

DOI: 10.24412/2077-8481-2025-4-52-58

УДК 621. 833. 68

B. B. ХАЛЬПУКОВ

C. И. АНДРЕЕВ

(Могилев, Беларусь)

РЕВЕРСИВНЫЙ ПЛАНЕТАРНЫЙ ВАРИАТОР

Аннотация

Рассмотрен вариатор, состоящий из планетарного зубчатого механизма и обычного клиноременного вариатора, связывающего коронную и солнечную шестерни. Это позволяет получить практически неограниченный бесступенчатый диапазон передаточных чисел вариатора, включая полную остановку и реверс выходного вала при постоянном однонаправленном вращении входного вала.

Ключевые слова:

клиноременной вариатор, планетарный зубчатый механизм, остановка, реверс.

Для цитирования:

Хальпуков, В. В. Реверсивный планетарный вариатор / В. В. Хальпуков, С. И. Андреев // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 4 (89). – С. 52–58.

Введение

В машиностроении при создании коробок передач для транспортных средств в последнее время отчетливо прослеживается тенденция к увеличению применения многоступенчатых, в том числе автоматических механических и гидромеханических передач, а также бесступенчатых механизмов, т. е. вариаторов.

Очевидно, что дальнейшее совершенствование таких коробок на основе исключительно зубчатых передач, либо зубчатых передач с использованием гидромеханических устройств, достигло морального предела из-за усложнения их конструкции, многозвенности, сложности в производстве, обслуживании и ремонте (например, 12-ступенчатая импортная автоматическая коробка передач (АКПП) ZF 12AS2131 автомобиля КамАЗ-5490. Есть вариант с 16-ступенчатой АКПП [1]). Применяемые в настоящее время вариаторы с ременным или металлическим замкнутым гибким звеном с клиновым профилем обладают небольшим диапазоном пе-

ремены передач [2].

Кроме того, ни один из названных примеров исполнения коробок передач не обладает возможностью остановки и реверса выходного вала при постоянном однонаправленном вращении входного вала.

Создание коробок передач на основе зубчатых планетарных механизмов, в которых коронная и солнечная шестерни кинематически связаны клиноременным вариатором, значительно может устранить и (или) уменьшить указанные недостатки, а также получить возможность остановки и реверса выходного вала при постоянном однонаправленном вращении входного вала.

Основная часть

Рассмотрим реверсивный планетарный вариатор (далее – вариатор), сконструированный с использованием двух эффектов в механике планетарных передач, рассмотренных в описании изобретения к патенту № 22875 [3].

При проведении Национальным центром интеллектуальной собственности Республики Беларусь государ-

ственной экспертизы на предмет выдачи патента информация об этих эффектах и устройствах, где они могли бы применяться, выявлена не была.

Первый эффект – управляемые остановка и реверс выходного вала при постоянном одностороннем вращении входного вала без затормаживания какого-либо звена.

Второй эффект – управляемый в широких пределах бесступенчатый диапазон передаточных чисел планетарной зубчатой передачи при введении в ее принципиальную схему бесступенчатого вариатора с клиновым ремнем, имеющего небольшой диапазон собственных передаточных чисел и кинематически связывающего коронную и солнечную шестерни.

На рис. 1 в произвольном масштабе изображен план скоростей и принципиальная кинематическая схема вариатора. Входной вал 1 жестко связан с ведущим раздвижным шкивом 3 и солнечной шестерней 10. Крутящий момент M_{bx} от двигателя передается на ведущий раздвижной шкив 3 и затем, посредством клинового ремня 5, на ведомый раздвижной шкив 4 и промежуточный вал 2 с шестерней 6, связанной зацеплением с шестерней 7, жестко соединенной с шестерней 8. Последняя является коронной шестерней планетарной передачи, в которую также входят сателлиты 9 и солнечная шестерня 10. Водило, на котором шарнирно установлены сателлиты 9, жестко связано с выходным валом 11.

