

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ НАРУШЕНИЯ РАБОЧЕЙ ТРАЕКТОРИИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РАБОЧИМ ПРОЦЕССОМ АВТОМОБИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Зайкин О.А.¹, Шеховцов В.В.², Годжаев З.А.³

¹ ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет», Астрахань, Россия, (414056, Астрахань, ул. Татищева, 16), e-mail: satellit8583@yandex.ru

² ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград, Россия, (400131, Волгоград, пр. Ленина, 28), e-mail: shehovtsov@vstu.ru

³ ОАО «Федеральный исследовательский испытательный центр машиностроения», Московская обл., Россия (142322, Московская область, Чеховский район, с. Новый быт, ул. Нати, 13), e-mail: fic51@mail.ru

Для проектирования малогабаритных агрегатов и механизмов систем автомобилей ранее разработаны четыре схемы зубчатых дифференциалов, формирующих точную прямолинейную траекторию без направляющей и рычажной системы. Кинематический принцип построения рабочей траектории требует определенной точности при разработке конструкции звеньев дифференциалов, иначе траектория может непредсказуемо измениться, а механизм – заклинить. Поэтому задача точного проектирования является одной из приоритетных в данных механизмах. Имеется неопределенность в значимости влияния на процесс потери устойчивости траектории, ряда геометрических параметров колес. Эта целевая задача была положена в основу исследования условий нарушения траектории в схемах разработанных дифференциалов. В результате исследования изменения кинематики схем были получены уравнения ошибок для системы уравнений рабочей траектории и составлена система уравнений управления формой траектории путем изменения геометрии зацепления в замыкающей ступени.

Ключевые слова: дифференциал, гипоциклоида, управление, отклонение

A STUDY OF WORKING CONDITIONS OF VIOLATION OF TRAJECTORIES FOR WORKFLOW CONTROL OF AUTOMOBILE UNITS

Zaikin O.A.¹, Shehovtsov V.V.², Godzhaev Z.A.³

¹ FSBEI HPE Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian (414056, Astrakhan, Tatischeva street, 16), e-mail: satellit8583@yandex.ru

² FSBEI HPE Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian (400131, Volgograd, Lenina avenue, 28), e-mail: shehovtsov@vstu.ru

³ JSC Federal research testing center of mechanical engineering, Moscow region, Russia (142322, Moscow region, Chekhov district, p. New life, St. Nati, 13), e-mail: fic51@mail.ru

For the design of small-sized units and mechanisms of systems of vehicles, the previously developed four schemes gear differentials, forming accurate rectilinear trajectory without guide rail and lever system. The kinematic principle of building a working trajectory requires a certain precision in the design of the links differentials, otherwise the trajectory can unpredictably change, and the mechanism to jam. Therefore, the problem of precise design, is one of the priorities in these mechanisms. There is an uncertainty in the significance of an impact on the process of loss of stability of a trajectory, a set of geometric parameters of the wheels. This target was based surveys on violations of the trajectory in schemes designed differentials. The study of changes in the kinematics diagrams were obtained equation errors for the system of equations of the working path and composed of a system of equations that control the shape of the trajectory by changing the geometry of the gear in the closing stages.

Keywords: differential, hypocycloid, management, deviation

В современном машиностроении все чаще стали появляться комбинированные приводы и агрегаты. Например, мотор-барабаны конвейеров имеют двигатели, совмещенные с редукторами. Причем последние – планетарного типа. Такая структура позволяет минимизировать привод по массо-габаритам, где двигатель является узлом редуктора. А также применение планетарных механизмов создает компактные структуры барабанов.

Или, например, мотор-колесо электромобиля с исключенным из привода редуктором и

системой управления вращения, бегущим магнитным полем двигателя.

Несколько другим является направление по созданию управляемых приводов с переменной структурой силовой схемы. Переменной может быть структура рычажной группы или передаточной. Отличительным свойством механизмов с переменной структурой является их способность переходить из одного вида механизма в другой, обеспечивая холостой и рабочий режимы без введения в кинематическую цепь дополнительных звеньев, удлинять или укорачивать ход рабочего звена, формируя холостое положение.

Переменная структура передач применяется в планетарных коробках-автоматах, где планетарные ряды формируются изменением тормозных регламентов.

