

ренном диапазоне скоростей сдвига при разных напряженностях электрического поля. Таким образом, устанавливается еще одна аналогия с родственным магнитореологическим эффектом, в котором нагрев ферросуспензии в магнитном поле также ослабляет нелинейный фактор.

## ЛИТЕРАТУРА

1. З.П.Шульман, В.М.Носов. Вращение непроводящих тел в электрореологических суспензиях.—Мн.:Наука и техника, 1985.—112 с. 2. Z.P.Shulman and V.M.Nosov. Rotation of the Axisymmetric Bodies in Electrorheological Suspensions, in Proceedings of the 5<sup>TH</sup> International Conference Electro-Rheological Fluids, Magneto-Rheological Suspensions and Associated Technology.- Sheffield, 1995.- P. 72–84. 3. Z.P.Shulman and V.M.Nosov. Rotation of the Axisymmetric Bodies in Electrorheological Suspensions (ERS), in International Journal of Modern Physics B.- 1996.- Vol. 10.- № 23 & 24.- P. 2903–2915. 4. Носов В.М. Влияние момента сопротивления на механические характеристики вращения непроводящих тел в электрореологических суспензиях//Машиностроение.-Мн.,2000.-Вып. 16.-С. 263-266.

УДК 621.83.06

**М.Ф. Пашкевич, В.М. Пашкевич, А.М. Пашкевич, С.А. Жигунов**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПЛАНЕТАРНОЙ РАДИАЛЬНО-ПЛУНЖЕРНОЙ ПЕРЕДАЧИ**

*Могилевский государственный технический университет  
Могилев, Беларусь*

Ранее [1] была решена задача математического моделирования работы радиально-плунжерной передачи с идеальными параметрами зацепляющихся деталей (без погрешностей изготовления) и определенными их действительными значениями, характеризующимися погрешностями изготовления. Эта задача была решена для передачи, выполненной в соответствии с шестой кинематической схемой передач первого класса [2].

Математическая модель работы передачи представляет собой совокупность уравнений, связывающих углы поворота ведущего вала с действительными значениями углов поворота ведомого вала. Поэтому определить кинематическую погрешность передачи можно на основе анализа математической модели, в которой кинематическая погрешность определяется отклонением фактического (или действительного) угла поворота ее ведомого вала от номинального, соответствующего равным уг-

лам поворота ведущего вала. Эта погрешность измеряется в пределах одного полного оборота ведомого вала. В идеально точной передаче равным углам поворота ведущего вала соответствуют строго одинаковые углы поворота ведомого вала.

Математическая модель работы идеальной радиально-плунжерной передачи представляется уравнениями (в полярной системе координат):

$$\rho_{1i} = \sqrt{r^2 - e^2 \sin^2 \varphi_{2i}} + e \cos \varphi_{1i} + L; \quad (1)$$

$$\rho_{2i} = \sqrt{r^2 - e^2 \sin^2 (m\varphi_{2i})} + e \cos(m\varphi_{2i}) + L; \quad (2)$$

$$\varphi_{1i} = \varphi_{и} + \alpha; \quad (3)$$

$$\varphi_{2i} = \varphi_{и} + \alpha / m, \quad (4)$$

$$\varphi_{и} = 2\pi i / (m + 1), \quad (5)$$

где  $r$  – радиус эксцентрика;  $e$  – эксцентриситет;  $L$  – длина плунжера;  $m$  – число периодов профиля центрального колеса (многопериодного кулачка);  $\varphi_{и}$  – начальный угловой параметр точки соприкосновения  $i$ -го плунжера с периодическим профилем центрального колеса,  $\alpha$  – текущий угол поворота эксцентрика, изменяющийся от 0 до  $2\pi$ ;  $i = 0, 1, 2, 3, \dots$ ,  $m$  – порядковый номер плунжера;  $\rho_{1i}$  и  $\rho_{2i}$  – радиусы-векторы точки соприкосновения  $i$ -го плунжера с периодическим профилем центрального колеса, определяемые в системах координат ведущего звена-эксцентрика и неподвижного центрального колеса соответственно;  $\varphi_{1i}$  и  $\varphi_{2i}$  – номинальные значения угловых параметров  $i$ -го плунжера.

Изменяя угол  $\alpha$  от 0 до  $2\pi$ , можно получить по (1)...(4) совокупность значений полярных координат плунжеров в различных их положениях относительно начального положения, определяемого соотношением (5).

Математическая модель реальной передачи может быть получена путем включения в уравнения математической модели идеальной передачи соответствующих погрешностей, которые имеют место при изготовлении деталей и которые вызывают неравномерность вращения ведомого звена при равномерном вращении ведущего звена, т.е. кинематическую погрешность передачи.

