

УДК 621.833

**П. Н. Громько**<sup>1</sup>, доктор технических наук, профессор,  
**С. Н. Хатетовский**<sup>1</sup>, кандидат технических наук, доцент,  
**Д. Ю. Макацария**<sup>2</sup>, кандидат технических наук, доцент,  
**А. С. Макаревич**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет», пр-т Мира, 43, 212000 Могилев, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Учреждение образования «Могилевский институт Министерства внутренних дел Республики Беларусь»,  
ул. Крупской, 67, 212011 Могилев, Республика Беларусь, grom7@tut.by

### **ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ САТЕЛЛИТА ПРИ РАБОТЕ ЭКСЦЕНТРИКОВОЙ ПЕРЕДАЧИ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ВХОДНОГО И ВЫХОДНОГО ВАЛОВ**

В статье показана структурная схема эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов. Рассмотрен случай, когда ее работоспособность теряется при определенном значении угла поворота входного вала. Аналитические исследования показали, что обеспечение поступательного движения сателлита при работе эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов возможно только при наличии дополнительного кривошипа, причем данный дополнительный кривошип должен составлять с сателлитом вращательную пару, а его ось вращения должна быть параллельна оси вращения основного кривошипа. Следует также отметить, что параметры эксцентрика нового дополнительного кривошипа должны соответствовать параметрам эксцентрика основного кривошипа.

Исследования, проведенные с использованием компьютерного моделирования, показали, что эксцентриковые передачи с параллельным расположением входного и выходного валов имеют уровень основных эксплуатационных показателей, аналогичный эксцентриковым передачам с соосным расположением входного и выходного валов.

**Ключевые слова:** дополнительный кривошип; компьютерное моделирование; параллельное расположение входного и выходных валов; поступательное движение сателлита; работоспособность; угол поворота; эксцентриковая передача.

Рис. 10. Библиогр.: 8 назв.

**P. N. Gromyko**<sup>1</sup>, DSc in Technical Sciences, Professor,  
**S. N. Khatetovsky**<sup>1</sup>, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
**D. Yu. Makatsaryia**<sup>2</sup>, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
**A. S. Makarevich**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Interstate Educational Institution of Higher Education “Belarusian-Russian University”, 43 Mira Ave.,  
212000 Mogilev, the Republic of Belarus

<sup>2</sup>Educational Institution “Mogilev Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Belarus”,  
67 Krupskoj Str., 212011 Mogilev, the Republic of Belarus, grom7@tut.by

### **PROVISION OF THE SATELLITE TRANSLATIONAL MOTION DURING THE OPERATION OF ECCENTRIC TRANSMISSION WITH PARALLEL ARRANGEMENT OF INPUT AND OUTPUT SHAFTS**

The article shows a block diagram of eccentric transmission with parallel arrangement of input and output shafts. The case when its operability is lost at a certain value of the angle of rotation of the input shaft is considered. Analytical studies have shown that the provision of translational motion of the satellite during the operation of an eccentric trans-

mission with a parallel arrangement of the input and output shafts is possible only if there is an additional crank. Besides, this additional crank must make a rotating pair with the satellite, and its axis of rotation must be parallel to the axis of the main crank rotation. It should also be noted that the eccentric parameters of the new additional crank must correspond to the eccentric parameters of the main crank.

Studies conducted using computer simulations have shown that eccentric transmissions with parallel arrangement of input and output shafts have a level of basic performance similar to eccentric transmissions with coaxial arrangement of input and output shafts.

**Key words:** additional crank; computer modeling; parallel arrangement of input and output shafts; translational satellite motion; operability; rotation angle; eccentric transmission.

Fig. 10. Ref.: 8 titles.

**Введение.** Передачи с параллельным расположением входного и выходного валов (ременные, цепные) известны давно [1; 2]. Отличительной особенностью рассматриваемого варианта эксцентриковой передачи является возможность трансформировать вращение с относительно большими по величине значениями коэффициента редуцирования за счет осуществления жестких конструкций сопрягаемых звеньев. Структурные схемы эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов предложены в работах [3; 4].

При обеспечении поступательного движения сателлита в процессе работы эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов возникает случай, когда ее работоспособность теряется в определенный момент. В целях осуществления функционирования эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов предложена конструкция с дополнительным новым кривошипом, позволяющим устранить функционирование передачи в критическом ее состоянии.

На основе приведенных аналитических выражений, а также разработанной компьютерной модели предлагаемого варианта эксцентриковой передачи было сделано заключение об ее полной работоспособности при осуществлении поступательного движения сателлита.

Разработанная эксцентриковая передача с параллельным расположением входного и выходного валов благодаря конструкции, включающей дополнительный кривошип, имеет основные эксплуатационные показатели на уровне эксцентриковой передачи с соосным расположением указанных валов и может быть использована во многих отраслях народного хозяйства.

**Материалы и методы исследования.** *Методы исследования структурной схемы эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов без дополнительного кривошипа.* Рассмотрим представленный на рисунке 1 базовый вариант эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов без дополнительного кривошипа [5].

Планетарная эксцентриковая передача содержит корпус 1, основной кривошип 2, размещенный на входном валу 3 и приводящийся во вращение двигателем 4, дополнительный кривошип 5 с осью вращения 15, которая параллельна оси вращения основного кривошипа 2. На выходном валу 8 эксцентриковой передачи закреплено центральное колесо 12 с внутренним зубчатым венцом, которое входит в зацепление с наружным зубчатым венцом 14. Зубчатый венец 14 расположен на сателлите 7, который совершает поступательное движение за счет наличия двух вращательных пар, соединяющих отверстия сателлита 7 с основным 2 и дополнительным 5 кривошипами.

