

# МАШИНОЗНАВСТВО

УДК 621.9.042

Волонцевич Д.О., докт. техн. наук, Ковалюх Р.В., канд. техн. наук

## ОСНОВЫ КЛАССИФИКАЦИИ РЕГУЛИРУЕМЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ И НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИХ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА

### Часть 2

В первой части нашей статьи мы рассмотрели вопросы классификации регулируемых механических передач в целом. В этой части статьи в соответствии с идеологией, принятой в первой части, мы изложим свой взгляд на вопросы классификации двухпараметрических зубчатых передач и их составляющих - зубчатых колес.

С точки зрения классики [10], **зубчатая передача** – это трехзвенный передаточный механизм, в котором подвижными звеньями являются зубчатые колеса, образующие со стойкой вращательные пары, обеспечивающие непрерывное движение одного звена относительно другого с заданной, согласно передаточному отношению, функциональной зависимостью. Исходя из этого определения видно, что основная функция такой зубчатой передачи – это организация передачи вращения между валами и одновременная трансформация крутящего момента с каким-то постоянным коэффициентом или по постоянному закону (например, некруглые зубчатые колеса). Основными элементами такой зубчатой передачи являются зубчатые колеса с постоянной геометрией, которые в свою очередь содержат зубчатый венец, состоящий из зубьев, связанных друг с другом прилегающей к ним поверхностью тела колеса.

С другой стороны, **двухпараметрическая зубчатая передача** – это как минимум четырехзвенный передаточный механизм, в котором зубчатые колеса выполнены по специальной геометрии, позволяющей осуществлять регулирование выходных параметров передачи, в том числе и изменение геометрии второго зубчатого колеса.

Любая зубчатая передача характеризуется следующими основными параметрами:

- передаточное отношение,  $i_{12}$ ;
- геометрия поверхностей сопряжения;
- основные размеры зубьев:
  - окружной шаг,  $p$ ;
  - модуль зуба,  $m$ ;
  - диаметр делительной окружности,  $d$ ;
  - межосевое расстояние,  $a_w$ ;
  - диаметр окружности впадин,  $d_i$ ;
  - диаметр окружности вершин,  $d_e$ ;
  - толщина зуба,  $S$ ;
  - радиальный зазор,  $c$ .

В связи с этим рассмотрим в пространстве два постоянно контактирующих тела, которые связаны приведенной на рис. 1 декартовой системой координат, примененной Ф.Л. Литвиным для исследования пространственных зубчатых зацеплений [1]:

- система координат  $S_1(x_1, y_1, z_1)$ , связанная с колесом 1;
- система координат  $S_2(x_2, y_2, z_2)$ , связанная с колесом 2.

© Д.О. Волонцевич, 2015

Оси колес в общем случае скрещиваются, причем их угол скрещивания  $\psi_\gamma$  в общем случае не равен  $90^\circ$ . Оси вращения колес совпадают с положительным направлением осей  $o_1z_1$  и  $o_2z_2$ .

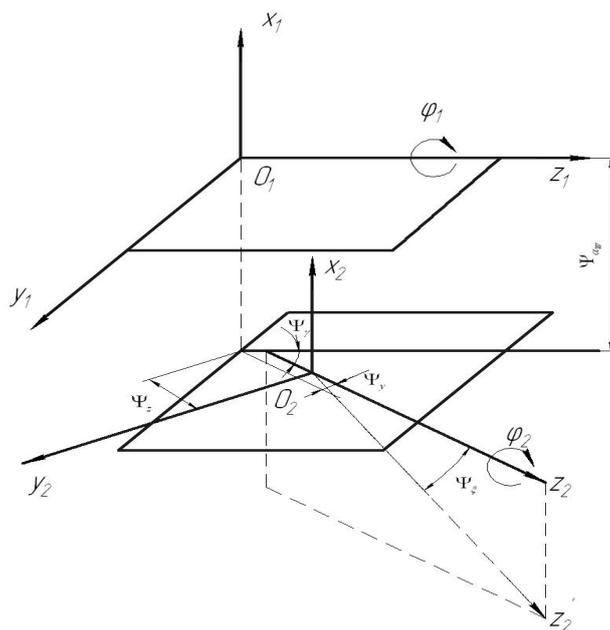


Рис. 1. Пространственные системы координат

Была разработана классификация двухпараметрических регулируемых зубчатых передач, **основными классификационными признаками** которых могут быть приняты следующие параметры:

- количество регулируемых параметров,
- наличие и вид связи между регулируемыми параметрами,
- исходное расположение осей колес,
- тип передаточного отношения,
- способ изменения передаточного отношения,
- конструктивное исполнение венца,
- способ регулирования передачи,
- тип сигнала в управляющем устройстве,
- тип зацепления,
- вид начальных поверхностей,
- вид сечения плоскостью, проходящей через ось вращения,
- вид профиля зацепления.

В общем виде эта классификация представлена на рис. 2 и позволяет отразить основную гамму возможных структурных, геометрических и конструктивных решений регулируемых зубчатых передач, а значит, и определить вид регулируемого параметра или их совокупности.

Первым классификационным признаком в двухпараметрических передачах является **количество регулируемых параметров**. Поскольку речь идет о передаче вращения, то эти тела должны быть телами вращения. Это обстоятельство оставляет из шести степеней свободы (три линейных перемещения и три угла Эйлера), определяющих положение

ние тела в пространстве, только: угол перекрещивания осей вращения тел –  $\psi_\gamma$ ; кратчайшее межосевое расстояние –  $\psi_{aw}$ ; два параметра –  $\psi_x$  и  $\psi_z$ , характеризующих возможные перемещение обоих тел вдоль своих осей. Значит, если построить какое-либо специальное зацепление с использованием вращательной пары, то для обеспечения, хотя бы одного дополнительного варьируемого параметра (или параметров), вне зависимости от формы зубьев, в нашем распоряжении будут находиться четыре величины:  $\psi_\gamma$ ,  $\psi_{aw}$ ,  $\psi_x$  и  $\psi_z$ . Эти величины будут описывать исходное состояние зубчатой передачи с кинематической точки зрения, и поэтому являются независимыми, а, следовательно, могут определять вид регулируемого параметра и то количество степеней свободы, которое возможно реализовать в этой передаче.