Автором предложена идея совмещения рычажного привода с дифференциальной схемой для получения механизмов с компактной конструкцией и управляемой кинематикой. В результате синтезированы и запатентованы четыре отвечающие этим условиям схемы замкнутого дифференциала [1, 2, 3, 4] (рис. 1) со свойством формировать точное прямолинейное движение без направляющей на кинематическом принципе.

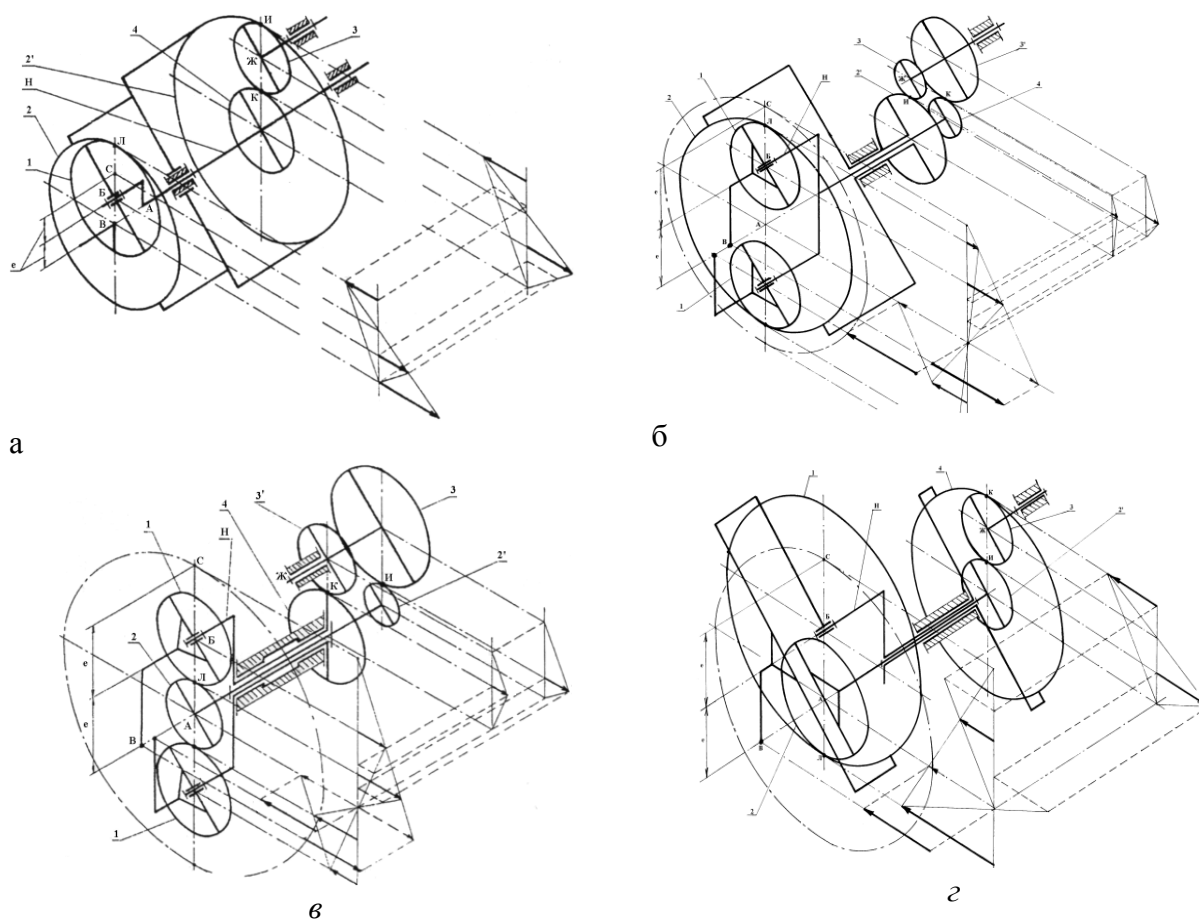


Рис. 1 Схемы дифференциалов с точным поступательным движением точки на сателлите:
а – схема 1; б – схема 2; в – схема 3; г – схема 4

Цель исследования

Основной целью выполненного исследования схем являлось получение зависимости движения рабочей точки на сателлите от внутренних отклонений геометрии и кинематики. Она позволяет анализировать перемещения рабочего органа при возможных ошибках изготовления и сборки. Уравнение также позволяет исследовать возможности управления траекторией, изменением кинематики замыкающей ступени при работе привода, например в ДВС, в рулевой системе или в шагающем транспортном средстве.