В основном кривошипе 2 и в дополнительном кривошипе 5 возникают опорные реакции  $R_A$  и  $R_B$ , которые можно разложить на составляющие вдоль осей  $X$  и  $Y$ , т. е.  $R_{Ax}$ ,  $R_{Ay}$ ,  $R_{Bx}$  и  $R_{By}$ . Следует отметить, что составляющие опорных реакций  $R_{Ax}$ ,  $R_{Ay}$  определяются по моменту  $M_{вх}$  двигателя 4, приводящего в движение входной вал 3. Для получения реакций  $R_{Bx}$ ,  $R_{By}$  необходимо знать величину и направление активной силы  $N_k$ , создаваемой зубчатыми колесами 14 и 12 данной передачи.

На рисунке 2 изображен сателлит 7 при положении эксцентрика основного кривошипа  $A_1A_2$  под углом  $\beta$  к оси  $A_1Y$ .

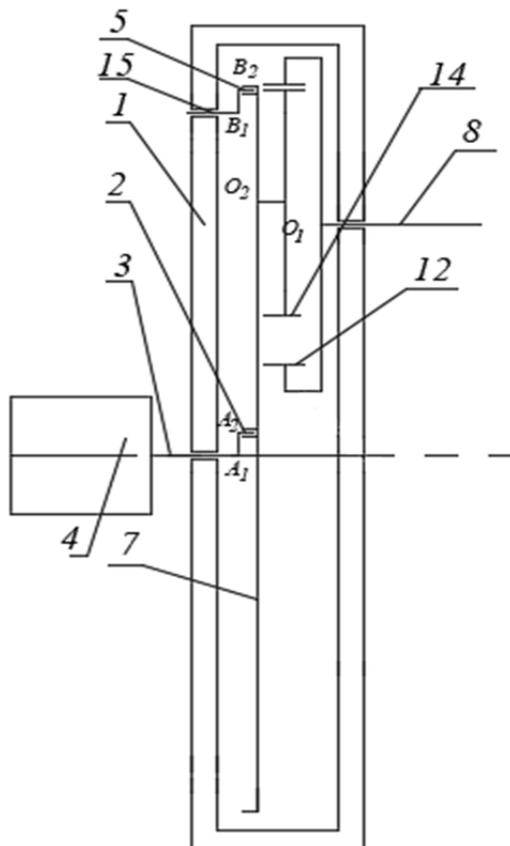


Рисунок 1. — Структурная схема эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов

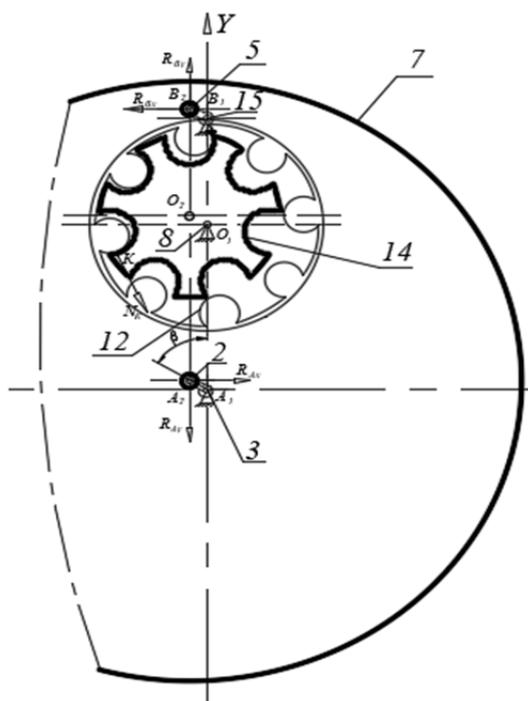


Рисунок 2. — Структурная схема сателлита 7 эксцентриковой передачи при расположении эксцентрика основного кривошипа  $A_1A_2$  под углом  $\beta$  к оси  $A_1Y$

Значение общей реакции  $R_{B2}$ , полученной из составляющих ее реакций  $R_{Bx}$ ,  $R_{By}$ , определяется исходя из известных уравнений статики по известной активной силе  $N_k$  [6]:

$$R_{B2} = \frac{M_{вх}(r_{Ky} - e \cos \beta)z}{\sqrt{e^2 + (r_{Ky} - e \cos \beta)^2 + 2e(r_{Ky} - e \cos \beta) \cos \left( \beta + \frac{\beta}{z} \right)}} \times \frac{(f_{трC2} \sin \alpha + \cos \alpha)}{\left( f_{трM2} \sin \left( \alpha + \arcsin \frac{e \sin \beta}{(r_{Ky} - e \cos \beta)} \right) + \cos \left( \alpha + \arcsin \frac{e \sin \beta}{(r_{Ky} - e \cos \beta)} \right) \right)} r_B (\sin \beta + f_{трB2} \cos \beta), \tag{1}$$

- где  $R_B$  — нормальная составляющая реакции в точке  $B$ ;  
 $M_{вх}$  — входной момент эксцентриковой передачи;  
 $r_{Ky}$  — проекция вектора от точки  $K$  к точке  $A_1$  на ось  $OY$ ;  
 $e$  — эксцентриситет, равный длине  $A_1A_2$ ;  
 $\beta$  — угол поворота кривошипа  $A_1A_2$ ;  
 $z$  — число зубьев сателлита;  
 $f_{трC2}$  — коэффициент трения в точке  $C_2$ ;  
 $\alpha$  — угол поворота  $N_k$  относительно вертикальной оси;  
 $r_B$  — расстояние, определяющее длину  $A_2B_2$ ;  
 $f_{трB2}$  — коэффициент трения в точке  $B_2$  [6].