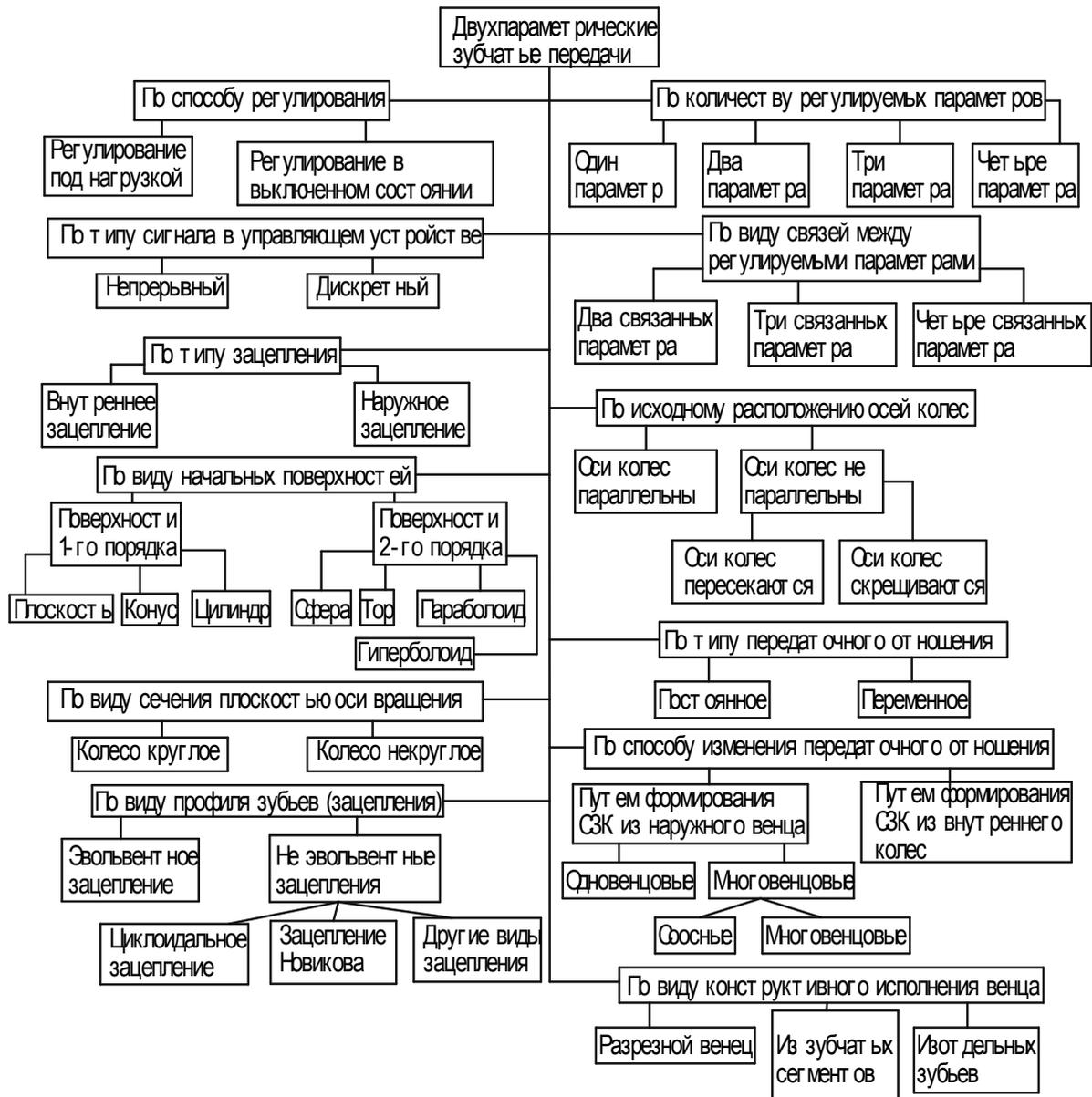


Рис. 2. Классификация двухпараметрических зубчатых передач

Следующий классификационный признак – это **вид связей между регулируемые параметры**, т. е. возможность сочетания в одной передаче двух или более параметров  $\psi$  между собой. По этому признаку двухпараметрические передачи могут иметь: два связанных параметра, три связанных параметра и четыре. Так, например, как это выполнено в передачах [2, 3] при изменении параметра  $\psi_\gamma$ . Причем параметры эти связаны, вполне определенными зависимостями. Например, для сферической передачи [2] имеем:

$$\cos \gamma_i = \frac{\cos \beta_o}{\cos \xi_i},$$

где:  $\beta_o$  – угол наклона зубьев на экваторе сферического колеса;  $\xi_i$  – текущее значение угла наклона оси;  $\gamma_i$  – значение угла скрещивания осей, соответствующее  $\xi_i$ .

Следующий классификационный признак – это **исходное расположение осей колес**. Такие передачи могут иметь два вида расположения своих осей – параллельное и непараллельное. Причем последнее может иметь пересекающиеся или скрещивающиеся оси. Необходимо отметить, что в процессе работы такой передачи, ее оси могут изменять свое положение так, что передача с параллельными осями – будет иметь вид передачи со скрещивающимися осями, а передача с пересекающимися – со скрещивающимися [3, 4].

Такая классификация является безупречной с точки зрения теории механизмов, однако с прикладной стороны имеет существенный недостаток: в ней не учтено изменение угла наклона осей  $\psi_\xi$ . Строго говоря, при  $\alpha \neq 0$  и  $\gamma \neq 0$  изменение угла  $\xi$  – это лишь следствие изменения межосевого расстояния  $\psi_{\alpha w}$ , но с прикладной точки зрения этот избыточный параметр следует выделить отдельно, так как именно его изменение может явиться целью создания новой зубчатой передачи, смотри например [5].