Содержание исследования

Кинематически траектория точки формируется сочетанием направлений и величин переносной и относительной скоростей в плоскопараллельном движении сателлита. Поэтому управлять траекторией можно, изменяя эти векторы. Например, можно управлять длиной хода ДВС, изменяя тем самым степень сжатия в цилиндре. Зазоры и отклонения от теоретических размеров звеньев также влияют на геометрию траектории.

К геометрическим влияющим факторам отнесены [5] – величина приращения радиусов Δ и число зубьев колес z . К кинематическим факторам отнесено изменение ω , если это управляющая функция. К геометрическим факторам отнесено также смещение k с окружности радиуса e точки, формирующей прямолинейную траекторию, из-за ошибки разметки или ошибки в положении оси водила p . Влияние каких-либо других величин не рассматривается, так как они входят в перечисленные ошибки.

Известно, что при обегании сателлитом во внутреннем зацеплении неподвижного центрального колеса точки на сателлите описывают гипоциклоиду [5], уравнение которой имеет вид:

$$\begin{cases} x = (R - r) \cos \varphi + a \cdot \cos\left(\frac{R - r}{r} \varphi\right), \\ y = (R - r) \sin \varphi - a \cdot \sin\left(\frac{R - r}{r} \varphi\right) \end{cases} \quad (1)$$

где: R – радиус центрального колеса;

r – радиус сателлита;

φ – угол поворота сателлита;

a – радиус окружности расположения точки на сателлите, описывающей гипоциклоиду.

В зависимости от отношения радиусов R и r соприкасающихся окружностей при их качении без проскальзывания кривая может быть циклически замкнутой или бесконечной, незамкнутой. Циклическая гипоциклоида представляет собой многогранную симметричную фигуру, в бесконечности повторений не изменяющуюся. Таким образом, наибольшее прогнозируемое отклонение от прямолинейности траектории по оси Y – это половина максимального хода, т. е. $S_B^{max} / 2$.

При соотношении радиусов $R = 2r$ и $a=R/2$, заложенном в геометрии базового планетарного механизма и траектории мнимого центра скоростей сателлита в новых схемах дифференциалов, гипоциклоида вырождается в прямую:

$$\begin{cases} x_B = (2r - r) \cos \varphi + a \cdot \cos\left(\frac{2r - r}{r} \varphi\right) \\ y_B = (2r - r) \sin \varphi - a \cdot \sin\left(\frac{2r - r}{r} \varphi\right) \end{cases} \quad (2)$$

При подстановке $a = l_{BB} = e$ получаем уравнение прямой:

$$\begin{cases} x_B = e \cos \varphi + e \cos \varphi = 2e \cos \varphi \\ y_B = e \sin \varphi - e \sin \varphi = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Условие сохранения прямолинейности должно обеспечивать выполнение следующих требований:

1. $R/r = 2$ при любых $R_2 = 2e + \Delta$ и $R_1 = e + \Delta$.
2. Δ – неизменно при подборе z_2 и z_1 .
3. U_{2H} – неизменно при подборе чисел зубьев колес замыкающей ступени дифференциала.

В отличие от планетарного механизма, имеющего действительные колеса с $R_2 = R$ и $R_1 = r$, предложенные дифференциалы имеют мнимые образующие окружности, которые чувствительны к отклонениям задающих параметров. При изменении скорости точки Л в результате округления Δ , или отношения U_{2H} , или наличии зазоров в подшипниках радиусы образующих гипоциклоиду окружностей изменятся с $R = 2e$ до R^* и с $r = e$ до r^* . Таким образом, траектория движения точки В из прямой преобразуется в гипоциклоиду точки В, для которой существует интересующая нас координата y_B .

Рассмотрим возможные варианты причин неустойчивости траектории.

1. Не выдержан размер Δ в результате округления числа зубьев сателлита 1 и центрального колеса 2.
2. Не выдержана величина U_{2H} в результате округления до целого чисел зубьев колес замыкающей ступени дифференциала.
3. Совокупное смещение точки В из-за допусков изготовления и зазоров в подшипниках опор водила и сателлита.
4. Все предыдущие пункты в совокупности при наихудшем их сочетании.

