
DOI: 10.53078/20778481_2023_2_22

УДК 621.833.01

Ю. В. Гончаров, А. М. Даньков

СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ПЛАНЕТАРНЫХ ПЛАВНОРЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕДАЧ

Y. V. Goncharov, A. M. Dankov

COMPARATIVE ANALYSIS OF PLANETARY CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSION DEVELOPMENT

Аннотация

Рассмотрены модификации планетарных плавнорегулируемых передач типа К-Н-V с соосным и оппозитным расположением сателлитов, а также модификация со сдвоенным сателлитом. В результате проведенного анализа предложены технические решения по совершенствованию конструкции планетарной плавнорегулируемой передачи путем использования эпициклоидально-цевочного зацепления и силового замыкания сателлита и центрального зубчатого колеса. Созданные усовершенствованные механические компоненты могут найти применение в планетарной плавнорегулируемой передаче для узлов трансмиссий транспортных средств.

Ключевые слова:

планетарная плавнорегулируемая передача, беззазорное зацепление, силовое замыкание сателлита и центрального зубчатого колеса.

Для цитирования:

Гончаров, Ю. В. Сопоставительный анализ развития планетарных плавнорегулируемых передач / Ю. В. Гончаров, А. М. Даньков // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 2 (79). – С. 22–33.

Abstract

The article considers modifications of KHV-type planetary continuously variable transmissions with coaxial and opposed arrangement of satellites, as well as a modification with a double satellite. As a result of the analysis, technical solutions were proposed to improve the design of continuously variable planetary transmissions by using cycloidal lantern gearing and force closure of the satellite and the sun gear. Improved mechanical components created can be used in continuously variable planetary transmissions for vehicle gearbox units.

Keywords:

planetary continuously variable transmission, backlash-free engagement, satellite, force closure of the satellite and the central gear.

For citation:

Goncharov, Y. V. Comparative analysis of planetary continuously variable transmission development / Y. V. Goncharov, A. M. Dankov // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 2 (79). – P. 22–33.

Использование в трансмиссиях транспортных средств вариаторов является одним из способов бесступенчатого изменения передаточного отношения. Наиболее широкое применение в настоящее время получили фрикционные ва-

риаторы. Как перспективные также можно рассматривать вариаторы, использующие принцип зацепления, – цепные, высокомоментные, а также зубчатые адаптивные с цельными зубчатыми колесами [1].

В последнее время разработчиками перспективных видов трансмиссий, предложен ряд конструкций адаптивных зубчатых передач [2], не имеющих звеньев, управляющих передаточным отношением, и лишенных присущих фрикционным вариаторам недостатков, таких как значительные радиальные нагрузки на валы и опоры, непостоянство передаточного отношения, и, что немаловажно, низкий КПД.

Приемлемой альтернативой указанным передачам может служить зубчатая передача нового типа, а именно передача с составными секторальными зубчатыми колесами, способная плавно изменять свое передаточное отношение.

В основу передачи с составными секторальными зубчатыми колесами [3] положены принципы:

- фрагментации, суть которого состоит в том, что ее зубчатый венец выполнен из секторов;

- разделения на ведущем или ведомом валу силового потока как минимум на два с обеспечением их независимого функционирования и упругой связи между их элементами;

- обеспечения жесткой кинематической связи между перемещающимися элементами передачи при изменении геометрических размеров передачи, обуславливающих изменение ее передаточного отношения.

Способ перехода от зубчатых передач с цельными зубчатыми колесами к передачам с составными секторальными – конструктивное преобразование. Так, в результате последовательного преобразования конструкции планетарной передачи К-Н-V она может быть представлена в виде двухколесной эксцентриковой передачи, в которой в форме составного секторального выполнено центральное зубчатое колесо (далее – ЦЗК).

Как известно, улучшение характеристик технического объекта по одному из критериев развития приводит к ухудшению его параметров по другим

функциональным характеристикам. В планетарной плавнорегулируемой передаче (далее – ППП) это проявляется в периодическом (с секторной частотой) увеличении отклонения угла поворота ведомого вала от номинального при равномерном вращении ведущего. Вместе с тем, по мнению авторов, этот недостаток может быть компенсирован, при этом неизбежные затраты окупятся уникальными возможностями новой передачи.

Для всех механических передач проблема встраивания в кинематическую цепь решается посредством использования входного и выходного вала. Выходным элементом «классической» передачи К-Н-V, разновидностью которой является ППП, служит сателлит, установленный на кривошипе переменного радиуса, в данном случае применение для связи с окружающей средой механизма параллельных кривошипов в ППП типа К-Н-V невозможно. Возникшее противоречие разрешается в результате оснащения ППП выходным валом и механизмом, который обеспечит жесткую кинематическую связь сателлита с выходным валом.

В Белорусско-Российском университете на протяжении уже более 20 лет активно ведутся разработки плавнорегулируемых зубчатых передач, в том числе и планетарных, в конструкции которых используется ЦЗК с переменным условным начальным диаметром. Это колесо представляет собой набор зубчатых секторов, равномерно размещенных по его периферии и образующих два силовых потока.

Для нормальной работы ППП, т. е. изменения крутящего момента на ведомом валу при постоянном значении момента на ведущем, необходимо плавное изменение геометрии зубчатой передачи. Это достигается тем, что зубчатые сектора жестко связаны с корпусом колеса в окружном направлении при одновременной возможности синхронно перемещаться относительно оси враще-

ния зубчатого колеса. В настоящее время проработаны три (см. аннотацию) модификации ППП, включающие сателлит, ЦЗК и вспомогательные механизмы различного назначения.

