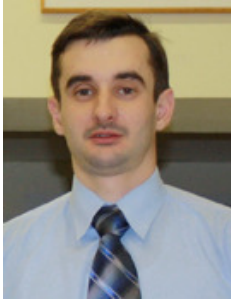


УДК 621.9-503.55



С.С. Емельяненко,
канд. техн. наук,
доцент, Сумской
государственный
университет
e-mail: ecc@mail.ru



Ю.В. Овчарова,
студент
Сумской
государственный
университет
e-mail: ecc@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ШТАНГ СТАНКОВ, ОСНОВАННЫХ НА МЕХАНИЗМАХ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКОЙ

С.С. Емельяненко, Ю.В. Овчарова.
Исследование динамических показателей перемещения штанг станков, основанных на механизмах с параллельной кинематикой. В статье разработана и подтверждена адекватность математической модели для расчета длин штанг станка с параллельной кинематикой, трипода. Разработанная модель реализована в программной среде Mathcad 2000 Professional. На основе разработанной математической модели проведены исследования динамических показателей перемещения штанг станка с параллельной кинематикой. Полученные результаты были сравнены с динамическими показателями станка с последовательной структурой. Сравнение показало, что станки с параллельной кинематикой могут иметь динамические показатели более чем в 3 раза меньшие в сравнении со станками с последовательной кинематикой.

S.S. Emelyanenko, U.V. Ovcharova.
Of dynamic performance trave boom machine based on mechanisms with parallel kinematics. The mathematical model for calculating the bar length of tripod machine was developed and its adequacy was proved. The model was developed with aid of Mathcad 2000 Professional. The dynamics of bar movement was investigated by developed model. Achieved results were compared with the dynamics performances of serial structure machine and it as shown that parallel kinematics machines have dynamic performance more than 3 times smaller compared to serial kinematics machines.

Вступлення. Обеспечение конкурентоспособности продукции современного машиностроения требует создания современного высокоэффективного технологического оборудования. Появление новых видов машин, транспортных средств и т.п. привело к широкому использованию сложных геометрических форм, которые довольно часто определяют их основные характеристики. Рост вычислительных способностей управляющих систем станков с числовым программным управлением (ЧПУ) совместно с успешными научными исследованиями в области машиностроения позволил создать новый класс технологического оборудования на базе механизмов с параллельной кинематикой (МПК). Их основными свойствами является модульная конструкция, построенная из унифицированных элементов, которая способна вос-

принимать и передавать нагрузки подобно к пространственным фермам и обеспечивать движение исполнительного органа с высокими скоростями и ускорениями [1, 2, 3, 4, 5]. Отечественное станкостроение базируется на традиционных механизмах, в основном усовершенствуются системы управления, способы контроля, исполнительные привода, внедряются интеллектуальные системы управления. Построение нового технологического оборудования на основе МПК позволяет качественно изменить представление о станке и его кинематической структуре.

Постановка задачи. В связи с выше сказанным важным направлением является исследование динамических показателей перемещения штанг станков с параллельной кинематикой (СПК), таких как скорость и ускорение перемещения, которые в свою очередь влияют на выбор приводов и проектирование конструкции в целом.

Результаты. Для проведения исследований, прежде всего, необходимо получить данные о движении штанг СПК при перемещении рабочего органа. Для получения указанных данных необходимо разработать математическую модель, которая бы позволила, исходя из конструкции и положения рабочего органа СПК определять положение штанг (СПК с постоянной длиной штанг) или их длину (СПК со сменной длиной штанг).

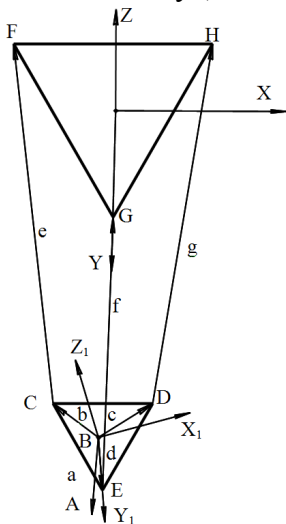


Рис. 1 – Расчетная схема трипода

Для построения кинематических моделей механизмов с параллельной кинематикой используем векторный метод математического моделирования для пространственных механизмов [1, 4, 5]. Математическую модель разработаем для СПК трипода (рис. 1) со штангами изменяемой длины.

На расчетной схеме трипода (рис. 1) изображена неподвижная платформа FHG , координаты точек, которых известны, а также известна длина FH . В данной задаче треугольники FHG и CDE равносторонние. Координаты точек F, H, G заданы в главной системе координат XYZ .