Выведем условия отклонения величины образующих радиусов e при разных условиях коррекции расчетных данных (рис. 2, 3, 4, 5).

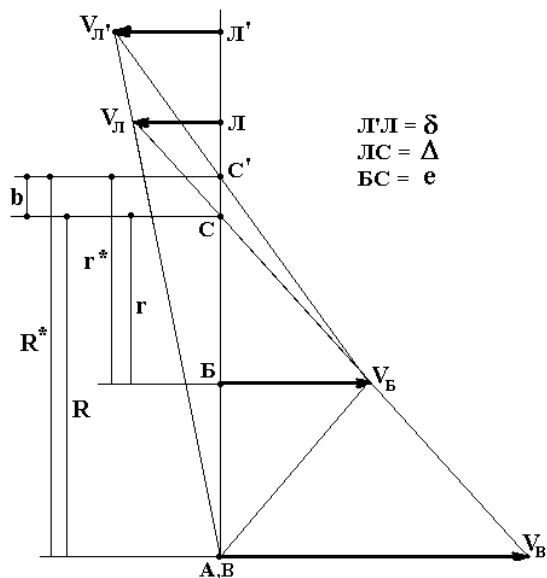


Рис. 2. Расчетный случай 1

Расчетный случай 1 – изменение Δ на величину δ (рис. 3.3):

$$V_B = \omega_H \cdot e - const.$$

Точка L лежит на продолжении прямой AB :

$$AB = BV = e$$

$$U_{2H} = \omega_2 / \omega_H = const$$

Тогда вектор V_L^* будет равен с учетом знака

$$V_L^* = -\omega_2 \cdot (2e + \Delta + \delta)$$

и $V_L^* \neq V_L$,

$$\Delta BC^* V_B \sim \Delta C^* L^* V_L^*,$$

$$\frac{V_B}{V_L^*} = \frac{BC^*}{C^* L^*},$$

$$BC^* = e + v \quad C^* L^* = \Delta + \delta - v,$$

где: v – приращение радиусов R и r .

Так как ω_H – положительная, а ω_2 – отрицательная, то:

$$-\frac{\omega_H}{\omega_2} \cdot \frac{e}{(2e + \Delta + \delta)} = \frac{e + v}{\Delta + \delta - v}.$$

В соответствии с главным условием синтезированной схемы дифференциалов:

$$\frac{\omega_H}{\omega_2} = -\frac{2e + \Delta}{\Delta}.$$

При подстановке получаем:

$$\frac{(2e + \Delta)}{\Delta} \cdot \frac{e}{(2e + \Delta + \delta)} = \frac{e + v}{\Delta + \delta - v}.$$

Окончательно общее приращение радиусов:

$$v = \frac{(\Delta + \delta) \cdot \frac{(2e + \Delta)}{(2e + \Delta + \delta)} \cdot \frac{e}{\Delta} - e}{\frac{(2e + \Delta)}{(2e + \Delta + \delta)} \cdot \frac{e}{\Delta} + 1} \tag{4}$$

Проверим выражение по условию $\delta = 0$:

$$v = \frac{\Delta \cdot \frac{(2e + \Delta) \cdot e}{(2e + \Delta) \cdot \Delta} - e}{\frac{(2e + \Delta) \cdot e}{(2e + \Delta) \cdot \Delta} + 1} = \frac{0}{\frac{e}{\Delta} + 1} = 0 \quad \text{— условие верное.}$$