Первая модификация представляет собой ППП типа К-Н-V с двумя соосными зубчатыми венцами двухпоточного сателлита (рис. 1), который может быть незафиксированным [4] и зафиксированным от собственного вращения [5]. Для предохранения передачи от

поломок и уменьшения кинематической погрешности выходного вала зубчатые венцы должны быть между собой упруго связанными в окружном направлении. Экспериментально подтверждено, что использование более компактных торсионных упругих компенсаторов в узле сателлита, обладающих высокой нагрузочной способностью, имеет преимущество перед амортизаторами других типов.

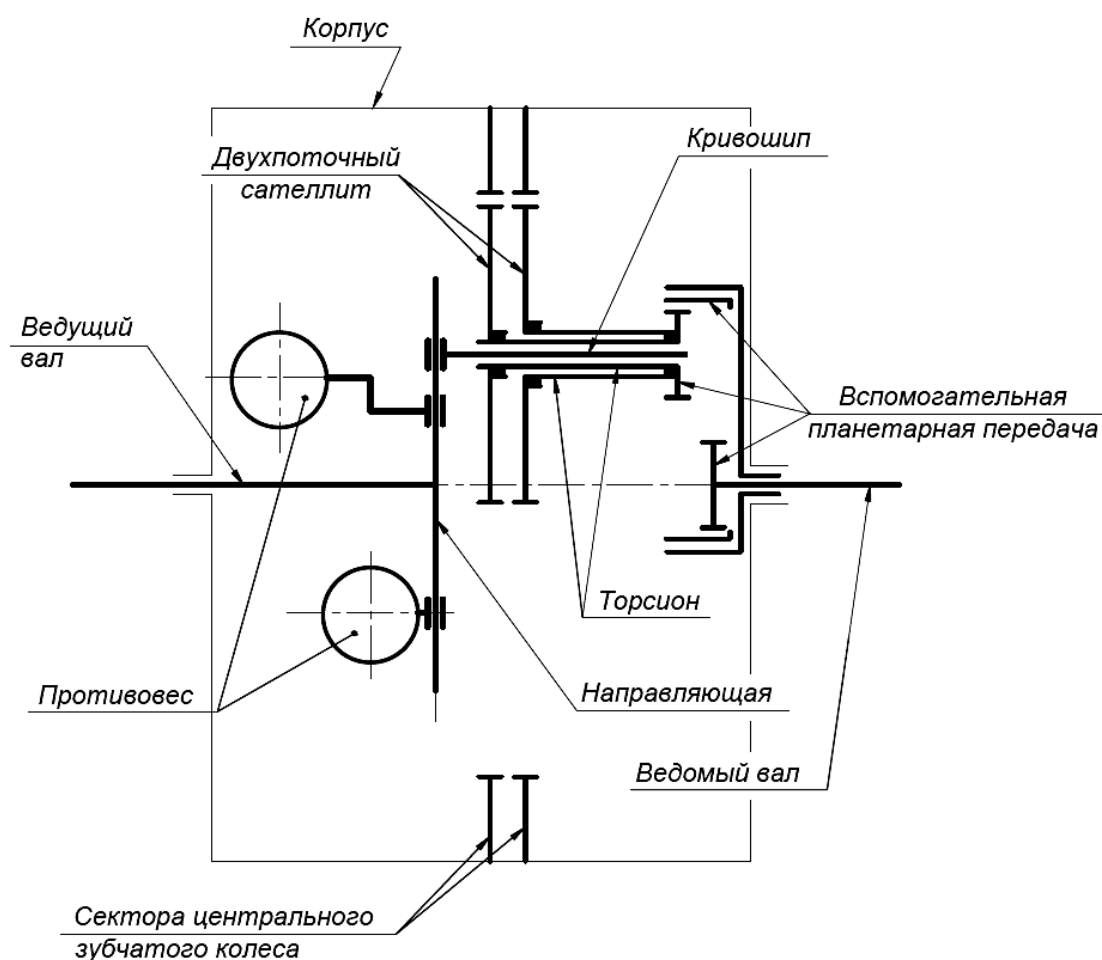


Рис. 1. ППП с вспомогательной планетарной передачей и подвижными противовесами

Изменение передаточного отношения передачи в данном случае достигается синхронным изменением геометрических размеров ЦЗК и радиуса эксцентрика сателлита, а ее конструктивными проблемами является необходимость балансировки сателлита с пере-

менным центром масс, а также съема вращения с сателлита и сообщение его ведомому валу при изменяемом значении передаточного отношения.

Несмотря на то, что использование вспомогательной планетарной передачи позволяет увеличить диапазон регули-

рования передаточного отношения, ее наличие в совокупности с необходимостью использовать подвижные в радиальном направлении противовесы усложняют конструкцию передачи и делают ее неконкурентоспособной [6]. Полная балансировка блока сателлитов в любом их радиальном положении осуществляется с помощью механизма, включающего подвижные основной и дополнительный противовесы. Возможна конструкция передачи, в которой противовесы не будут совершать радиальных перемещений.

Некоторые разработчики могут столкнуться с проблемой кинематической связи валов с большой несоосностью в приводных механизмах. Возможность переменного параллельного смещения вала в сочетании с небольшим расстоянием между их торцами при достаточной крутильной жесткости обеспечивает муфта Шмидта, представленная на рис. 2. Ее конструкция позволяет реализовать как реальные условия работы передачи, так и передаваемую мощность.