На основе уравнения (1) построен график изменения значения реакции  $R_{B2}$ , в зависимости угла поворота кривошипа  $A_1A_2$  (рисунок 3).

Используя полученную графическую зависимость значения реакции  $R_{B2}$ , можно заметить, что при углах, определяющих положение эксцентрика  $A_1A_2$  основного кривошипа 2 к оси  $A_1Y$ , равных 0 и 180°, значение реакций  $R_{B2}$  изменяется и возрастает до значения 10 000 Н.

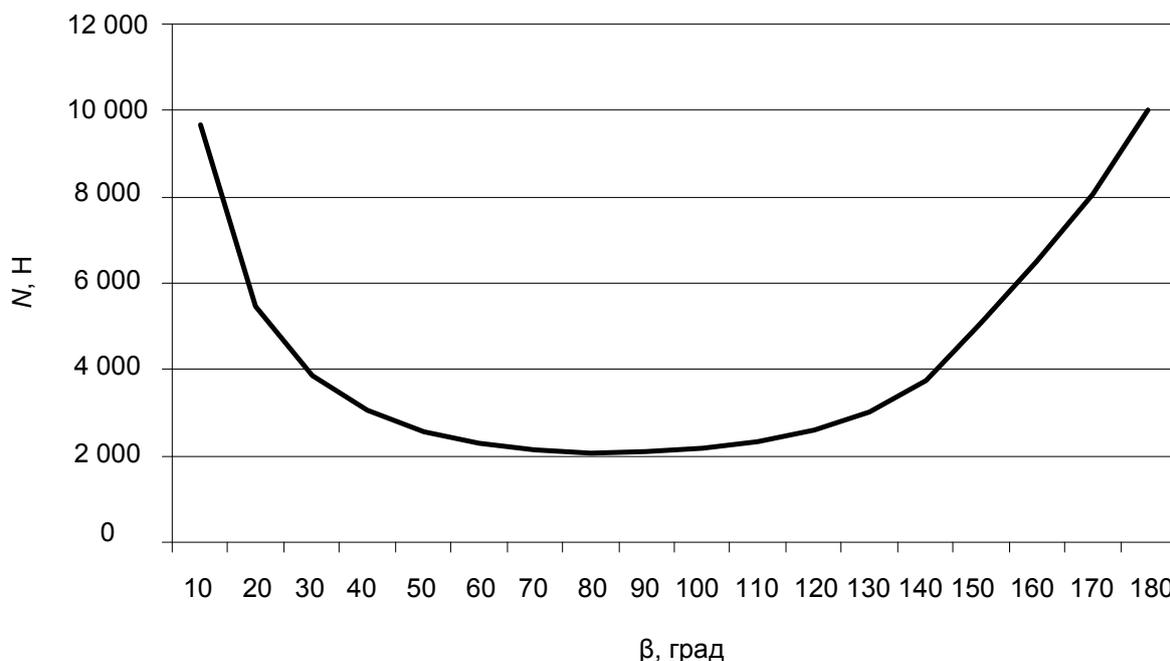


Рисунок 3. — Зависимость изменения значения реакции  $R_{B2}$  от угла  $\beta$  поворота кривошипа  $A_1A_2$

Если угол  $\beta$ , определяющий положение эксцентрика  $A_1A_2$  основного кривошипа 2, будет равен  $0^\circ$  (или же  $180^\circ$ ), то вертикальная составляющая реакции  $R_{By}$  в точке  $B_2$  будет отсутствовать (рисунок 4, а), т. е. в тот момент времени, когда эксцентриситет  $A_1A_2$  основного кривошипа 2 расположен вдоль оси  $A_1Y$ , в точке  $B_2$  вертикальная составляющая реакции  $R_{By}$  при изменении своего знака с плюса на минус должна быть равна нулю.

Для работы эксцентриковой передачи в этом случае сателлит 7 должен под действием активной силы  $N_K$  повернуться в обратном направлении своего движения (см. рисунок 4, б). При обратном повороте сателлита 7 в точке  $B_2$  дополнительно к опорной реакции  $R_{Bx}$  снова добавляется опорная реакция  $R_{By}$ .

Таким образом, при заданном вращении эксцентрика основного кривошипа  $A_1A_2$  сателлит 7 не совершает поступательного движения, т. е. эксцентриковая передача неработоспособна в момент времени, когда угол  $\beta$ , определяющий положение эксцентрика  $A_1A_2$  основного кривошипа 2 к оси  $A_1Y$ , будет равен  $0^\circ$  (или же  $180^\circ$ ). В данном случае механизм параллельных кривошипов, состоящий из сателлита 7 с кривошипами 2 и 5, находится в так называемой мертвой зоне.