Также изображена (рис. 1) подвижная платформа CDE , в центре которой вектором BA изображен инструмент. Известна длина CD , длина вектора $BA=a$, длины векторов b, c, d и координаты точки A , которые заданы в главной системе координат XYZ . Отрезки CF, EG, DH являются штангами переменной длины.

Задача разработать математическую модель, которая позволит рассчитывать длины штанг трипода в зависимости от положения рабочего органа (инструмента) в пространстве.

Задача разработать математическую модель, которая позволит рассчитывать длины штанг трипода в зависимости от положения рабочего органа (инструмента) в пространстве.

Для упрощения вычислений длины векторов $CF=e, EG=f, DH=g$ на расчетной схеме используется вспомогательная система координат $X_1Y_1Z_1$.

Вычисление длин векторов начинаем с определения координат точки B относительно главной системы координат XYZ . Для этого рассмотрим сначала расчетную схему подвижной платформы трипода (рис. 2). Известно, что $a \perp b$, $c, d, bc=cd=bd$, а вектор d всегда совпадает с направлением оси Y_1 .

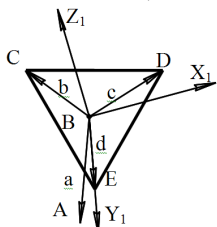


Рис. 2 – Расчетная схема подвижной платформы трипода

Следовательно, координаты точки B определяются по формулам в случае поворота относительно оси Y оси X

$$X_B = X_A, \quad X_B = X_A - 90 \cdot \sin(\varphi),$$

$$Y_B = Y_A - 90 \cdot \sin(\varphi), \quad Y_B = Y_A,$$

$$Z_B = Z_A + 90 \cdot \cos(\varphi), \quad Z_B = Z_A + 90 \cdot \cos(\varphi),$$

где $X_B, Y_B, Z_B, X_A, Y_A, Z_A$ – координаты B и A ;

φ – угол поворота звена относительно оси Y или оси X (рис. 3).

Следующий этап в решении этой задачи будет определение координат точек A_1 и B_1 относительно вспомогательной системы координат $X_1Y_1Z_1$. Это делается для упрощения расчетов и в последующем вектор каждого звена будет спроецировать в основной системе координат.

Координаты точки A_1 будут равны

$$X_{1A} = 0, \quad Y_{1A} = 0, \quad Z_{1A} = (-1) \cdot a,$$

где a – длина вектора BA .

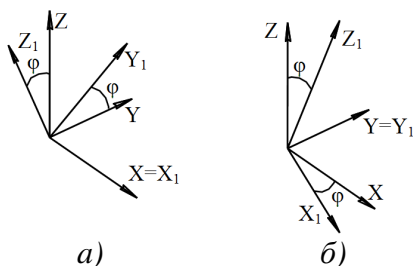


Рис.3 –Вращение системы координат: а) относительно оси Y ;
б) относительно оси X

Координаты точки B_1 будут равны нулю так, как точка B_1 находится в начале системы координат $X_1Y_1Z_1$. Аналогично мы определяем координаты точек C_1, D_1, E_1 в системе координат $X_1Y_1Z_1$.

Для того чтобы перейти из одной системы координат в другую и составить векторные уравнения используют матрицы переходов [1, 4, 6].

Поскольку в данной задаче поворот подвижной платформы происходит вдоль оси Y (рис. 3, а), то матрица направляющих конусов будет иметь вид [1, 4, 6]:

$$\begin{cases} XX_1; XY_1; XZ_1 \\ YX_1; YY_1; YZ_1 \\ ZX_1; ZY_1; ZZ_1 \end{cases} \begin{cases} 1; 0; 0 \\ 0; \cos(\varphi); \sin(\varphi) \\ 0; \sin(\varphi); \cos(\varphi) \end{cases} \quad (2)$$

Используя выше приведенную матрицу, мы определяем координаты точек C_2, D_2, E_2 до смещения системы координат относительно оси Y .

Координаты точки C_2 определяем по формулам:

$$\begin{aligned} X_{2C} &= X_{1C} \cdot 1 + Y_{1C} \cdot 0 + Z_{1C} \cdot 0, \\ Y_{2C} &= X_{1C} \cdot 0 + Y_{1C} \cdot \cos(\varphi) + Z_{1C} \cdot \sin(\varphi), \\ Z_{2C} &= X_{1C} \cdot 0 + Y_{1C} \cdot \sin(\varphi) + Z_{1C} \cdot \cos(\varphi). \end{aligned} \quad (3)$$

Аналогічно определяются координаты точек D_2, E_2 .

