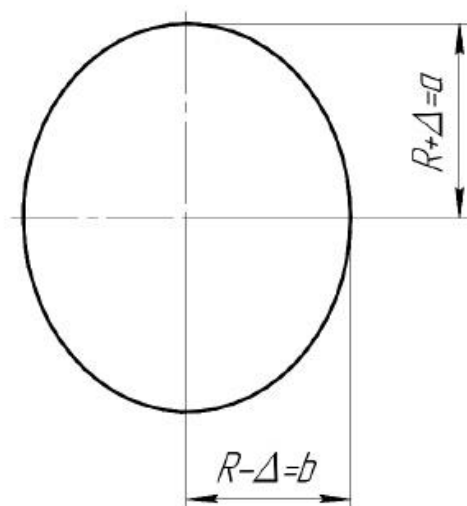


Рис. 4. Полуоси эллиптического генератора волн

Рассчитаем наиболее нагруженное резьбовое соединение — крепление редуктора к кронштейну через отверстия в сепараторе.

Для крепления были выбраны 4 винта М5 класса прочности 8.8, расположенные на окружности диаметром 66 мм:

$$F_1 = \frac{T_{\max}}{4R} = \frac{T * 3 * 10^3}{4 * 33} = 36,4 \text{ Н}$$

$$F_{\text{зат}} = \frac{K_{\text{ц}} F_1}{f} = \frac{1,5 * 40}{0,15} = 363,6 \text{ Н}$$

Для винта класса прочности 8.8  $\sigma_T = 640 \text{ МПа}$

$$d_3 = d - 1,227p = 4,02 \text{ мм}$$

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = 1,3\sigma_p = \frac{1,3 * 4F_{\text{зат}}}{A_3} = \frac{1,3 * 4F_{\text{зат}}}{\pi d_3^2} = 37,2 \text{ МПа};$$

$$S = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\text{ЭКВ}}} = 17,2.$$



**Список источников**

- [1] Решетов Д.Н. *Детали машин*. Москва, Машиностроение, 1989, с. 111–113.
- [2] Варламов Л.П., Тибанов В.П. *Методические указания к выполнению домашнего задания по разделу «Соединения»*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003, с. 16–25.
- [3] ГОСТ 11738–84. *Винты с цилиндрической головкой и шестигранным углублением под ключ. Конструкция и размеры*. Москва, ИПК издательство стандартов, 1999.
- [4] ГОСТ 801–78. *Сталь подшипниковая. Технические условия*. Москва, ИПК издательство стандартов, 2004.
- [5] ГОСТ Р 51695–2000. *Полиэтилентерефталат. Общие технические условия*. Москва, ГОССТАНДАРТ России, 2008.
- [6] Мухидинов М.С. *Технология изготовления корпуса волнового редуктора с промежуточными телами качения*. Бакалаврская работа. Юрга, 2022, 98 с.