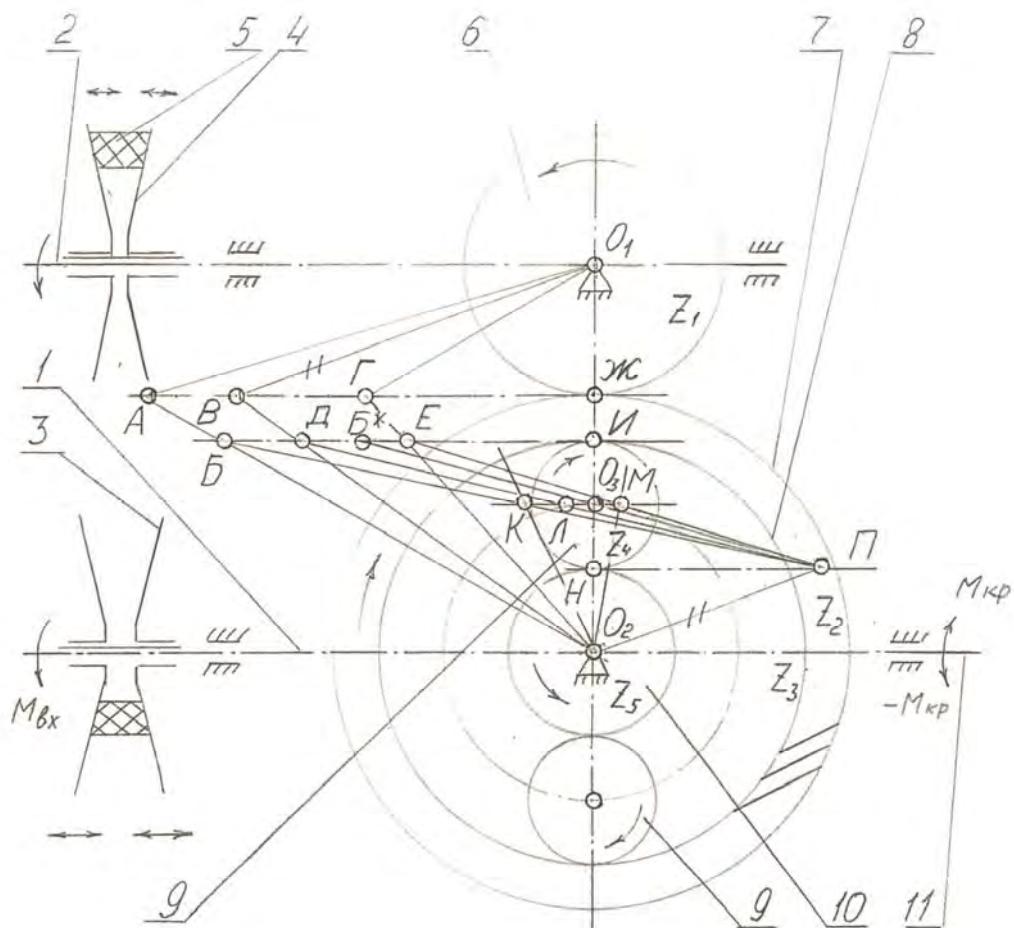


Рис. 1. План скоростей вариатора

Плавное бесступенчатое изменение частоты вращения коронной шестерни 8 достигается изменением передаточного числа между раздвижными шкивами 3 и 4 в пределах между точками *B* и *E* (см. рис. 1). Соответственно, плавное бесступенчатое изменение частоты вращения водила и выходного вала 11 происходит в интервале между точками *K* и *M*.

Следует обратить внимание, что точки *K* и *M* лежат по разные стороны от точки *O₃*, являющейся точкой реверса. В этой точке происходит остановка выходного вала 11. В интервале между точками *O₃* и *M* выходной вал 11 меняет направление вращения на противоположное.

При конструировании модели была решена задача определения таких геометрических размеров клиноременной передачи и зубчатых колес планетарной передачи, при которых проявляется эффект реверса.

Также решена задача определения достаточного диапазона передаточных чисел клиноременной передачи, обеспечивающего не только эффект реверса, но и достаточно широкий диапазон передаточных чисел вариатора, приемлемый для практического применения в трансмиссиях автомобилей и других транспортных средств.

Обе задачи были решены графоаналитическим методом. Решение сводится к вычислению длин сторон прямоугольных треугольников, образованных планом скоростей вариатора (см. рис. 1).

Рассмотрим два случая, характеризующие диапазон передаточных чисел вариатора, в пределах которого находится точка реверса.

1. Диапазон передаточных чисел вариатора от точки *K* до точки *M* расположен несимметрично по обе стороны от точки *O₃* реверса. Такой диапазон может быть rationalen для автомобилей, у которых скорость движения вперед больше скорости движения

назад.