Радиусы смещенных образующих окружностей:

$$R^* = R + v = 2e + \Delta + v;$$

$$r^* = r + v = e + \Delta + v.$$

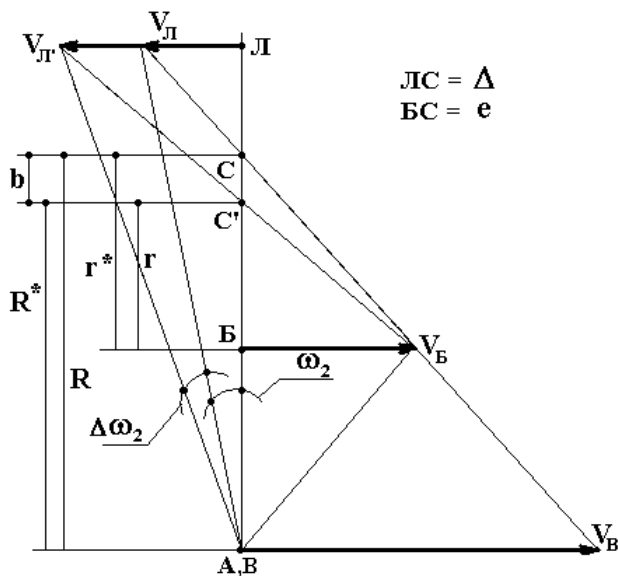


Рис. 3. Расчетный случай 2

Расчетный случай 2 – изменение U_{2H} на величину ΔU и ω_H на величину $= \Delta \omega_H$ (рис. 3.4):

$$V_B = \omega_H \cdot e - const$$

Точка Л лежит на продолжении прямой АБ:

$$АБ = БВ = e$$

$$R_1, R_2 - const$$

Тогда вектор V_L^* будет равен

$$V_L^* = -\omega_2^* \cdot (2e + \Delta) = -(\omega_2 + \Delta \omega_2) \cdot (2e + \Delta)$$

$$\frac{V_B}{V_L^*} = \frac{BC^*}{LC^*},$$

$$BC^* = e - v,$$

$$LC^* = \Delta + v,$$

$$-\frac{\omega_H e}{(\omega_2 + \Delta \omega_2) \cdot (2e + \Delta)} = \frac{e - v}{\Delta + v}.$$

После преобразования получаем приращение радиусов:

$$v = \frac{e + \frac{\omega_H \cdot e \cdot \Delta}{(\omega_2 + \Delta \omega_2) \cdot (2e + \Delta)}}{1 - \frac{\omega_H}{(\omega_2 + \Delta \omega_2) \cdot (2e + \Delta)}}. \quad (5)$$

При $\Delta\omega = 0$:

$$\begin{aligned} v &= \frac{e + \frac{\omega_H}{\omega_2} \cdot e \cdot \frac{\Delta}{2e + \Delta}}{1 - \frac{\omega_H}{\omega_2} \cdot \frac{1}{2e + \Delta}} = \\ &= \frac{e - \frac{2e + \Delta}{\Delta} \cdot e \cdot \frac{\Delta}{2e + \Delta}}{1 - \frac{2e + \Delta}{\Delta} \cdot \frac{1}{2e + \Delta}} = \frac{e - e}{1 + \frac{1}{\Delta}} = 0 \end{aligned}$$

Радиусы смещенных окружностей:

$$R^* = 2e + \Delta - v;$$

$$r^* = e + \Delta - v.$$

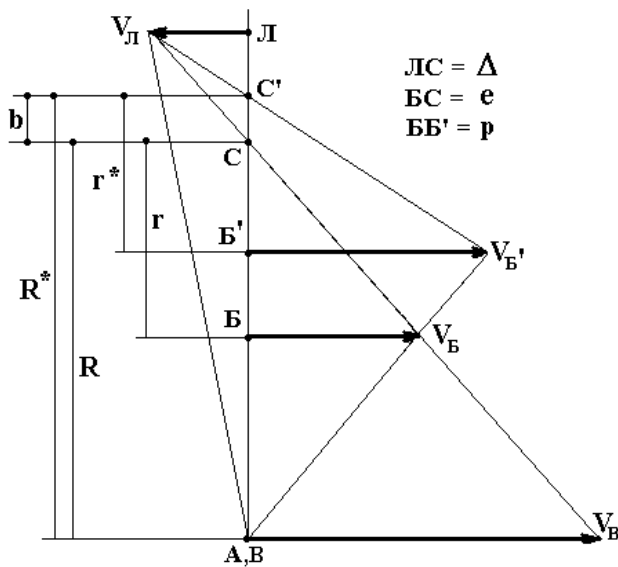


Рис. 4. Расчетный случай 3

$$\frac{V_B^*}{V_L} = \frac{B^*C^*}{LC^*},$$

$$B^*C^* = e - p + v,$$

$$LC^* = \Delta - v$$

$$V_L = -\omega_2(2e + \Delta),$$

$$-\frac{\omega_H(e + p)}{\omega_2(2e + \Delta)} = \frac{e - p + v}{\Delta - v}.$$

При

$$\frac{\omega_H}{\omega_2} = -\frac{2e + \Delta}{\Delta}$$

Расчетный случай 3 – влияние зазоров в опорах и отклонений при изготовлении на положение т. *Б*.