Следующим иерархическим уровнем классификации является уровень различия передач **по передаточному отношению**. Регулируемые зубчатые передачи при этом могут быть выполнены как с постоянным, так и с переменным передаточным отношением. Последние были синтезированы при создании зубчатого вариатора [6].

Возможность **изменения передаточного отношения** также является классификационным признаком передачи. При этом есть два варианта решения этой задачи. Первый – формирование составного зубчатого колеса (СЗК) путем использования наружного венца передачи. Например, так как это было выполнено в [11]. Второй – это формирование СЗК за счет внутреннего зубчатого колеса. Например, так как это выполнено в работе [6]. В свою очередь наружные колеса могут быть выполнены – в одновенцовом или много венцовом вариантах.

Из предыдущего уровня классификации вытекает следующий уровень – **вид конструктивного исполнения венца**. В соответствии с этим венец у нас может быть выполнен разрезным, из зубчатых сегментов, из отдельных зубьев.

Один из определяющих классификационных признаков для двухпараметрических передач – это **вид начальных поверхностей этих колес**. По этому признаку начальные поверхности разделяются на поверхности 1-го порядка (плоскость, конус, цилиндр), и поверхности 2-го порядка (сфера, тор, параболоид, гиперболоид). Например, у зубчатой передачи [7], делительная поверхность шестерни – сфера, а делительная поверхность колеса – плоскость.

Двухпараметрические передачи могут также классифицироваться **по типу зацепления** – наружное или внутреннее. А также **по профилю зубьев**: эвольвентное или не эвольвентное. Не эвольвентное зацепление в свою очередь может быть представлено циклоидальным зацеплением, зацеплением Новикова или каким-либо другим видом зацепления.

Отдельно можно выделить такой классификационный признак, как **способ регулирования передачи**: под нагрузкой или в выключенном состоянии. И здесь же мы имеем и другой классификационный признак, который связан с предыдущим. Это **тип сигнала в управляющем устройстве**. По этому признаку мы имеем или непрерывный управляющий сигнал, или – дискретный.

Следующий уровень, который необходимо рассмотреть при построении классификации – это непосредственно **уровень зубчатого колеса**. Некоторые математические аспекты, относящиеся к систематизации этого уровня можно найти в работе [8]. В этой работе автором был использован аппарат многопараметрических отображений для описания частных структур зубчатых зацеплений и классификации и систематизации исходных формообразующих профилей зубьев.

Наиболее полная схема, позволяющая системно отобразить всю совокупность существующих зубчатых колес и тем самым создать предпосылки для выбора его оптимальной структуры и наиболее полно отвечающая заданным требованиям, представлена на рис. 3. Используя в необходимых сочетаниях набор известных технических решений, приведенных на схеме, можно получать структуры зубчатых колес до сих пор не встречавшихся.

Для синтеза структуры зубчатых колес с заданными параметрами при помощи приведенной схемы необходимо из имеющегося перечня характеристик выделить ключевую характеристику, выполнение которой обеспечит функционирование зубчатых колес заданным образом. Далее, в соответствии этой характеристики подбирается техническое решение, способное обеспечить ее выполнение. Сверху вниз по схеме следуют признаки, характеризующие зубчатое колесо в целом, венец, собственно зубья, полотно и ступица. Через выбранный элемент схемы, соответствующий решению, обеспечивающему выполнение ключевой характеристики, сверху вниз по схеме проводят маршрут через все уровни признаков. Выбранный маршрут характеризует всю совокупность выбранных решений, требуемых для обеспечения заданных технических характеристик зубчатых колес.



При разработке же новой передачи мы по заданным техническим условиям решаем обратную задачу – композицию (синтез) структуры передачи из элементов, соответствующих уровням наших классификаций. Причем каждому уровню может соответствовать один или несколько элементов или механизмов, обеспечивающих его реализацию. В результате будем иметь набор различных вариантов структурного состава синтезируемой передачи, которые можно будет описать следующим множеством:

$$R \rightarrow \{A_{q1}, A_{q2}, \dots, A_{qn}\},$$

где  $\{A_{qi}\}$  – описывает множество необходимых структурных составляющих элементов передачи.