2. Диапазон передаточных чисел вариатора расположен симметрично по обе стороны от точки *O₃* реверса так, что угол *БЛД* равен углу *ДПЕ*. Такое условие следует из симметричности диапазона собственных передаточных чисел клиноременной передачи, когда

$$i_{\min} = i_{\max-1}, \quad (1)$$

где *i_{min}*, *i_{max}* – наименьшее и наибольшее передаточные числа клиноременной передачи соответственно.

Диапазон передаточных чисел вариатора также будет симметричен ввиду указанного выше равенства углов *БЛД* и *ДПЕ*. Такая область может быть наиболее rationalной, например, для дорожного катка, когда скорости его при движении вперед-назад одинаковы.

При остановившемся выходном вале 11 абсолютные величины линейных скоростей точек *I* и *H* сателлита 9 равны между собой (отрезок *Б^{*}И* равен отрезку *НП*), а прямая *Б^{*}П* проходит через ось вращения сателлита 9 (точка *O₃*).

$$НП = Б^*И = 1/2\omega m_2 Z_5, \quad (2)$$

где ω – частота вращения входного вала 1, с^{-1} ; m_2 – модуль зацепления шестерен 8...10 планетарной передачи; Z_5 – число зубьев солнечной шестерни 10.

Из условия равных между собой частот вращения входного вала 1 и промежуточного вала 2, когда передаточное число клиноременной передачи равно единице, следует подобие треугольников *ВО₁Ж* и *НО₂П*, а также подобие треугольников *ДО₂И* и *ВО₂Ж*. На основании их подобия, а также уравнения (2) можно записать следующее:

$$\frac{O_2H}{O_2Ж} = \frac{O_2I}{O_2Ж}$$

или

$$\frac{m_2 Z_5}{m_1 Z_1} = \frac{m_2 Z_3}{m_1 Z_2}, \quad (3)$$

где $Z_1 \dots Z_3$, Z_5 – числа зубьев шестерен 6...8, 10 соответственно; m_1 – модуль зацепления шестерен 6, 7; m_2 – модуль зацепления шестерен 8...10.

Следует обратить внимание, что уравнение (3) составлено для разномодульного зацепления шестерен 6, 7 и шестерен 8...10 планетарной передачи. При одномодульном зацеплении уравнение (3) также справедливо.

Выходы

Симметричность диапазона передаточных чисел вариатора не зависит от модулей зацепления зубчатых пар, а зависит от выбранных значений чисел зубьев. Признаком наличия симметричности является остановка выходного вала при передаточном числе клиноременной передачи, равном единице.

Если при соблюдении условия уравнения (3) реверс наступает, когда ведущий и вспомогательный валы вращаются с неодинаковой частотой, это означает, что максимальное i_{\max} и минимальное i_{\min} передаточные числа назначены несоответствующими уравнению (1), что при прочих равных условиях может приводить к увеличению массы и габаритов изделия. Однако такой выбор может быть оправдан конструктивными соображениями.

Рассмотрение несимметричного диапазона передаточных чисел вариатора ставит задачу определения его границ, при выходе за пределы которых эффект реверса пропадает. Это происходит, когда в результате расчета окажется, что диапазон располагается по одну сторону от точки реверса. На плане скоростей эти границы будут находиться в точке B^* , когда ее место займет либо точка B , либо точка E . Причиной будет являться произвольный выбор наибольшего и наименьшего передаточных чисел клиноременной

передачи и чисел зубьев всех шестерен, не удовлетворяющих уравнениям (1), (3) и (4).

Обратимся вновь к плану скоростей для нахождения пределов диапазона передаточных чисел клиноременной передачи, при выходе за которые, как указано выше, пропадает эффект реверса. Точки B и E ограничивают диапазон частот вращения коронной шестерни 8. Найдем координаты этих точек, воспользовавшись параллельностью отрезков $O_2\Pi$ и O_1B , что справедливо при передаточном числе клиноременной передачи, равном единице, а также подобием треугольников AO_2B и BO_2D , BO_2G и DO_2E . Тогда

$$B\dot{J} = H\Pi \cdot m_1 Z_2 / m_2 Z_5;$$

$$H\Pi = 1/2\omega m_2 Z_5, \quad (4)$$

где ω – частота вращения входного вала 1, с^{-1} ; m_1 , m_2 – модули зацепления, мм; Z_2 , Z_5 – числа зубьев шестерен 7, 10.

$$D\dot{I} = B\dot{J} \cdot m_2 Z_3 / m_1 Z_2;$$

$$BI = D\dot{I} \cdot i_{\max}, \quad (5)$$

где i_{\max} – наибольшее выбранное передаточное число клиноременной передачи.

$$EI = D\dot{I} \cdot i_{\min}, \quad (6)$$

где i_{\min} – наименьшее выбранное передаточное число клиноременной передачи.