Зная то, что поворот подвижной платформы осуществляется вдоль оси Y , а смещение системы координат происходит относительно точки B , то необходимо знать смещение по каждой оси. Смещение по осям X, Y, Z будет равно

$$X_0 = X_B, Y_0 = Y_B, Z_0 = Z_B, \quad (4)$$

где X_0, Y_0, Z_0 – координаты смещения по осям X, Y, Z .

Для перехода между системами координат, центры которых смещены, используются формулы:

$$X = X_2 + X_0, Y = Y_2 + Y_0, Z = Z_2 + Z_0. \quad (5)$$

Координаты точки C, D, E будут равны

$$\begin{aligned} X_C &= X_{2C} + X_0, & X_D &= X_{2D} + X_0, & X_E &= X_{2E} + X_0, \\ Y_C &= Y_{2C} + Y_0, & Y_D &= Y_{2D} + Y_0, & Y_E &= Y_{2E} + Y_0, \\ Z_C &= Z_{2C} + Z_0, & Z_D &= Z_{2D} + Z_0, & Z_E &= Z_{2E} + Z_0. \end{aligned} \quad (6)$$

Имея координаты шарниров F, H, G, C, D, E относительно XYZ , определяем длины векторов e, f, g по формулам:

$$\begin{aligned} e &= \sqrt{(X_C - X_F)^2 + (Y_C - Y_F)^2 + (Z_C - Z_F)^2}, \\ f &= \sqrt{(X_E - X_G)^2 + (Y_E - Y_G)^2 + (Z_E - Z_G)^2}, \\ g &= \sqrt{(X_D - X_H)^2 + (Y_D - Y_H)^2 + (Z_D - Z_H)^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Решая данную задачу, следует учитывать ограничения, которые накладываются на работу СПК трипода в реальных условиях.

Одним из ограничений является длина штанги (ее минимальное и максимальное значение), поскольку их перемещение ограничено конструкцией самой штанги. Еще одно ограничение, которое мы вводим и которое связано с особенностями расчета – это возможность поворота рабочего органа одновременно относительно только одной оси X или Y . Также ограничением является максимальный угол наклона рабочего органа φ . Кроме того, значение угла наклона рабочего органа должно быть меньше от угла наклона штанг ($\varphi \leq \lambda$), поскольку при нарушении данного условия может произойти столкновение штанг (поз. 2) с приводом главного движения (мотор-шпинделем) (поз. 1).

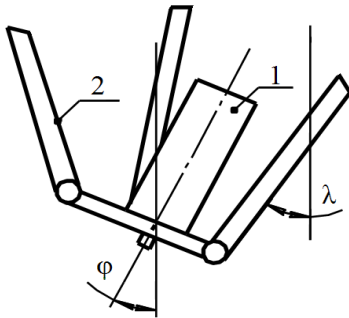


Рис. 4 – Схема расположения углов φ и λ

Описанная математическая модель с учетом ограничений была реализована в программной среде Mathcad 2000 Professional фирмы MathSoft Apps [7].

Для проверки адекватности разработанной математической модели рассчитаем длины штанг трипода, исходя из положения рабочего органа и основных конструктивных размеров таблица 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета, результаты расчета и результаты построения

Параметр	Значение		
	X	Y	Z
Координаты рабочего органа (центра торца инструмента), точка A, мм	-20,00	45,54	-286,25
Координаты шарнира расположенного на неподвижном основании точка F, мм	-100,00	-57,74	0
Координаты шарнира расположенного на неподвижном основании точка H, мм	100,00	-57,74	0
Координаты шарнира расположенного на неподвижном основании точка G, мм	0	115,4701	0
Длина инструмента a, мм	90		
Длина вектора b, c, d, мм	57,7350		
Угол поворота рабочего органа относительно оси Y φ , град	15		
Координаты точки C полученные расчетным путем в программе Mathcad, мм	70,00	-5,64	-206,79
Координаты точки C полученные путем построения в программе Компас-3D, мм	70,00	-5,64	-206,79
Координаты точки E полученные расчетным путем в программе Mathcad, мм	-20,00	78,02	-184,38
Координаты точки E полученные путем построения в программе Компас-3D, мм	-20,00	78,02	-184,38
Координаты точки D полученные расчетным путем в программе Mathcad, мм	30,00	-5,64	-206,79
Координаты точки D полученные путем построения в программе Компас-3D, мм	30,00	-5,64	-206,79

Для проверки полученных результатов по известным размерам создаем трехмерную модель в программном пакете Компас-3D V8 Plus фирмы АСКОН и определяем координаты точек C , E , B (табл. 1).