Анализ показывает, что на кинематическую погрешность передачи наиболее сильное влияние оказывают погрешность радиуса эксцентрика  $\delta_1$ , погрешность длин плунжеров  $\delta_2$ , погрешность эксцентриситета эксцентрика  $\delta_3$ , смещение оси вращения ведущего вала  $\delta_4$  относительно центральной оси заторможенного кулачка, смещение оси вращения ведомого вала  $\delta_5$  (сепаратора) относительно центральной оси заторможенного кулачка, а также погрешности  $\Delta\varphi$  углового шага прорезей сепаратора и углового шага периодического профиля заторможенного кулачка.

При анализе математической модели будем рассматривать каждую элементарную погрешность в отдельности, вне ее связи с другими погрешностями. Другие детали будем считать изготовленными идеально точно.

Погрешность  $\delta_1$  можно учесть при помощи уравнения (1), которое с учетом этой погрешности будет определять действительные значения радиусов-векторов точек соприкосновения плунжеров с периодическим профилем заторможенного кулачка, т.е.

$$\rho_{1i0} = \sqrt{(r^2 + \delta)^2 - e^2 \sin^2 \varphi_{1iH}} + e \cos \varphi_{1iH} + L. \quad (6)$$

Погрешность длин плунжеров  $\delta_2$  в математической модели передачи также учитываются при помощи уравнения (1), которое в этом случае приводится к следующему виду:

$$\rho_{1i0} = \sqrt{r^2 - e^2 \sin^2 \varphi_{1iH}} + e \cos \varphi_{1iH} + L \pm \delta_2. \quad (7)$$

Погрешность эксцентриситета эксцентрика  $\delta_3$  также приводит к изменению действительных значений радиусов-векторов  $\rho_{1i0}$ :

$$\rho_{1i0} = \sqrt{r^2 - (e + \delta_3)^2 \sin^2 \varphi_{1iH}} + (e + \delta_3) \cos \varphi_{1iH} + L. \quad (8)$$

Смещение оси вращения ведущего вала на величину погрешности  $\delta_4$  приводит к смещению окружности, на которой лежат точки соприкосновения плунжеров с периодическим профилем неподвижного кулачка. В математической модели передачи действительные значения радиусов-векторов точек соприкосновения плунжеров с периодическим профилем заторможенного кулачка в этом случае определяются по соотношению

$$\rho_{1i0} = \sqrt{(\rho_{1iH} + \delta_4 \cos \varphi_{1iH})^2 + \delta_4^2 \sin^2 \varphi_{1iH}}. \quad (9)$$

В приведенных выше соотношениях значения  $\rho_{1i0}$  являются также действительными значениями  $\rho_{2i0}$ . По этим значениям  $\rho_{2i0} = \rho_{1i0}$  можно определить соответствующие действительные значения  $\varphi_{2i0}$  из уравнения

$$\rho_{2i0} = \sqrt{r^2 - e^2 \sin^2 (m\varphi_{1i0})} + e \cos \varphi (m\varphi_{2i0}) + L, \quad (10)$$

которые можно найти либо численным методом (методом итераций), либо решением этого уравнения относительно  $\varphi_{2i0}$ . Легко показать, что это решение дает следующую зависимость:

$$m\varphi_{2i0} = \arccos \left( \frac{(\rho_{2i0} - L)^2 + e^2 - r^2}{2(\rho_{2i0} - L)e} \right). \quad (11)$$

Для каждого плунжера и каждой пары значений  $\varphi_{2i}$  (номинального и действительного) можно определить разности, характеризующие погрешности угловых параметров плунжеров

$$\Delta\varphi_{2i} = \varphi_{2i0} - \varphi_{2i}. \quad (12)$$

Является очевидным, что кинематическая погрешность передачи в любом положении ее плунжеров определяется наибольшей разностью из всех значений, вычисленных по соотношению (12).

Производя повороты ведущего звена на углы  $\alpha$  и повторяя расчеты, определяется желаемое количество значений кинематической погрешности за один оборот выходного вала.

Смещение  $\delta_3$  оси вращения ведомого вала (сепаратора) относительно центральной оси заторможенного кулачка также вызывает изменения положений точек соприкосновения плунжеров с периодическим профилем. Эти изменения определяются дополнительными углами поворота плунжеров  $\Delta\varphi_{2i}$ , значения которых в математической модели определяются по формуле

$$\Delta\varphi_{2i} = \delta_3 \sin \varphi_{2iH} / R_c, \quad (13)$$

где  $R_c$  – средний радиус сепаратора.

Действительное угловое положение ведомого звена будет определяться наибольшей величиной  $\Delta\varphi_{2i}$ , которая и будет определять кинематическую погрешность передачи.

Кинематическая погрешность передачи от смещения отверстий в сепараторе относительно их номинального положения определяется соотношением

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_i - \Delta\varphi_k, \quad (14)$$

где  $\Delta\varphi_i$  - наибольшая накопленная погрешность углового шага  $i$ -го плунжера из числа работающих плунжеров;  $\Delta\varphi_k$  - наибольшая накопленная погрешность углового шага  $k$ -го плунжера также из числа работающих плунжеров.