Обозначим приращение расстояния *АВ* через *p*.

Точка *Л* лежит на продолжении прямой *АВ*

$$AB' = e + p, \quad U_{2H} = \text{const}$$

$$V_B^* = \omega_H \cdot (e + p)$$

$$\frac{(2e + \Delta) \cdot (e + p)}{\Delta(2e + \Delta)} = \frac{e - p + v}{\Delta - v},$$

$$\frac{(e + p)\Delta}{\Delta} - \frac{e + p}{\Delta} \cdot v = (e - p) + v,$$

$$e + p - e + p = v \left(\frac{e + p}{\Delta} + 1 \right),$$

$$v = \frac{2p}{e + p + \Delta} \cdot \Delta. \quad (6)$$

Величина измененных радиусов:

$$R^* = R + v = 2e + \Delta + v;$$

$$r^* = r - p + v = e + \Delta - p + v$$

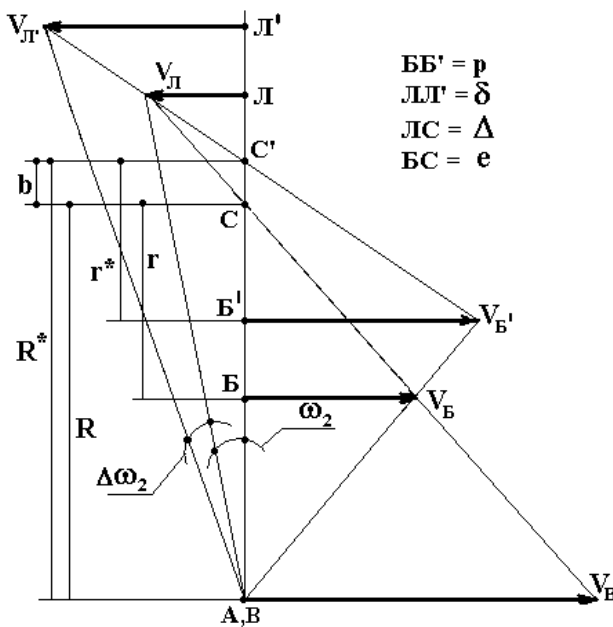


Рис. 5. Расчетный случай 4

Расчетный случай 4 – все виды смещений

(рис. 3.6):

$$\frac{V_B^*}{V_L^*} = \frac{B^*C^*}{L^*C^*},$$

$$B^*C^* = e - p + v, \quad L^*C^* = \Delta + \delta - v,$$

$$V_B^* = \omega_H(e + p),$$

$$V_L^* = -(\omega_2 + \Delta\omega_2) \cdot (2e + \Delta + \delta),$$

$$\frac{\omega_H(e + p)}{-(\omega_2 + \Delta\omega_2) \cdot (2e + \Delta + \delta)} = \frac{e - p + v}{\Delta + \delta - v},$$

$$\frac{e + p}{2e + \Delta + \delta} \cdot \frac{1}{-\left(\frac{\omega_2}{\omega_H} + \frac{\Delta\omega_{21}}{\omega_H}\right)} = \frac{(e - p) + v}{(\Delta + \delta) - v}$$

Используя условие:

$$\frac{\omega_H}{\omega_2} = -\frac{2e + \Delta}{\Delta},$$

окончательно получаем:

$$v = \frac{\frac{e+p}{2e+\Delta+\delta} \cdot \frac{1}{\omega_H \left(-\frac{\Delta\omega_2}{\omega_H} + \frac{\Delta}{2e+\Delta} \right)} \cdot (\Delta+\delta) - (e-p)}{\frac{e+p}{2e+\Delta+\delta} \cdot \frac{1}{\omega_H \left(-\frac{\Delta\omega_2}{\omega_H} - \frac{\Delta}{2e+\Delta} \right)} + 1}. \quad (7)$$