Сравнивая полученные результаты (табл. 1) можно сделать вывод о полном совпадении координат точек. Таким образом, разработанная математическая модель является адекватной и ее можно использовать при исследовании динамических показателей перемещения штанг СПК трипода.

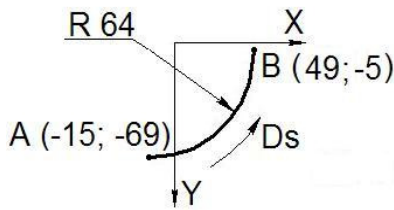


Рис. 5 – Траектория движения рабочего органа

Исследования будем проводить для СПК трипода и станка с традиционной последовательной кинематикой. Для сравнения динамических показателей этих станков рассмотрим движение рабочего органа по дуге с постоянной подачей (рис. 5). Данная траектория была выбрана поскольку при движении по прямой скорость и ускорение работы

приводов станка с последовательной кинематикой являются постоянными и сравнение поэтому не имеет смысла. Движение осуществляется из точки A в точку B по дуге радиусом 64 мм при различных постоянных подачах, которые характерны для современных станков (10 мм/мин, 100 мм/мин, 1 000 мм/мин и 10 000 мм/мин [1]).

Перед проведением расчета дуга была разбита на 100 частей (через $0,9^\circ$) и были определены координаты 101 базовой точки (табл. 2). После чего, используя разработанную математическую модель, были рассчитаны длины штанг для каждой точки (табл. 2). Используя полученные данные, для каждой точки, были рассчитаны скорости и ускорения движения штанг СПК трипода и рабочего органа станка с последовательной кинематикой в направлении оси X , Y .

Таблица 2 – Координаты базовых точек и длины штанг

№ точки	Координата точки, мм			Длина штанги, мм		
	X	Y	Z	e	g	f
1	-15,000	-69,000	950,000	1189,363	1222,821	1196,906
2	-14,000	-68,992	950,000	1189,603	1222,806	1196,644
3	-13,000	-68,969	950,000	1189,846	1222,787	1196,390
...
100	48,992	-6,000	950,000	1213,288	1203,940	1188,819
101	49,000	-5,000	950,000	1213,431	1203,646	1188,956

По результатам расчета были построены зависимости перемещения, скорости и ускорения от времени, для СПК и станка с последовательной кинематикой при четырех различных подачах (рис. 6).