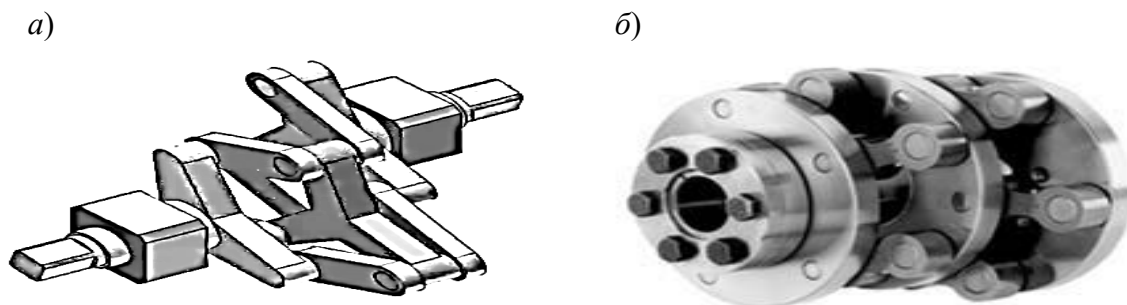


Рис. 2. Муфта Шмидта: а – принцип действия; б – общий вид

Ввиду того, что плавнорегулируемая ступень передачи обладает преобразующей способностью, достаточной для ее использования в наиболее перспективной области – автомобилестроении, от вспомогательной планетарной передачи (как источника дополнительной преобразующей способности) можно отказаться. Конструкция этой модификации ППП, в которой крутящий момент от сателлита передается ведомому валу с помощью муфты Шмидта, приведена на рис. 3. Использование данной муфты при незначительном снижении передаточного отношения упрощает конструкцию передачи и позволяет повысить ее КПД.

Второй модификацией плавнорегулируемой передачи, использующей классическую схему передачи К-Н-V, является передача с оппозитными венцами двухпоточного сателлита [4].

Выходным движением в первой модификации является собственное вращение сателлита, а во втором – вращение ЦЗК, установленного на выходном валу. Недостатком второй модификации является невозможность выполнить зубчатые венцы сателлита с минимальным по условиям контактной прочности начальным диаметром.

Оппозитное расположение зубчатых венцов сателлита позволяет отказаться от механизма съема вращения с сателлита, но требует оснащения передачи противоположным устройством, фиксирующим сателлит от вращения вокруг собственной оси. В первой модификации это может быть реализовано применением муфты Ольдгейма, обеспечивающей относительную неподвижность зубчатых венцов сателлита в комбинации с муфтой Шмидта, обеспечивающей связь одного из венцов с корпусом.

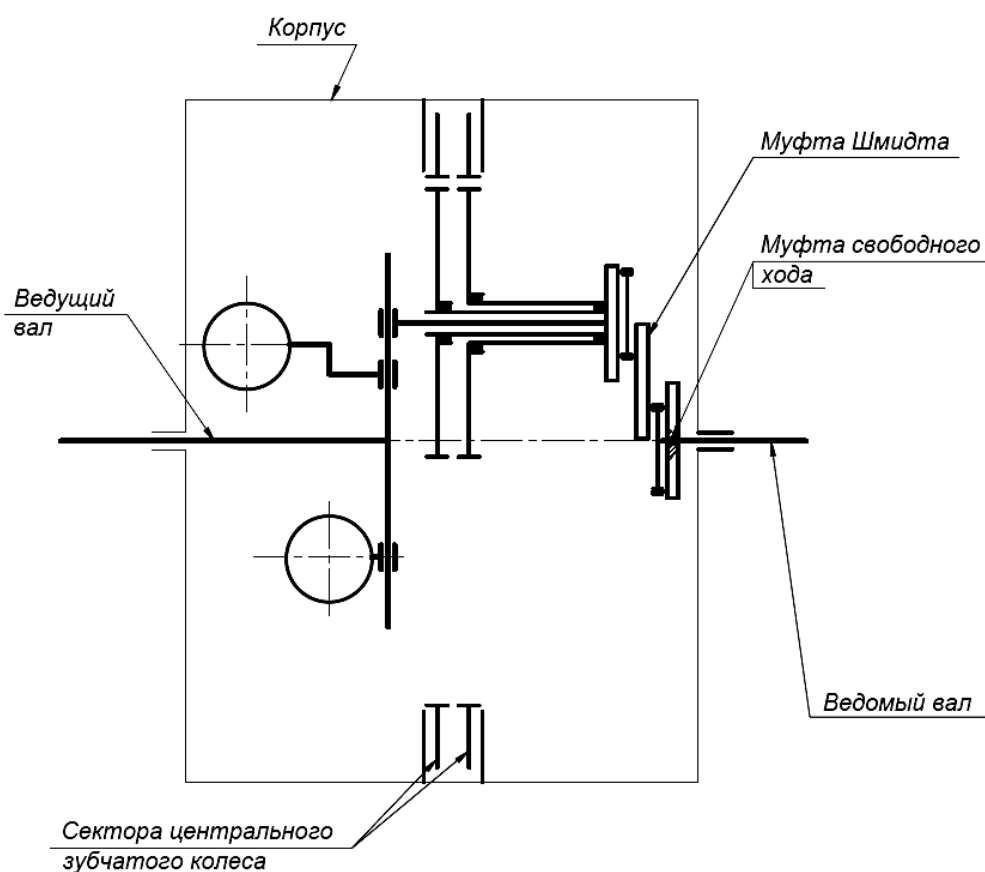


Рис. 3. ППП с муфтой Шмидта в качестве механизма съема вращения с сателлита

Изменение условного диаметра ЦЗК в обеих модификациях осуществляется специальными механизмами. Благодаря оппозитной установке не вращающихся вокруг собственной оси зубчатых венцов сателлита силовая кинематическая цепь в данной модификации передачи конструктивно проще (рис. 4) в сравнении с модификацией с соосными зубчатыми венцами сателлита, что является следствием отсутствия механизмов-посредников между ЦЗК и выходным валом. Принцип действия передачи в обеих модификациях реализуется благодаря вспомогательным механизмам.