При $\delta = 0$; $\Delta\omega_2 = 0$; $p = 0$:

$$v = \frac{\frac{e}{2e+\Delta} \cdot \frac{1}{\Delta} \cdot \Delta - e}{\frac{e}{2e+\Delta} \cdot \frac{1}{\Delta} + 1} = \frac{e-e}{\frac{e}{\Delta} + 1} = 0 \text{ — верно.}$$

Измененные радиусы образующих окружностей соответственно:

$$R^* = R + v = 2e + \Delta + v;$$

$$r^* = r - p + v = e + \Delta - p + v.$$

Для всех случаев ошибок траектория отклонения точки B от прямой описывается как:

$$\begin{cases} x^* = (R^* - r^*) \cos \varphi + a^* \cos\left(\frac{R^* - r^*}{r} \varphi\right), \\ y^* = (R^* - r^*) \sin \varphi - a^* \sin\left(\frac{R^* - r^*}{r} \varphi\right) \end{cases}$$

или:

$$\begin{cases} x^* = (e+p) \cos \varphi + (e \pm k) \cos\left(\frac{e+p}{e+\Delta-p+v} \varphi\right), \\ y^* = (e+p) \sin \varphi - (e \pm k) \sin\left(\frac{e+p}{e+\Delta-p+v} \varphi\right) \end{cases}. \quad (8)$$

Ошибка k для прямой траектории входит в величину a , поэтому она не изменяет кинематику.

При обнулении всех ошибок, кроме k , получаем уравнение эллипса (рис. 11):

$$\begin{cases} x^* = (2e \pm k) \cos \varphi, \\ y^* = -(\pm k) \sin \varphi \end{cases} \quad (9)$$

Уравнение (9) показывает, что малая ось эллипса равна $2k$, так как при обратном ходе получаем $(-\sin \varphi)$. А ход может быть короче или длиннее.

Заключение

Уравнения (8 и 9) применяются для прогнозирования траектории без изменения первоначальной схемы привода. Например, для получения величины поднятия ноги шагающего транспортера надо ввести уменьшение расстояния a на величину $k = h / 2$, где h – высота неровностей дороги [5].

При управлении параметром a траектория становится короче или длиннее, что можно применить при управлении степенью сжатия в ДВС [6, 7].

Отклонение размера a из-за допусков изготовления и сборки в уравнениях гипоциклоиды также может нарушить прямолинейность траектории. При величине отклонения в пределах допуска на изготовление, полученная таким образом координата k может быть компенсирована зазором в шарнирах B и B . При большой величине отклонения от прямолинейности требуется специальный компенсатор бокового хода для шарнира B (см. рис. 1).

Список литературы

1. Зайкин О.А. Дифференциальный механизм с кинематическим принципом создания точного прямолинейного движения точки на охватывающем сателлите // Патент России № 2196264.2003. Бюл. № 1.
2. Зайкин О.А. Замкнутый дифференциал с точкой точного прямолинейного движения // Патент России № 2125195.1999. Бюл. № 2.
3. Зайкин О.А. Механизм точного прямолинейного движения точки // Патент России № 2102644.1998. Бюл. № 2.
4. Зайкин О.А. Многосателлитный дифференциал с точным прямолинейным движением точек на сателлитах // Патент России № 2196265.2003. Бюл. № 1.
5. Зайкин О.А., Шеховцов В.В., Годжаев З.А. Привод транспортно-технологических машин с использованием зубчатого бесшатунного дифференциала // Технология колесных и гусеничных машин. Обзорно-аналитический и научно-технический журнал. – 2014. – № 6(16). – С. 57–64
6. Зайкин О.А. Проектирование малогабаритных двигателей и компрессоров с точным поступательным движением поршней без направляющей на основе схем замкнутых дифференциалов // Вестник АГТУ. Научный журнал. Машиностроение. – 2005. – № 2 (25). – С.44–50.
7. Зайкин О.А. Анализ компоновок двигателей для судовых и наземных транспортных средств // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. – 2014. – № 4. – С. 57–64.

Рецензенты:

Ляшенко М.А., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Автомобиле- и тракторостроение»,
Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград;

Матлин М.М., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Детали машин и ПТУ», Волгоградский
государственный технический университет, г. Волгоград.