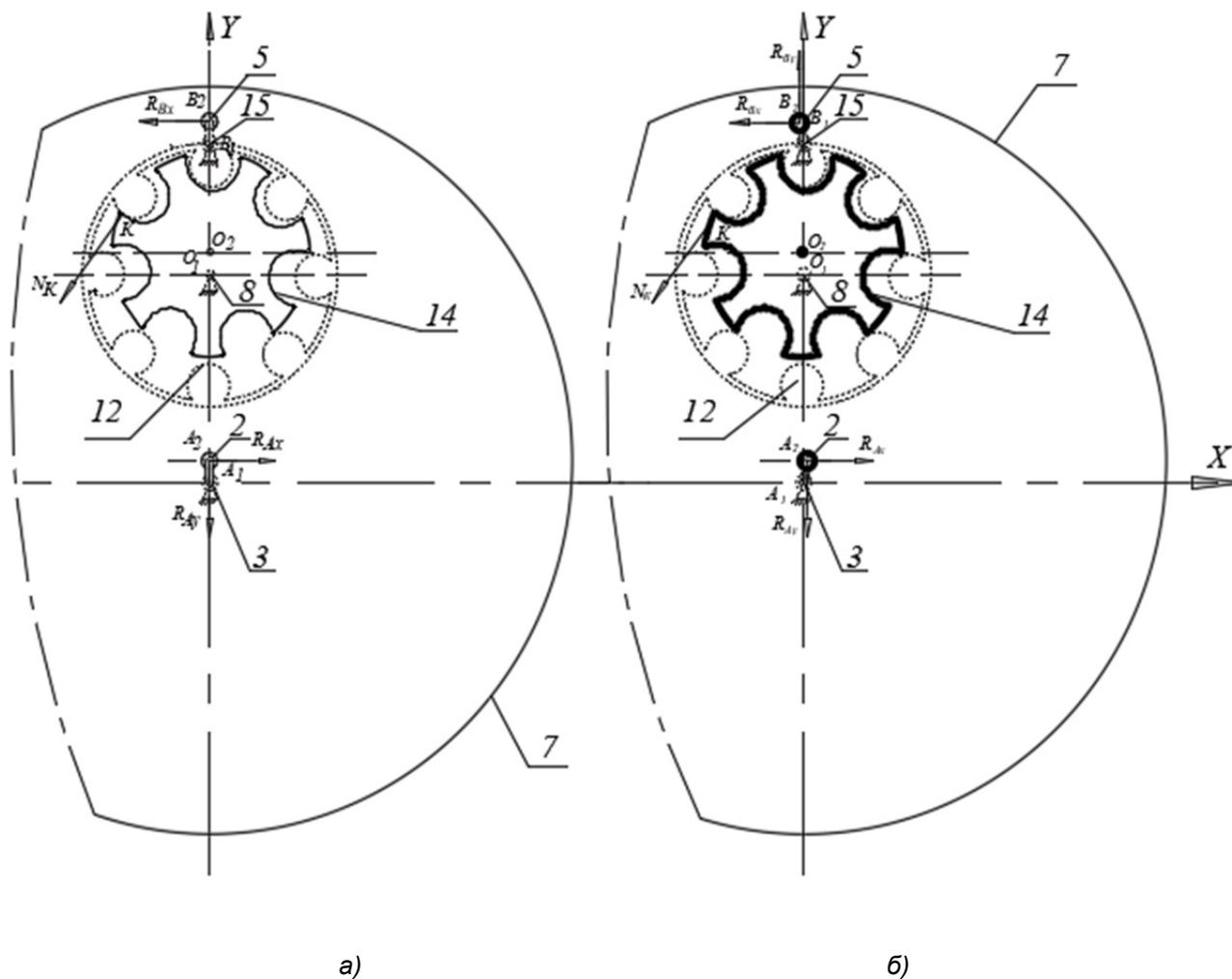


Рисунок 4. — Структурная схема сателлита 7 эксцентриковой передачи при расположении эксцентрика основного кривошипа  $A_1A_2$  под углами  $\beta$  к оси  $A_1Y$ : а — при  $\beta = 0$ ; б — при  $\beta$ , близком к нулевому значению

**Методы исследования структурной схемы эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов при наличии дополнительного кривошипа.** Чтобы осуществлялась нормальная работа эксцентриковой передачи при углах  $\beta$ , равных 0 или  $180^\circ$ , необходимо дополнить эксцентриковую передачу как минимум еще одним новым дополнительным кривошипом 6 (рисунок 5) [3].

Важно, чтобы ось вращения 16 не находилась в плоскости, проходящей через ось вращения 3 и ось вращения 15. Причем новый дополнительный кривошип 6 должен составлять с сателлитом 7 вращательную пару  $C_2$ . Ось вращения нового дополнительного кривошипа 6 должна быть параллельна оси вращения основного кривошипа 2. Следует также отметить, что параметры эксцентрика  $C_1C_2$  нового дополнительного кривошипа 6 должны равняться параметрам эксцентрика основного кривошипа  $A_1A_2$ .

На рисунке 6, а, видно, что наличие нового дополнительного кривошипа 6 в случае поворота основного кривошипа 2 на угол  $\beta$ , который не отличается от углов 0 или  $180^\circ$ , позволяет дополнительно разгружать опоры как дополнительного 5, так и нового дополнительного 6 кривошипов, что способствует нормальной работе эксцентриковой передачи.