Разработку ППП с оппозитным расположением зубчатых венцов сателлита вызвала жизненная необходимость упрощения конструкции передачи. Оно

было достигнуто даже несмотря на наличие противоповоротного устройства. Подобный эффект обеспечивает сравнительно давно известная передача с двухвенцовым сателлитом или передача с нерегулируемым передаточным отношением. Объединив ее конструктивные достоинства с принципом фрагментации, можно получить достаточно простую и оригинальную модификацию ППП.

Способная заинтересовать разработчиков ППП схема нерегулируемой планетарной передачи приведена в [6], где констатируется, что подобные редукторы построены по схеме $2k-h$ (рис. 5), в которых оба центральных колеса a и b имеют внутренние зубья, позволяющие получить высокие передаточные отношения (500...800).

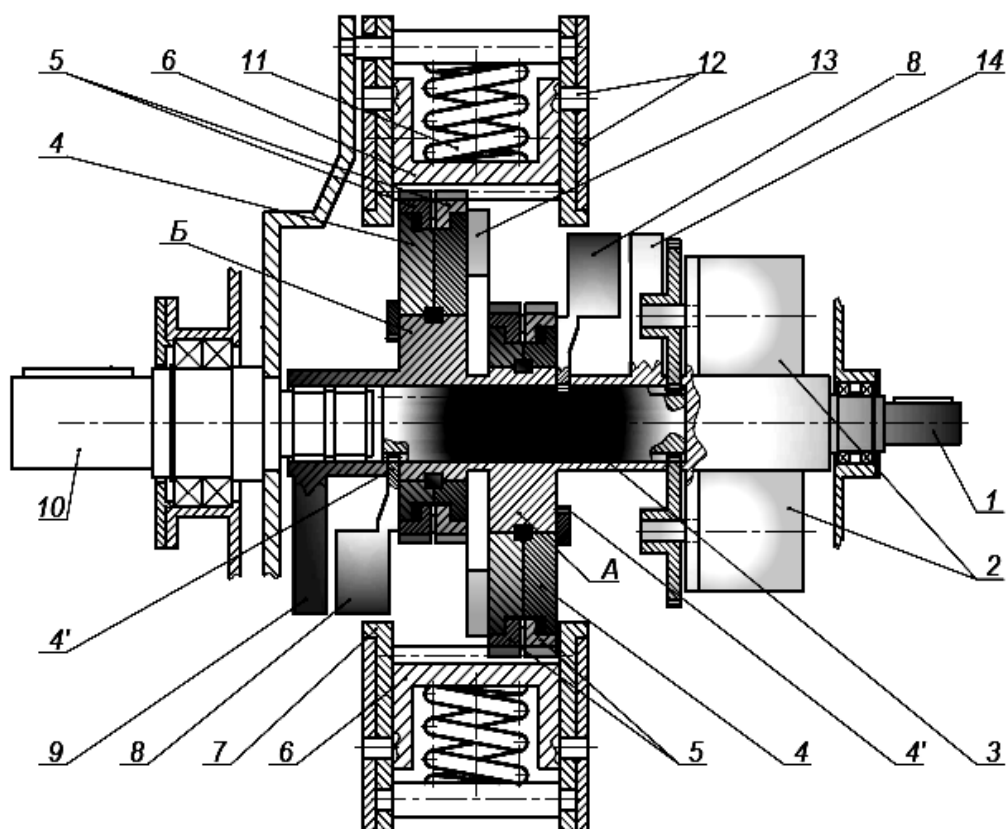
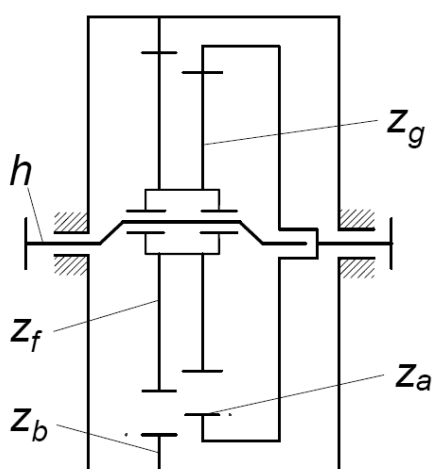


Рис. 4. Схема ППП с оппозитными зубчатыми венцами сателлита: 1 – ведущий вал с эксцентриками А и Б; 2 – шаговый двигатель; 3 – промежуточное управляющее зубчатое колесо; 4 – эксцентричная втулка с зубчатым колесом, находящимся в зацеплении с зубчатым колесом 3; 5 – зубчатые венцы сателлита; 6 – зубчатый сектор ЦЗК; 7 – корпус ЦЗК; 8 – противовес эксцентричной втулки; 9 – противовес эксцентрика Б; 10 – выходной вал; 11 – пружина; 12 – многопоточный кулачковый механизм ЦЗК; 13 – механизм фиксации сателлитов от вращения относительно собственной оси; 14 – противовес эксцентрика А

а)



б)

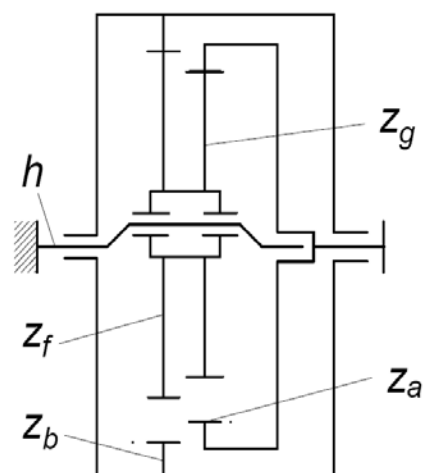


Рис. 5. Планетарная передача с двухвенцовым сателлитом по схеме $2k-h$: а – с неподвижным зубчатым колесом z_b ; б – с неподвижным водилом

При фиксации цевочного колеса b (см. рис. 5, *a*) водила h является входным звеном, к которому подводится вращающий момент. Оно имеет форму эксцентрикового вала, на котором вращается двухвенцовый сателлит $f-g$. При фиксации водила h (см. рис. 5, *б*) цевочное колесо b становится входным звеном, к которому подводится вращающий момент.