Условием наличия реверса является

$$BI > B^*I > EI$$

или

$$BI > H\Pi > EI. \quad (7)$$

Расчет и испытание модели пока-

зали, что наиболее приемлемым для практического применения в вариаторах диапазон передаточных чисел клиноременной передачи можно прогнозировать в пределах от 0,7 до 1,4. Это дает возможность использования клиновых ремней с обычным профилем по ГОСТ 12841–89 [4], что позволит снизить затраты на подготовку производства новых ремней для вариатора, имеющих к тому же более высокую нагрузочную способность при прочих равных условиях по сравнению с вариаторными ремнями с профилем по ГОСТ 24848.1–81 [5].

При этом диапазон передаточных чисел вариатора может достигать значений от нуля до нескольких сотен и тысяч в обе стороны вращения выходного вала 11.

Перейдем к рассмотрению второго эффекта.

На рис. 2 изображен эксперимен-

тально установленный вид функции, определяющей зависимость крутящих моментов M_{kp} и $-M_{kp}$ на выходном валу 11 вариатора от передаточных чисел $i_{вых-1}$ и $-i_{вых-1}$. Этот вид согласуется с золотым правилом механики: чем больше передаточное число, тем меньше скорость, но больше крутящий момент. Область, ограниченная точками T и Φ , это область резкого снижения абсолютной величины крутящих моментов M_{kp} и $-M_{kp}$ до нуля в точке O_4 реверса. В самом деле, остановившийся и незаторможенный вал не может находиться под воздействием крутящего момента. Однако в области передаточных чисел вариатора, находящихся за пределами указанной области (левее точки Φ и правее точки T), наблюдается рост абсолютных значений крутящих моментов M_{kp} и $-M_{kp}$ по мере уменьшения частоты вращения выходного вала 11.

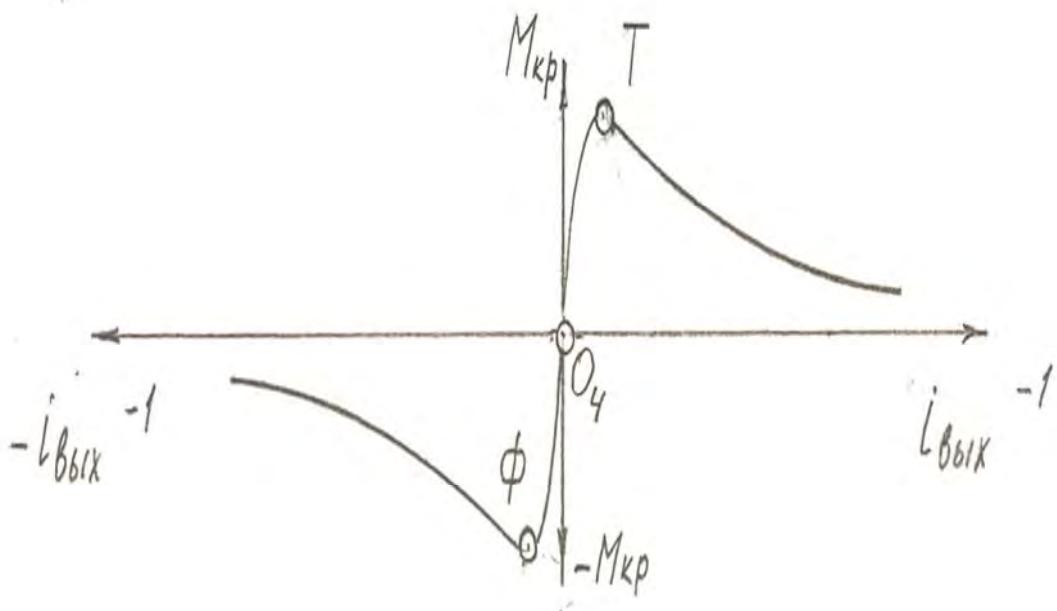


Рис. 2. Вид функции крутящих моментов M_{kp} и $-M_{kp}$ на выходном валу

При испытании модели в области передаточных чисел (между точками T и Φ), близких к точке O_4 реверса,