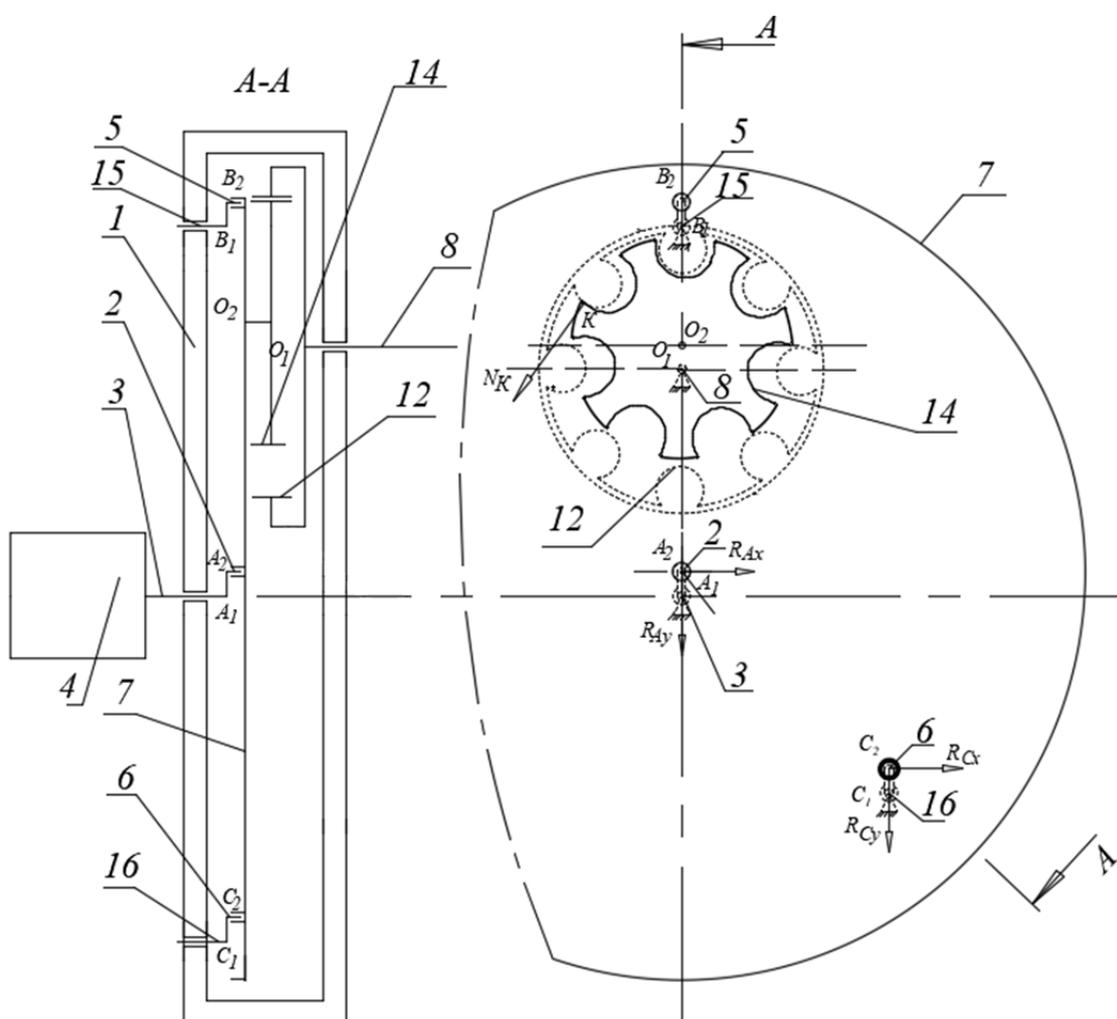


Рисунок 5. — Структурная схема эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов с новым дополнительным кривошипным валом 6