Поскольку диаметр цевочного колеса определяется в основном вращающим моментом на выходном валу, при небольшом числе цевок их диаметр может быть достаточно большим. Это позволяет использовать в качестве цевок ролики на игольчатых подшипниках, консольно закрепленных в цевочном колесе и корпусе [7].

Отдельно как объект совершенствования и третью модификацию ППП, с учетом имеющихся наработок, можно рассматривать разрабатываемую в Белорусско-Российском университете оригинальную ППП со сдвоенным сателлитом. Эта передача реализует все фундаментальные (разделение силового потока и его независимое функционирование, жесткая кинематическая связь между перемещениями элементов передачи в процессе регулирования передаточно-

го отношения) и конструктивные (оппозитное расположение и фиксация сателлитов от вращения вокруг собственной оси, а также их силовое замыкание с ЦЗК) принципы построения конструкции плавнорегулируемых зубчатых передач, что обеспечивает ей приемлемую конструктивную простоту и компактность. Причем реализация последнего принципа определяет выбор используемого в передаче косозубого циклоидально-цевочного зацепления (рис. 6).

Описанные конструкции модификаций передач с составными секторальными зубчатыми колесами ППП в дальнейшем могут быть еще более упрощены. Применив беззазорное зацепление зубьев сателлита и ЦЗК посредством силового замыкания между ними, задавая при этом управляющее перемещение сателлиту или ЦЗК в механизме регулирования передаточного отношения, можно отказаться от кинематической ветви управления их вылетом сателлита или секторов ЦЗК.

На рис. 7, *a* приведена схема ППП с силовым замыканием ЦЗК и сателлита с соосными зубчатыми венцами, а на рис. 7, *б* – с оппозитными зубчатыми венцами.

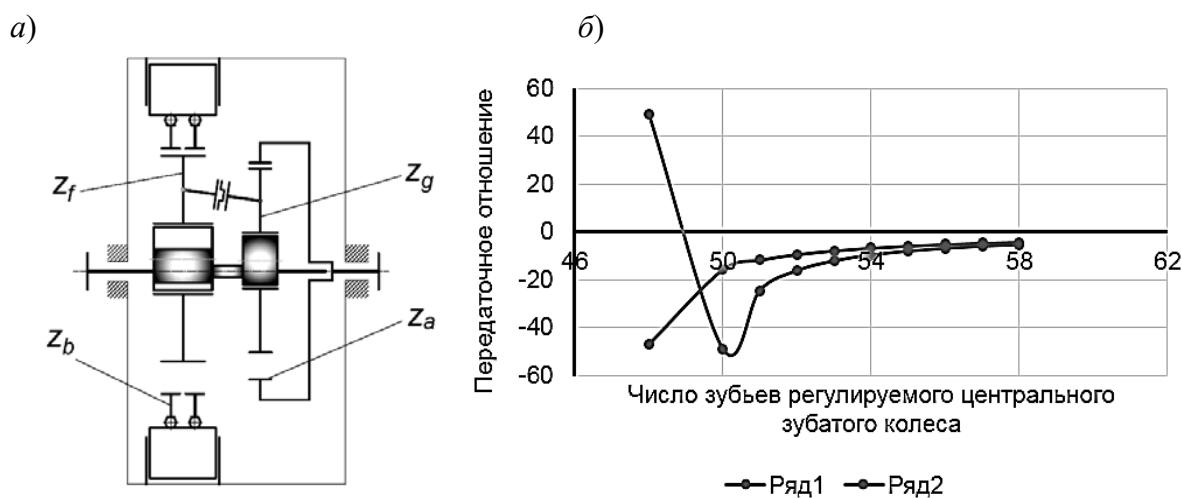


Рис. 6. ППП с косозубым циклоидально-цевочным зацеплением: *a* – схема передачи; *б* – график изменения передаточного отношения регулируемой ступени (ряд 1) и передачи (ряд 2) в зависимости от числа зубьев регулируемого ЦЗК