наблюдалось проскальзывание ремня в шкивах клиноременной передачи. Это предварительно можно объяснить вы-

нужденным использованием в качестве ремня резинового кольца. Эксперимент осложнился тем, что стандартные клиновые ремни слишком длинные для небольшой настольной модели. Не найдя ничего более подходящего, в качестве клинового ремня было использовано небольшое резиновое кольцо круглого сечения по ГОСТ 9833–73 [6]. Компактная конструкция модели была разработана под это кольцо. Ранее проект под самый короткий ремень по ГОСТ 1284.1–89 [4] оказался бы «в металле» громоздким, тяжелым и дорогим. Проскальзывание удалось значительно уменьшить конструктивным усовершенствованием шкива [7]. Положительным качеством отсутствия крутящего момента на выходном валу 11 в точке реверса (точка O_3) является возможность остановки без выжимания сцепления, что упрощает управление автомобилем.

Для улучшения точности эксперимента и определения границ интервала между точками T и Φ , не оказывающего существенного влияния на качество управления автомобилем, необходимо решить задачу изготовления более короткого клинового ремня 5. Пока удовлетворительного решения этой задачи у авторов нет. Изготовленный из укороченного стандартного ремня «кустарным» способом склеивания ремень не может быть достаточно надежным и нести приемлемую нагрузку. Поиск продолжается.

Заключение

1. Использование описанных эффектов остановки и реверса выходного вала при постоянном одностороннем вращении входного вала, а также управляемого в широких пределах бесступенчатого диапазона изменения передаточных чисел вариатора, позволяет значительно ускорить маневрирование транспортных средств вперед-назад, в первую очередь автомобилей, в тяжелых и экстремальных условиях.

2. Сравнительно простая конструкция вариатора позволит коренным образом упростить его производство и обслуживание, производить ремонт даже в полевых условиях.

3. Вариатор позволит снизить расход топлива при частых остановках и разгоне (городской общественный транспорт), периодической смене направления движения в стесненных условиях (парковка, строительные объекты, ремонтные зоны, шахта), что равносильно улучшению коэффициента полезного действия трансмиссии.

4. Для движения в постоянном режиме по магистрали конструкция вариатора допускает встраивание блокировки клиноременной передачи. При этом входной момент передается от входного вала 1 на выходной вал 11 напрямую через планетарный механизм, что также положительно сказывается на экономичности его использования на транспортных средствах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. URL: <https://www.yandex.by/searx/?text=КамАЗ+5490&lr=158>.
2. URL: <https://www.yandex.by/search/?text>.
3. Патент BY № 22875, МПК F 16H 3/44 (2006.01). Вариатор : № a20170057 : заявлено 22.02.2017 : опубл. 30.10.2018 / Хальпуков В. В., Андреев С. И. ; заявители : Хальпуков В. В., Андреев С. И. – 3 с.
4. Ремни приводные клиновые нормальных сечений : ГОСТ 1284.1–89. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 11 с.
5. Ремни клиновые вариаторные для промышленного оборудования : ГОСТ 24848.1–81. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 16 с.
6. Кольца резиновые уплотнительные круглого сечения для гидравлических и пневматических устройств. Конструкция и размеры : ГОСТ 9833–73. – М. : Изд-во стандартов, 1998. – 62 с.

7. Патент BY № 23842, МПК F 16H 55/49, F 16H 7/02 (2006.01). Шкив клиноременной передачи : № a20200333 : заявлено 26.11.2020 : опубл. 30.06.2022 / Хальпуков В. В., Андреев С. И. ; заявители : Хальпуков В. В., Андреев С. И. – 3 с.

Статья сдана в редакцию 29 сентября 2025 года

Контакты:

V.halpukovO@gmail.com (Хальпуков Владимир Викторович);
V.halpukovO@gmail.com (Андреев Сергей Иванович).

V. V. KHALPUKOV, S. I. ANDREEV

REVERSIBLE PLANETARY VARIATOR

Abstract

The paper considers a variator consisting of a planetary gear mechanism and conventional V-belt variator linking the ring and sun gears. It makes it possible to obtain a virtually unlimited, stepless range of variator gear ratios, including a complete stop and reverse operation of the output shaft with constant unidirectional rotation of the input shaft.

Keywords:

V-belt variator, planetary gear mechanism, stopping, reverse.

For citation:

Khalpukov, V. V. Reversible planetary variator / V. V. Khalpukov, S. I. Andreev // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2025. – № 4 (89). – P. 52–58.