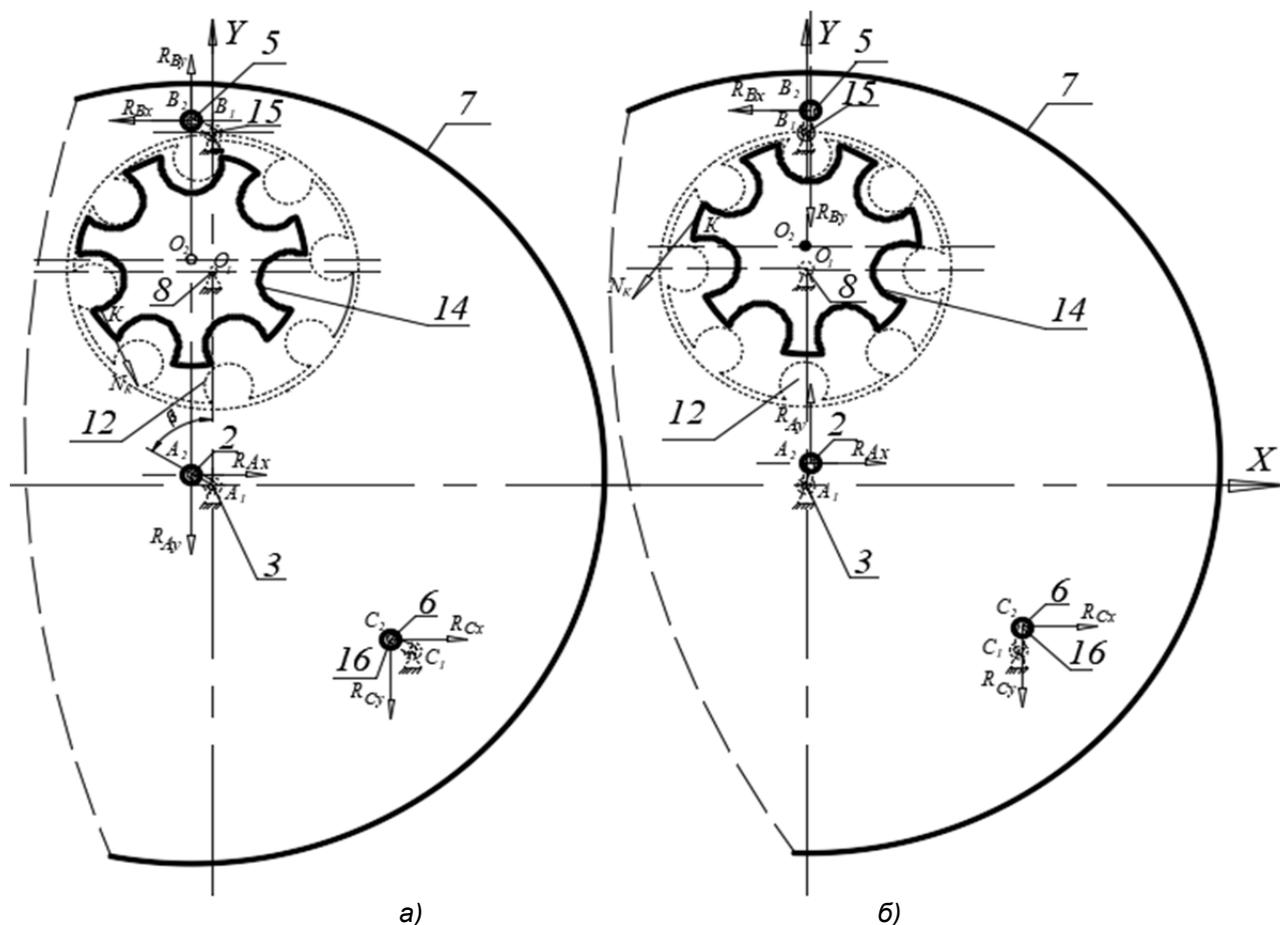


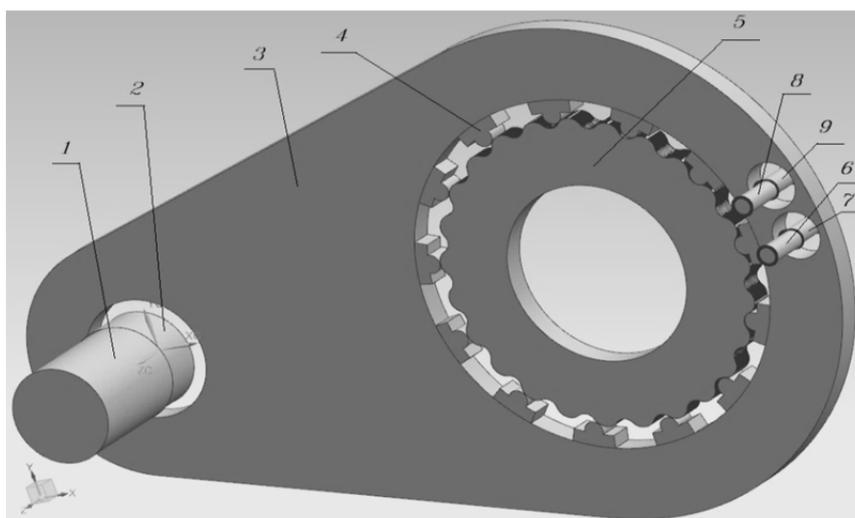
Рисунок 6. — Вариант эксцентриковой передачи с новым дополнительным кривошипным валом 6: а — при расположении эксцентрика основного кривошипа  $A_1A_2$  под углом  $\beta$  к оси  $A_1Y$ ; б — нормальная работа эксцентриковой передачи при плоскопараллельном движении сателлита 7 в направлении движения основного эксцентрика  $A_1A_2$

В случае, когда поворот основного кривошипа 2 будет осуществлен на угол  $\beta$ , равный углу  $0^\circ$  (или же  $180^\circ$ ), несмотря на то, что вертикальная составляющая реакции  $R_{By}$  в точке  $B_2$  дополнительного кривошипа 5 равна нулю, благодаря новому дополнительному кривошипу 6 сателлит 7 продолжит совершать плоскопараллельное движение (см. рисунок 6, б). Плоскопараллельное движение сателлита 7 не изменится, если все параллельные эксцентрики основного 2, дополнительного 5 и нового дополнительного кривошипов 6 совершат поворот на определенный угол относительно начального своего положения.

Следовательно, наличие как минимум одного нового дополнительного кривошипа 6 делает эксцентриковую передачу работоспособной по сравнению с первоначальным вариантом данной эксцентриковой передачи.

**Результаты исследования и их обсуждение. Результаты исследований основных показателей эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов на основе компьютерных исследований.** Для проведения анализа поступательного движения сателлита была разработана компьютерная модель эксцентриковой передачи (рисунок 7).