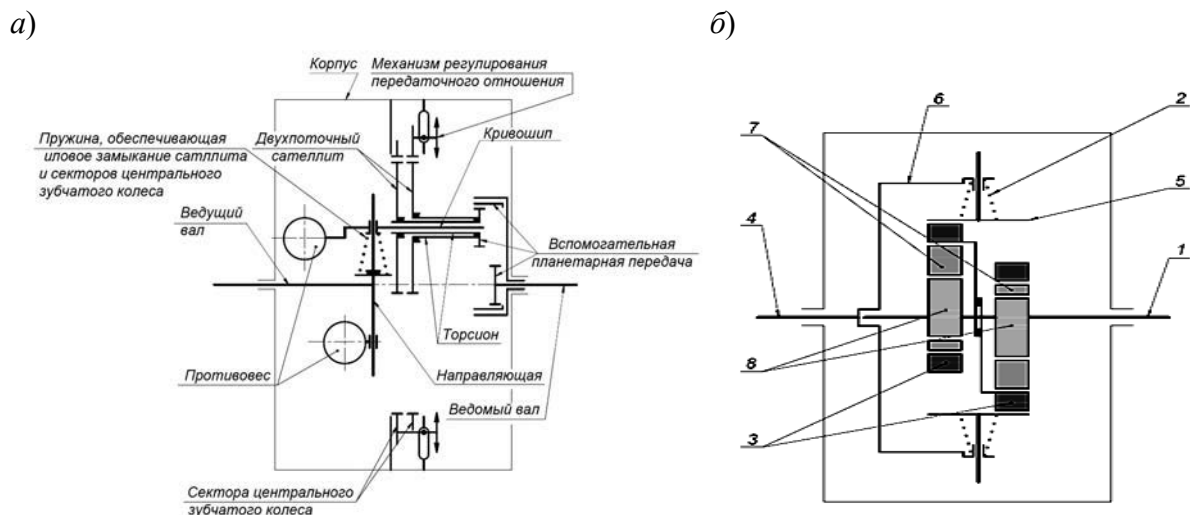


Рис. 7. Схема ППП с силовым замыканием ЦЗК и сателлита с соосными зубчатыми венцами (а) и с оппозитными зубчатыми венцами сателлита (б): 1 – ведущий вал; 2 – пружина силового замыкания сателлита и секторов ЦЗК; 3 – двухпоточный сателлит; 4 – ведомый вал; 5 – сектора ЦЗК; 6 – корпус ЦЗК; 7 – эксцентричные втулки; 8 – эксцентрики ведущего вала

Сравнивая конструкции обеих модификаций передачи с силовым замыканием, легко увидеть, что в передаче с соосными зубчатыми венцами сателлита с увеличением передаточного отношения увеличиваются и радиальная сила в зацеплении, и деформация пружины. В передаче с оппозитными сателлитами увеличение радиальной силы в зацеплении сопровождается уменьшением деформации пружины. Рассматриваемая структура передачи предполагает, что при увеличении передаточного отношения деформация пружин должна увеличиваться. Это возможно только при условии, что опоры пружин, связанные с корпусом ЦЗК, будут в процессе регулирования передаточного отношения совершать радиальные перемещения в 2 раза превышающие перемещения зубчатых секторов.

Указанное обстоятельство, усложняющее конструкцию передачи в меньшей степени, чем наличие механизма управления передаточным отношением, реализующего два управляющих воздействия, не является препятствием как для реализации идеи силового замыка-

ния сателлита и ЦЗК в предложенном виде, так и поиска других решений проблемы. В данном случае нетрудно сделать выводы в пользу компоновки с оппозитным расположением венцов сателлита, в которой конструкция ППП проще.

Во всех известных к настоящему времени плавнорегулируемых передачах используется эвольвентное зацепление как наиболее технологичное и простое в изготовлении. Использование силового замыкания при таком зацеплении приводит к повышенному скольжению при неkratности шага секторов окружному шагу зубьев, что неизбежно в передаче с торцевым перекрытием зубьев, а также добавляются дополнительные силы на трение при двухпрофильном контакте зубьев.

Уменьшить скольжение можно в передаче с осевым перекрытием зубьев, в котором есть боковой зазор и нет радиального. Данным условиям потенциально удовлетворяет представленное на рис. 8 зацепление Гребенюка (эллиптическое) [8], которое позволяет создать графическую модель ППП с пространственно точечным зацеплением.

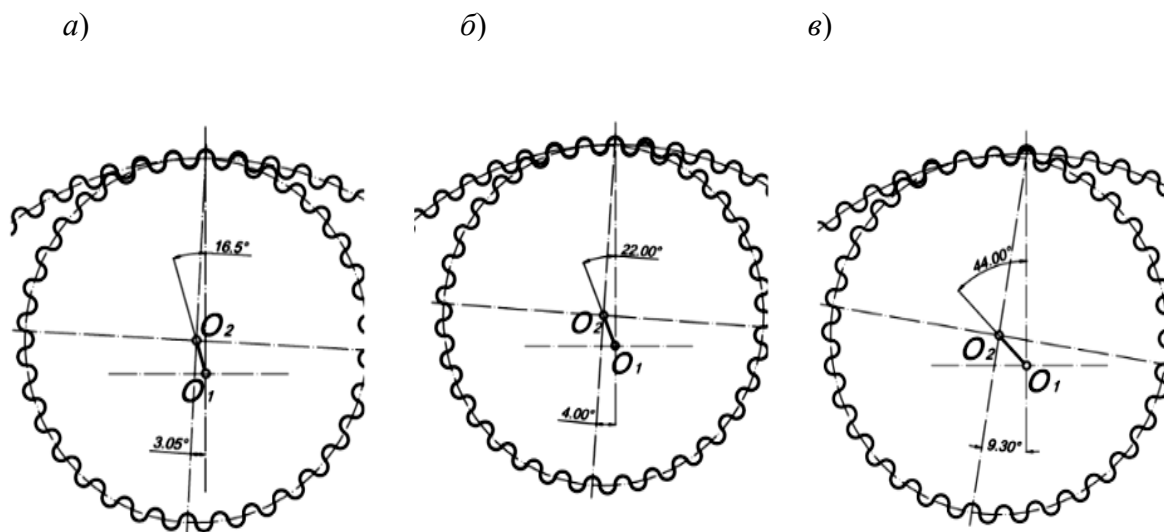


Рис. 8. Плавнорегулируемая передача с силовым замыканием сателлита и сектора ЦЗК и зацеплением Гребенюка (торцовое сечение)

Геометрическая форма зубчатых секторов и вызванная ею конфигурация не идентичны условному ЦЗК, что ведет к необходимости при любых изменениях передаточного отношения передачи периодически исключать силовое замыкание и фиксировать сателлит в зоне пересопряжения зубчатых секторов разных потоков в определенном положении. В противном случае присущие для ППП погрешности угла поворота сателлита, вызванные отклонением зубьев секторов ЦЗК от номинального положения [9], значительно возрастают из-за недопустимого увеличения радиуса водила, что негативно сказывается на работе передачи.