Итак, основываясь на рассмотренной классификации двухпараметрических передач и зубчатых колес и проводя композицию (синтез) механизма из отдельных структурных составляющих, можно создавать новые конструкции передач по заданным техническим требованиям. На основании изложенного рассмотрим классическую зубчатую передачу с точки зрения ее структуры. В связи с этим приведем определение такой зубчатой передачи [10].

С точки зрения функционального назначения **зуб** – это выступ на звене для передачи движения посредством взаимодействия с соответствующими выступами другого звена. Каждый зуб имеет в своем составе следующие элементы – боковую поверхность, вершину, основание, кромки, торец. Таким образом, такую структурную схему трехзвенной зубчатой передачи можно изобразить в виде, представленном на рис. 4а. На рис. 4б приведена структурная схема двухпараметрической передачи, имеющей один регулируемый параметр и один параметр, обеспечивающий передачу вращения с заданным передаточным отношением от одного зубчатого колеса к другому. На рис. 4в приведена структурная схема двухпараметрической передачи, имеющей два регулируемых параметра и один параметр, обеспечивающий передачу вращения с заданным передаточным отношением от одного зубчатого колеса к другому.

Если необходимо, например, синтезировать зубчатое колесо с регулируемым количеством зубьев, т.е. вариатор, то в качестве определяющего условия синтеза структуры будет выступать наличие, например, дискретного регулируемого венца, состоящего толи из отдельных зубьев, толи из зубчатых сегментов, толи из упругого разрезного венца.

Рассмотрим еще один пример синтеза зубчатого колеса. Основное требование к этой паре сформулируем как к зубчатой передаче, работающей без окружного зазора. Эту зубчатую передачу можно осуществить путем применения нескольких соосных зубчатых венцов с возможностью относительного поворота между собой. Синтез этой передачи можно осуществить путем регулирования профиля зуба, либо за счет упруго податливых связей, либо за счет регулирования расстояния между сегментами венца, либо между зубьями. Таким образом, при выборе структуры зубчатых колес в качестве ключевой выбирается та ячейка схемы, которая больше всего подходит разработчику, исходя из конструктивных, технологических или эксплуатационных особенностей.

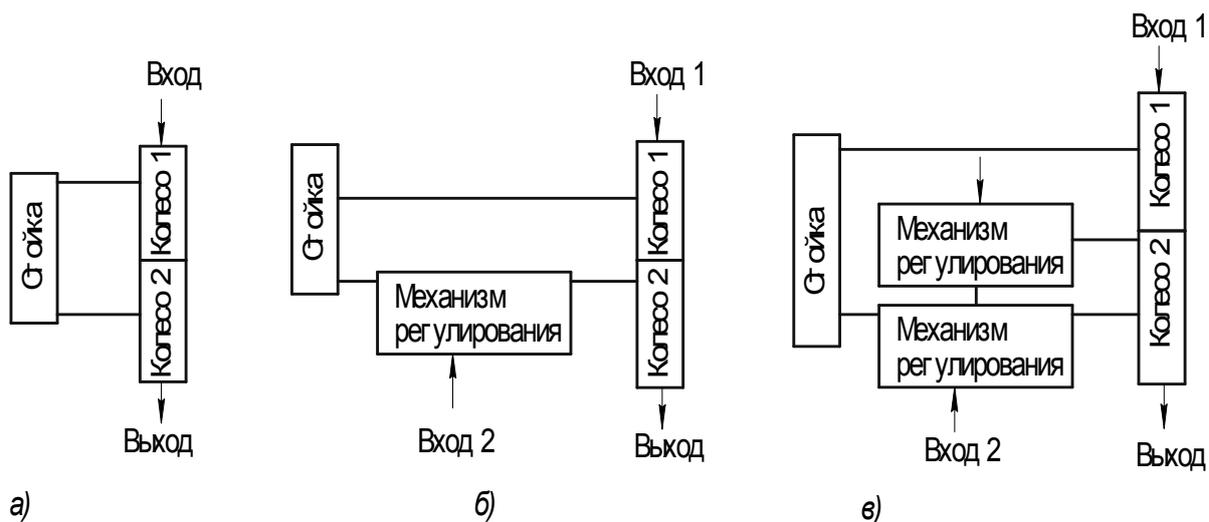


Рис. 4. Структурные схемы зубчатых передач:

а) – при одном параметре движения; б) – при двух параметрах; в) – при трех параметрах

На рис. 5 приведена подробная структурная схема зубчатого вариатора основанного на плоском зубчатом зацеплении [11]. Эта схема соответствует схеме, приведенной на рис. 4в. В работе [6] было показано, что для осуществления синтеза зубчатого вариатора необходимо иметь **одно колесо с равновысокими и равноширокими зубьями, а второе должно быть составным зубчатым колесом (СЗК) и иметь в том или другом виде подвижные зубья.** Для рассматриваемой структурной схемы ЗВ такими обязательными механизмами будут:

- механизм регулирования межцентрового расстояния;
- механизм изменения числа зубьев на СЗК;
- механизм согласования между механизмом регулирования межцентрового расстояния и механизмом изменения числа зубьев на СЗК.

Для пространственной структурной схемы ЗВ два механизма оказываются лишними. Это следующие механизмы:

- механизм регулирования межцентрового расстояния;
- механизм согласования между механизмом регулирования межцентрового расстояния и механизмом изменения числа зубьев на СЗК.

Таким образом, структурная схема пространственного ЗВ с точки зрения количества наличия в ней элементов будет проще, а ее стилизованный аналог представлен на рис. 4б.

**Выводы.** С целью систематизации существующих технических решений, а также облегчения поиска новых решений в области регулируемых механических передач построена 4-х уровневая их классификация, в которой **первый уровень** – это уровень классификации всех регулируемых передач, **второй** – классификация регулируемых механических передач, **третий** – классификация регулируемых зубчатых передач, **четвертый** – классификация непосредственно зубчатых колес. Установлены основные принципы построения классификации регулируемых зубчатых передач. Разработанную классификацию можно использовать как поле возможных решений. С ее помощью оп-

ределены базовые структурные схемы, комбинируя которые, можно получить множество вариантов структур. Предложенная классификация может быть использована также как инструмент для анализа существующих решений.