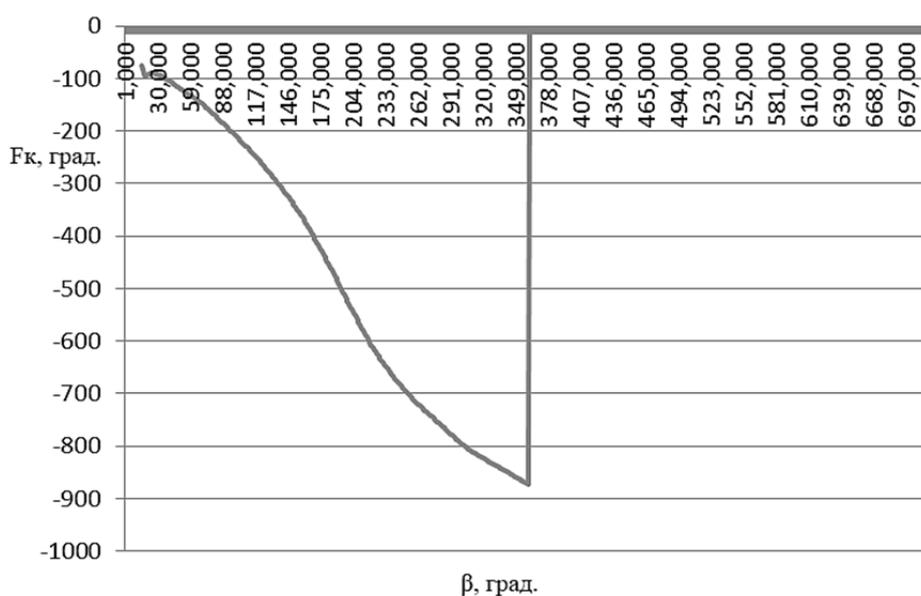
При вращении входного вала 1 с кривошипом 2 сателлит 3 за счет пары вращения между поверхностью кривошипа 2 и поверхностью отверстия сателлита 3 совершает поступательное движение. На сателлите 3 имеется еще один внутренний зубчатый венец 4, который контактирует с наружными зубьями центрального колеса 5. Для создания необходимого поступательного движения сателлита 3 предусмотрены дополнительные кривошипы 7 и 9, вращающиеся на валах 6 и 8.



**Рисунок 7. — Компьютерная модель эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов с дополнительными кривошипами 7 и 9, вращающимися на валах 6 и 8**

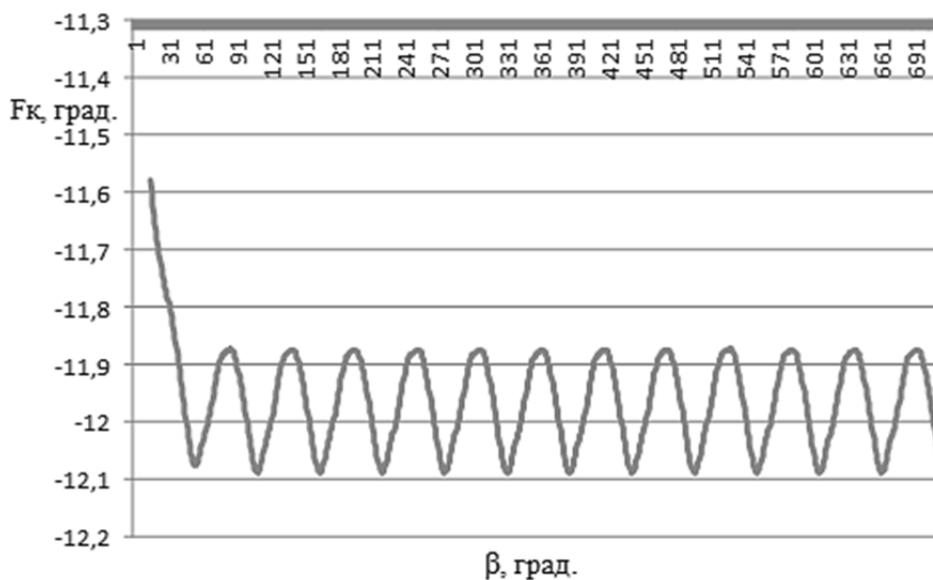
Методика исследований эксцентриковых передач методами компьютерного моделирования рассмотрена в работе [7]. В целях определения параметров движения спутника 3 была построена компьютерная модель.

В случае, когда связь между узлом вращения с дополнительным эксцентриком 9 и отверстием спутника 3 не учитывается, в результате моделирования был построен график, показанный на рисунке 8. В данной компьютерной модели использовался вариант эксцентриковой передачи, рассмотренный на рисунках 1, 2. Результаты, отраженные на графике (см. рисунок 8), показывают изменение кинематической погрешности вращения выходного звена 5 от угла поворота входного вала 1. Данные результаты позволили сделать вывод о том, что при отсутствии дополнительного эксцентрика 9 наблюдается резкое изменение значения кинематической погрешности выходного звена 5, а затем ее заклинивание. Это подтверждает, что данный вариант эксцентриковой передачи неработоспособен.