В последнее время в различных источниках все чаще освещается эксцентриково-циклоидальное (ЭЦ) зацепление, создающее предпосылки к применению косозубых передач с циклоидальным профилем зуба [10]. Используя информацию, приведенную в [10], можно предположить существование косозубой циклоидально-цевочной передачи, в которой присутствует как торцовое, так и осевое перекрытие зубьев. Тогда, рассматривая приведенные в [11] графические модели плавнорегулируе-

мой косозубой циклоидально-цевочной передачи с силовым замыканием, получим приведенные на рис. 9 результаты ее моделирования.

Проделанный анализ позволяет сделать вывод в пользу эпициклоидально-цевочного зацепления, имеющего наименьшую погрешность угла поворота сателлита в зависимости от угла отклонения водила, по сравнению с зацеплением Гребенюка и эвольвентным. Использование беззазорного эпициклоидально-цевочного зацепления и силового замыкания двухпоточного сателлита и ЦЗК позволяет также упростить механизм регулирования передаточного отношения посредством передачи управляющего воздействия только сателлиту.

На макете передачи, изготовленном для проверки именно этого технического решения, представленном на рис. 10, силовое замыкание реализуется за счет прижатия сателлита 1 к секторам 2 ЦЗК пружинной 3, а управляющее воздействие сообщается секторам управляющими зубчатыми колесами 4, синхронность вращения которых обеспечивается замыкающими зубчатыми колесами 5. Опробование макета подт-

верждает работоспособность принятых технических решений по совершенст-

вованию зацепления в ППП.

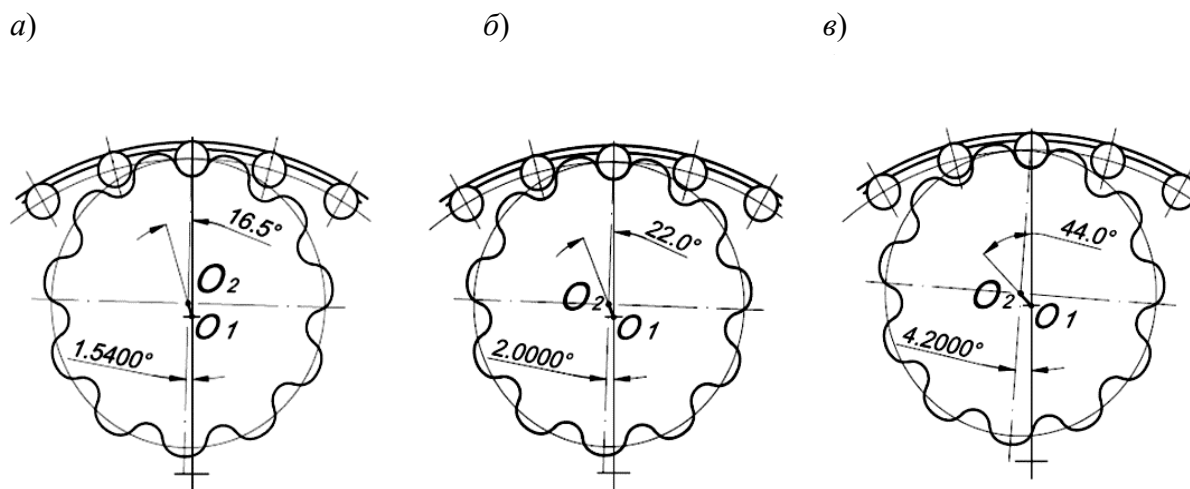


Рис. 9. Плавнорегулируемая передача с силовым замыканием сателлита и сектора ЦЗК и циклоидально-цевочным зацеплением (торцовое сечение)



Рис. 10. Макет передачи с силовым замыканием сателлита и секторов ЦЗК

Несмотря на ряд предоставляемых преимуществ, силовое замыкание при реализации эпициклоидально-цевочного зацепления в ППП не избавляет при

регулировании передаточного отношения передачи от интерференции зубьев сателлита и цевок секторов ЦЗК, приведенной на рис. 11.

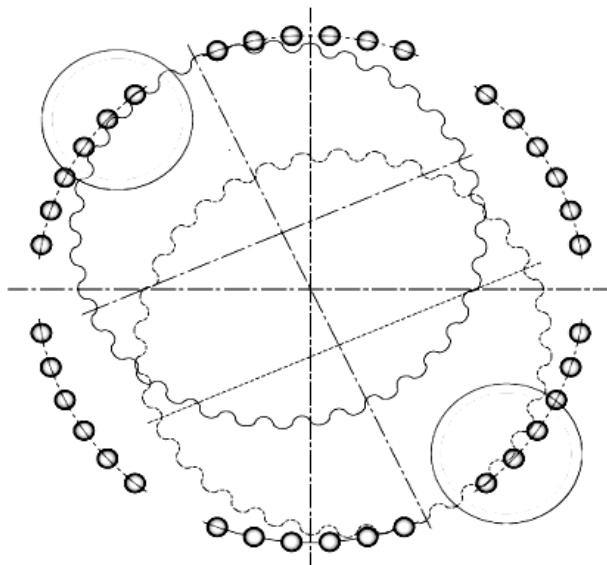


Рис. 11. Интерференция зубьев сателлита и цевок секторов ЦЗК (выделены зоны интерференции)

Наиболее эффективным средством сглаживания этого недостатка представляется выполнение каждого из оппозиционных сателлитов двухпоточным. Однако большое количество упругостей в конструкции передачи может послужить основой для проявления другого недостатка – ее низкой виброзащищенности. Кроме того, пружина сжатия в качестве элемента для обеспечения силового замыкания в данной конструкции малоэффективна. Возможен перенос упругого элемента на ЦЗК и выполнение его секторов двухпоточными, что особенно эффективно в третьей модификации ППП.