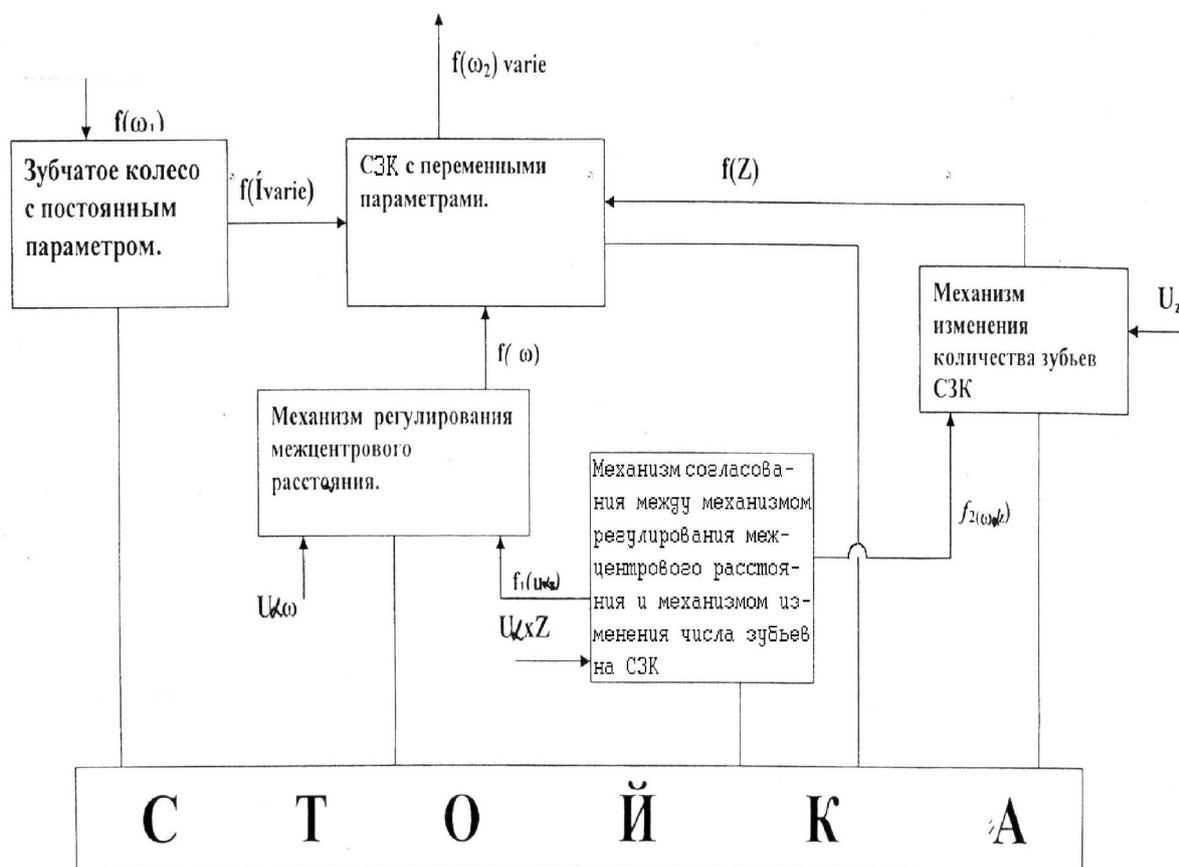


Рис. 5. Структурная схема зубчатого вариатора

**Литература.** 1. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. –М.: Наука, 1968. – 584 с. 2. А.с. №179566 СССР, МКИ F06H. Зубчатая передача с переменным углом между пересекающимися осями / Н.В. Гулиа. –Опубл. 21.01.65, Бюл. №2-3 с. 3. А.с. №1240977 СССР, МКИ<sup>4</sup> F16H 3/42. Зубчатая передача / В.Р. Ковалюх, Н.Э. Тернюк и др. // Опубл. в Б.И. –1986. –№24. 4. А.с. №1388622 СССР, МКИ<sup>4</sup> F16H 1/12. Зубчатая передача / В.Н. Соболев, Н.Э. Тернюк и др. // Опубл. в Б.И. –1988. –№ 14. 5. А.с. №1548556 СССР, МКИ<sup>5</sup> F16H 1/12. Зубчатый редуктор / Н.Э. Тернюк, А.В. Устиненко, Р.В. Ковалюх // Опубл. в Б.И. –1990. –№9. 6. Ковалюх В.Р., Ковалюх Р.В. Новый способ регулирования скорости вращения зубчатой передачи и синтез на его основе зубчатых вариаторов. // Теория механизмов и машин –1988. –Вып. 44 –С. 107-112. 7. А.с. №1551891 СССР, МКИ<sup>5</sup> F16H 1/12. Зубчатый редуктор / Н.Э. Тернюк, А.В. Устиненко, Ю.Б. Наседкин, Р.В. Ковалюх // Опубл. в Б.И. –1990. –№11. 8. Кривошея А.В. Основные принципы классификации систематизации исходных формообразующих профилей зубьев. Резание и инструмент в технологических системах. // – Межд. научн.-техн. Сборник. –Харьков: ХГПУ, 2001. –Вып. 60. –102-107 с. 9. Ковалюх Р.В., Волонцевич Д.О. Стратегия выбора критериев при синтезе шагающих движителей. // Вестник ХПИ, –№254: Конструирование и исследование тракторов, –Вып. 7, 1988, –С 56-59. 10. Крайнев А.Ф. Словарь-справочник по механизмам. –М.: 126  
Механiка та машинобудування, 2015, № 1