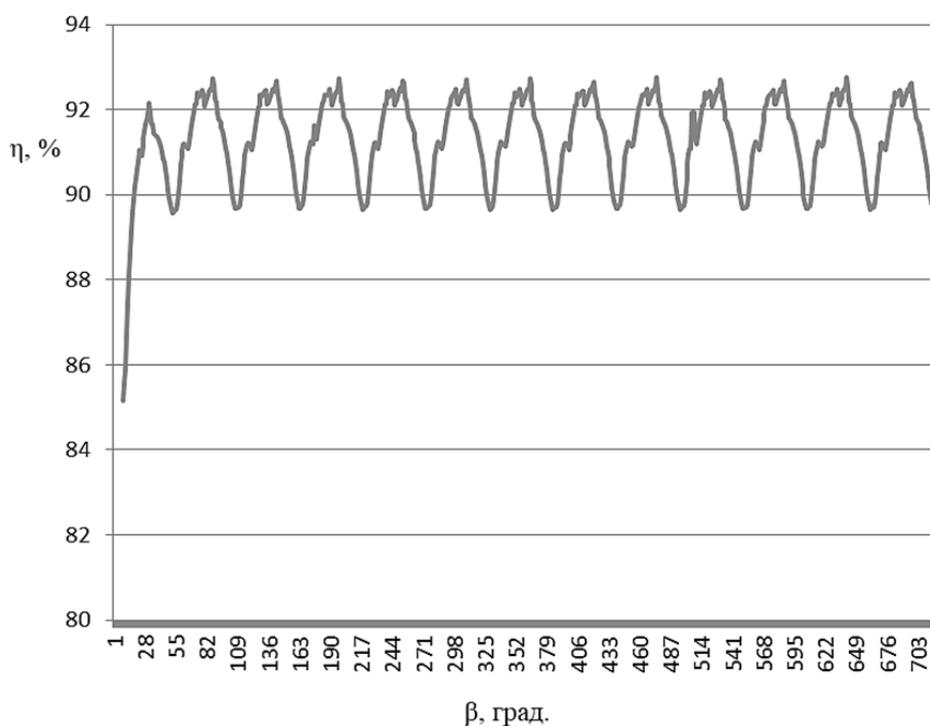


**Рисунок 8. — Кинематическая погрешность выходного звена 5 от поворота входного вала при отсутствии связи между узлом вращения с дополнительным эксцентриком 9 и отверстием спутника 3**

В случае работы эксцентриковой передачи, имеющей новый дополнительный эксцентрик 9, получены графики, изображенные на рисунках 9, 10. В данном случае рассматривается вариант эксцентриковой передачи, показанной на рисунках 5, 6, в котором дополнительно включен новый дополнительный эксцентрик 9 с осью вращения 8.



**Рисунок 9.** — Кинематическая погрешность выходного звена 5 от поворота входного вала при наличии связи между узлом вращения с дополнительным эксцентриком 9 и отверстием сателлита 3



**Рисунок 10.** — Зависимость КПД от угла поворота выходного звена 5 при наличии связи между узлом вращения с дополнительным эксцентриком 9 и отверстием сателлита 3

Анализ вышеприведенных графических зависимостей позволяет заключить, что кинематическая точность вращения зубчатого колеса 5 находится в диапазоне от 11,7 до 12,1 угловых минут. Колебания КПД эксцентриковой передачи находятся на уровне от 88,9 до 93,0 %. Это говорит о том, что эксцентриковые передачи с параллельным расположением входного и выходного валов имеют уровень технических показателей, аналогичный эксцентриковым передачам с соосным расположением входного и выходного валов [8].

**Заключение.** Обеспечение поступательного движения сателлита при работе эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов возможно только при наличии нового дополнительного кривошипа.

Эксцентриковые передачи с параллельным расположением входного и выходного валов имеют уровень технических показателей, аналогичный эксцентриковым передачам с соосным расположением входного и выходного валов.

С учетом многообразия приводных устройств немаловажным является расширение ассортимента общемашиностроительных редукторных механизмов, способных удовлетворять широкому выбору компоновочных и эксплуатационных показателей за счет использования изделий, имеющих конструкцию предлагаемого типа.

#### Список цитированных источников

1. Олофинская, В. П. Детали машин. Основы теории, расчета и конструирования : учеб. пособие / В. П. Олофинская. — М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2017. — 72 с.
2. Иванов, М. Н. Детали машин : учеб. для академ. бакалавриата / М. Н. Иванов, В. А. Финогенов. — 16-е изд., испр. и доп. — М. : Юрайт, 2018. — 409 с.
3. Планетарная эксцентриковая передача : заявка 20190289 Респ. Беларусь : МПК F16H1/32 / П. Н. Громыко, С. Д. Макаревич, А. С. Макаревич ; дата публ.: 18.11.2019.
4. Макаревич, А. С. Передачи эксцентрикового типа с параллельным расположением входного и выходного валов / А. С. Макаревич, П. Н. Громыко // материалы 55-й студ. науч.-техн. конф., 3—4 мая 2019 г. — Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2019. — С. 150.
5. Планетарная передача : а. с. 1778392 СССР : МКИЗ F16H1/32 / Г. П. Большаков ; № 4767192/28 ; дата публ.: 30.11.1992.
6. Громыко, П. Н. Силовой анализ контактирующих зубьев эксцентриковой передачи, формообразованных на основе использования удлиненной эпициклоиды / П. Н. Громыко, Д. Ю. Макацария, Р. А. Бондарев // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. — 2021. — № 3. — С. 5—13.
7. Компьютерное моделирование планетарных прецессионных передач : монография / П. Н. Громыко [и др.] ; под общ. ред. П. Н. Громыко. — Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2007. — 271 с.
8. Громыко, П. Н. Совершенствование механизма передачи движения на выходное звено в эксцентриковых передачах типа К-Н-V / П. Н. Громыко, С. Н. Хатетовский, Д. Ю. Макацария // Гор. механика и машиностроение. — 2021. — № 2. — С. 27—33.

Поступила в редакцию 28.02.2022.