Рассмотренные в данной статье конструкции ППП далеки от конструктивного и технологического совершенства, но они являются итогом развития плавнорегулируемой зубчатой передачи по критерию передаточного отношения, представляют собой основу для формирования технических решений по опытному образцу ППП.

Присущее ППП свойство плавного изменения передаточного отношения достигается нарушением целостности ЦЗК, что приводит к главному ее недостатку – увеличению погрешности угла поворота выходного вала при равно-

мерном вращении ведущего. Эта погрешность, в значительной мере определяемая используемым типом зацепления, использовалась при графическом моделировании ППП в качестве характеристики погрешности передаточного отношения. Так, в передаче с эвольвентным зацеплением без силового замыкания эта погрешность в пределах угла поворота ведущего вала, равного углу регулирования, составляла $0,8^\circ$, а с силовым замыканием – $0,4^\circ$, в передаче с зацеплением Гребенюка – $0,2^\circ$, с косозубым циклоидально-цевочным – $0,0055^\circ$. На основании изложенного могут быть подготовлены целесообразные решения если не по устранению, то по нивелированию указанного недостатка.

Другим недостатком ППП является интерференция зубьев сателлита и ЦЗК при регулировании передаточного отношения. В реальной ППП избежать проявления интерференции возможно во всех модификациях передачи при наличии упругой связи или между зубчатыми венцами сателлита, относящихся к различным силовым потокам, или зубчатыми венцами секторов ЦЗК. Вместе с тем следует отметить, что вызванное отмеченными недостатками конструктивное усложнение передачи ком-

пенсирруется сообщением ей уникальных кинематических характеристик. Так, графическим моделированием установлено, что в ППП с соосными, а также оппозитными зубчатыми венцами сателлита может быть реализован диапазон регулирования до 10...20. При этом следует иметь в виду, что с увеличением его значения увеличиваются габариты передачи, а в модификациях с сателлитом в качестве выходного звена в дополнение к режиму редукции могут быть реализованы режимы единичного преобразования и мультипликации, в то время как в модификации с ведомым центральным зубчатым колесом реали-

зуется только режим редукции. В модификации ППП со сдвоенным сателлитом реализуется диапазон регулирования до 10 с возможностью реверсирования выходного вала.

Очевидно, что для каждой модификации пусть не всегда, но присутствуют некоторые специфические отличия их кинематических характеристик и задача дальнейшего исследования заключается в необходимости их изучения. Необходимо также определить область применения для каждой из рассмотренных модификаций либо выбрать наиболее перспективную модификацию ППП.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вариаторная коробка передач [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http:// autoustroistvo.ru/transmissiya/variator/](http://autoustroistvo.ru/transmissiya/variator/). – Дата доступа: 18.11.2022.
2. Краткая теория зубчатого вариатора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://indust-engineering.ru./issues/2018/2018-1-4.pdf&ved=2ahUKEwiVzqG66QKHT5zDrw4ChAWegQIEhAB&usq=AOvVaw04dF2kBbSrd5yWRU6WaMMVЩ>. – Дата доступа: 28.11.2022.
3. Совершенствование конструкции и обеспечение требуемого уровня эксплуатационных характеристик механических компонентов вариатор-редуктора для мехатронных, автоматических систем и трансмиссий: отчет о НИР (заключ.) / Белорус.-Рос. ун-т; рук. А. М. Даньков; исполн. : А. Е. Науменко [и др.]. – Могилев, 2015. – 96 с.
4. Планетарная плавнорегулируемая зубчатая передача: пат. ВУ 17498 / А. М. Даньков. – Оpubл. 30.04.2012.
5. Плавнорегулируемая зубчатая передача: пат. ВУ 18285 / А. М. Даньков. – Оpubл. 30.12.2011.
6. Планетарная плавнорегулируемая зубчатая передача: пат. ВУ 18194 / А. М. Даньков. – Оpubл. 30.04.2013.
7. Конструктивные исполнения планетарно-цевочных редукторов для высокоточных следящих приводов / А. С. Иванов [и др.] // Вестн. машиностроения. – 2013. – № 3. – С. 9–11.
8. Колмаков, С. В. Силовой анализ безводильных планетарных передач с однозвенными и двухзвенными сателлитами / С. В. Колмаков // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2013. – № 3. – С. 337–346.
9. Иоффе, А. З. Конструктивные и кинематические особенности плавнорегулируемых зубчатых передач / А. З. Иоффе, А. М. Даньков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2011. – № 1. – С. 27–38.
10. Математическое моделирование работы редуктора с циклоидально-эксцентриковым зацеплением / А. М. Бубенчиков [и др.] // Вычислительные технологии. – 2009. – Т. 14, № 2. – С. 51–57.
11. Даньков, А. М. К вопросу о выборе зацепления для плавнорегулируемой зубчатой передачи / А. М. Даньков // Вестн. науки и образования Северо-Запада России. – 2016. – Т. 2, № 1. – С. 1–11.

Статья сдана в редакцию 28 апреля 2023 года

Юрий Владимирович Гончаров, соискатель, Могилевский институт МВД.
E-mail: yumogilev@gmail.com.

Александр Михайлович Даньков, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.
E-mail: amdan@yandex.ru.

Yuri Vladimirovich Goncharov, Cand. Sc. degree applicant, Mogilev Institute of the MIA of the Republic of Belarus. E-mail: yumogilev@gmail.com.

Alexander Mikhailovich Dankov, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Belarusian-Russian University.
E-mail: amdan@yandex.ru.