*Машиностроение 1981. –438 с. 11. Положительное решение по заявке №4818144 СССР, МКІ<sup>3</sup> F16H 3/42. Вариатор / Волонцевич Д.О., Тернюк Н.Э., Кистерный Ю.И., Ковалюх Р.В., Сობоль В.Н.*

**Bibliography (transliterated).** 1. Litvin F.L. *Teoriya zubchatyih zatsepleniy.* –M.: Nauka, 1968. – 584 s. 2. A.s. №179566 SSSR, MKI F06N. *Zubchataya peredacha s peremennym uglom mezhd u peresekayuschimisya osyami / N.V. Gulia.* – Opubl. 21.01.65, Byul. №2-3 s. 3. A.s. №1240977 SSSR, MKI4 F16H 3/42. *Zubchataya peredacha / V.R. Kovalyuh, N.E. Ternyuk i dr.* // Opubl. v B.I. – 1986. –№24. 4. A.s. №1388622 SSSR, MKI4 F16H 1/12. *Zubchataya peredacha / V.N. Sobol, N.E. Ternyuk i dr.* // Opubl. v B.I. –1988. –№ 14. 5. A.s. №1548556 SSSR, MKI.5 F16H 1/12. *Zubchatyyi reduktor / N.E. Ternyuk, A.V. Ustinenko, R.V. Kovalyuh* // Opubl. v B.I. –1990. –№9. 6. *Kovalyuh V.R., Kovalyuh R.V. Novyyi sposob regulirovaniya skorosti vrascheniya zubchatoy peredachi i sintez na ego osnove zubchatyih variatorov.* // *Teoriya mehanizmov i mashin* –1988. –Vyip. 44 –S. 107-112. 7. A.s. №1551891 SSSR, MKI5 F16H 1/12. *Zubchatyyi reduktor / N.E. Ternyuk, A.V. Ustinenko, Yu.B. Nasedkin, R.V. Kovalyuh* // Opubl. v B.I. –1990. –№11. 8. *Krivosheya A.V. Osnovnyie printsipy klasifikatsii sistematsii ishodnyih formoobrazuyuschih profiley zubev. Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah.* // – *Mezhd. nauchn.-tehn. Sbornik.* –Harkov: HGPU, 2001. –Vyip. 60. – 102-107 s. 9. *Kovalyuh R.V., Volontsevich D.O. Strategiya vyibora kriteriev pri sinteze shagayuschih dvizhiteley.* // *Vestnik HPI,* –№254: *Konstruirovaniye i issledovaniye traktorov,* –Vyip. 7, 1988, –S 56-59. 10. *Kraynev A.F. Slovar-spravochnik po mehanizamam.* –M.: *Mashinostroeniye 1981.* –438 s. 11. *Polozhitelnoe reshenie po zayavke №4818144 SSSR, MKI3 F16H 3/42. Variator / Volontsevich D.O., Ternyuk N.E., Kisternyy Yu.I., Kovalyuh R.V., Sobol V.N.*

Волонцевич Д.О., Ковалюх Р.В.

## ОСНОВИ КЛАСИФІКАЦІЇ МЕХАНІЧНИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ, ЩО РЕГУЛЮЮТЬСЯ, ТА ДЕЯКІ ПИТАННЯ ЇХ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗУ

### Частина 2

В другій частині викладений погляд авторів на проблему класифікації двопараметричних зубчастих передач і їх складових – зубчастих коліс. З допомогою запропонованої класифікації визначені базові структурні схеми. Класифікація може бути використана як інструмент і для синтезу нових і для аналізу існуючих технічних рішень.

Volontsevich D.O., Kovalyuh R.V.

## THE BASIS OF THE CLASSIFICATION ADJUSTABLE MECHANICAL GEAR AND SOME ISSUES OF STRUCTURAL SYNTHESIS

### Part 2

In this part sets out the views of the authors on the classification of two-parameter gear drive and their components – gearwheel. With the proposed classification defines the basic structural schemes. The classification may be used as a tool for the synthesis of new and for analysis of existing solutions.