Точно также влияют на вращение ведомого вала погрешности углового шага периодического профиля заторможенного кулачка. Эти погрешности определяют дополнительные повороты отдельных плунжеров по направлению вращения ведомого вала и против этого вращения, в результате чего кинематическая погрешность в любом положении ведомого вала будет определяться мгновенным значением разности (14).

В соответствии с полученными выше соотношениями были приведены расчеты кинематических погрешностей. Расчеты производились в среде Microsoft Excel по специально разработанному для этой цели программ-макросам. Эти программы позволили дать графическое представление результатов расчета, а также разложить полученные функции кинематических погрешностей в ряды Фурье и построить дискретные спектры кинематических погрешностей.

На рис. 1 представлен график изменения кинематической погрешности радиально-плунжерной передачи, рассчитанной на передаточное отношение  $U = 17$ , за один оборот ее ведомого вала при значениях погрешностей длины плунжеров  $0 \leq \delta_2 \leq 0,5$

мм. На рис. 2 приведен дискретный спектр этой погрешности, охватывающий 120 первых гармонических составляющих.

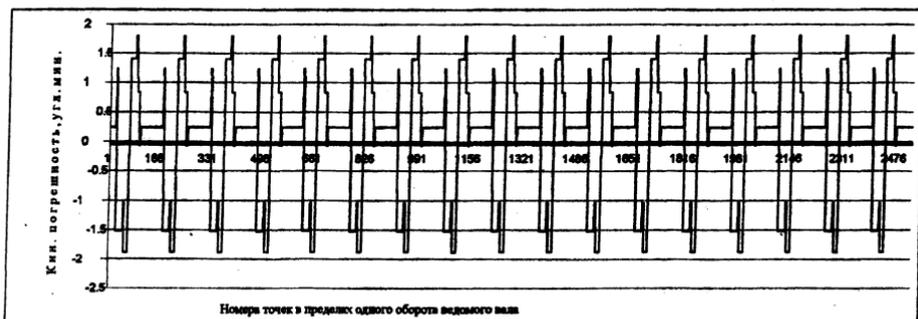


Рис.1. Влияние погрешности углового положения отверстий в сепараторе, равной 10 угловых минут, на кинематическую погрешность передачи с  $U=17$

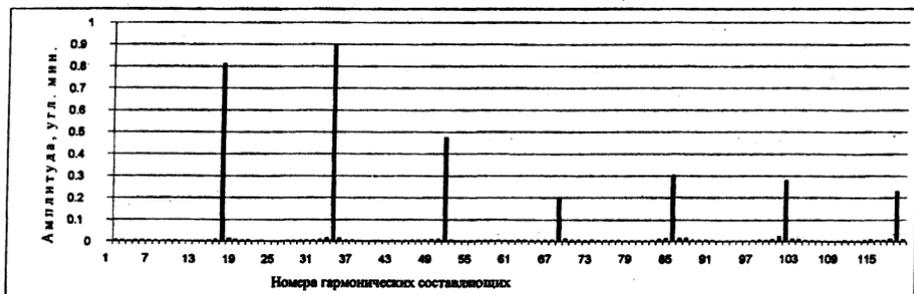


Рис.2. Амплитудно-частотный спектр кинематической погрешности, представленной на рис. 1

Расчеты и анализ кинематических погрешностей показали, что большинство из рассмотренных элементарных погрешностей деталей зацепления передач оказывают влияние лишь на высокочастотные составляющие кинематической погрешности, номера которых кратны количеству плунжеров и числу периодов профиля многопериодного кулачка. Это подтвердили результаты экспериментальных исследований, представленные на рис. 3. Эксперименты проводились на автоматизированном стенде по методике, которая была представлена ранее в работе [3].



Рис.3. Амплитудно-частотный спектр кинематической погрешности собранной передачи с  $U=17$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пашкевич М.Ф., Пашкевич А.М. Исследование влияния погрешностей деталей зацепления на кинематическую точность радиально-плунжерной передачи // Сборник научных трудов членов международной Балтийской ассоциации машиностроителей.- Калининград, КГТУ, 2001.- № 1.-С. 48 – 54.
2. Пашкевич М.Ф., Геращенко В.В. Планетарные шариковые и роликовые редукторы и их испытания: Обзор. – Мн.: БелНИИНТИ, 1992. –248 с.
3. Пашкевич В.М., Пашкевич М.Ф. Информационная система для исследований кинематической погрешности передач в сборе // Машиностроение.- Мн., 2000: Вып. 16.- С. 88 – 93.

УДК 621.762

Е.Е. Петюшик, Д.В. Макаруч, А.Ф. Смалюк

#### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПШИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ ДИСКРЕТНОГО ТЕЛА СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

*Институт повышения квалификации и переподготовки кадров  
Минск, Беларусь*

Современное развитие промышленного производства требует интенсификации технологических процессов, увеличения производительности, снижения материалоемкости. Что касается таких процессов, как фильтрация, катализ, адсорбция, использующих пористые проницаемые изделия (ППИ), удовлетворить вышеперечисленные