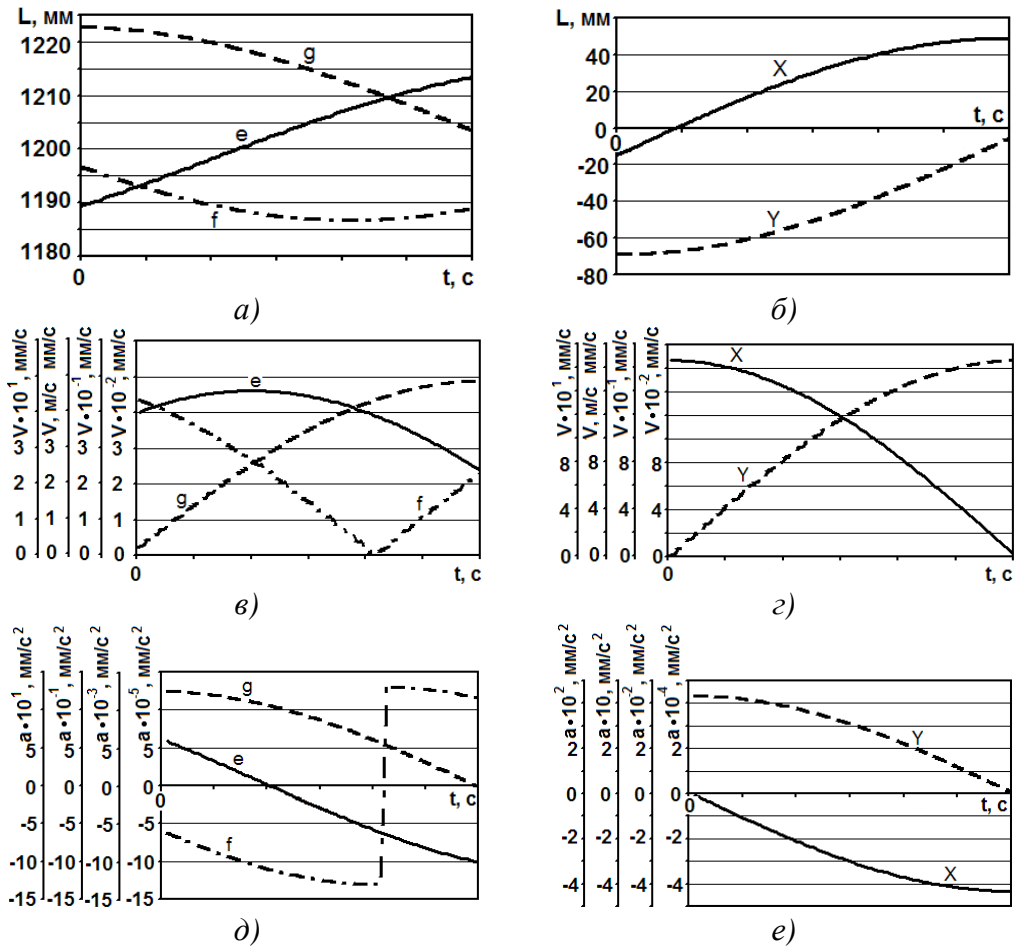


Рис. 6 – Зависимости:

- а) длины штанг от времени для СПК;
 б) положения рабочего органа от времени для станка с последовательной кинематикой;
 в) скорости перемещения штанг от времени для СПК; г) скорости перемещения рабочего органа от времени для станка с последовательной кинематикой;
 д) ускорения перемещения штанг от времени для СПК; е) ускорения перемещения рабочего органа от времени для станка с последовательной кинематикой (10 000 мм/мин – первая шкала, цена деления шкалы времени 0,1с; 1 000 мм/мин – вторая шкала, цена деления шкалы времени 1с; 100 мм/мин – третья шкала, цена деления шкалы времени 10с; 10 мм/мин – четвертая шкала, цена деления шкалы времени 100с;)

Исходя из полученных графиков, в процессе перемещения рабочего органа СПК длина штанги *e* постоянно увеличивается, а длина штанги *g* потоянно

уменьшается, в тоже время длина штанги f в начале уменьшается, после чего в конце начинает увеличиваться, что связано с переходом рабочим органом за центр дуги.

Причем следует обратить внимание на то, что при перемещении по дуге длиной в 100 мм штанги перемещаются: e на 24 мм, g на 19 мм и f на 11 мм, в то время как рабочий орган с последовательной кинематикой по каждой из осей проходит путь равный радиусу дуги 64 мм.

Таким образом, привода СПК в сравнении с последовательной кинематикой выполняют меньшие перемещения, так например, в данном случае эти перемещения в среднем меньше в 3,6 раза.

Скорость перемещения штанги e на первой трети, пути плавно увеличивается, после чего на оставшемся участке также плавно уменьшается.

Скорость перемещения штанги g на всем пути перемещения постоянно растет.

Скорость перемещения штанги f в начале на $2/3$ пути резко уменьшается, после чего начинает резко возрастать, что связано с изменением направления перемещения штанги.

При этом скорости перемещения штанг при подаче в 10 000 мм/мин составляют от 0 до 49 мм/с.

Скорости же перемещения рабочего органа станка с последовательной кинематикой составляют от 0 до 167 мм/с.

Таким образом, привода СПК в сравнении с последовательной кинематикой двигаются с меньшей скоростью, так например, в данном случае эти скорости в среднем меньше в 3,4 раза.

Ускорение перемещения штанги e на всем пути постоянно уменьшается, от положительных до отрицательных значений, что связано с изменением скорости перемещения.

Ускорение перемещения штанги g на всем пути перемещения постоянно уменьшается.

Ускорение перемещения штанги f в начале на $2/3$ пути уменьшается, после чего оно мгновенно возрастает до положительных значений и продолжает уменьшаться.

Такое поведение ускорения штанги f связано с изменением направления перемещения штанги. При этом ускорения перемещения штанг при подаче в 10 000 мм/мин составляют от -131 до 131 мм/с².

Таким образом, привода СПК в сравнении с последовательной кинематикой двигаются с меньшим ускорением, так например, в данном случае эти ускорения в среднем меньше в 3,3 раза.

Выводы.

Используя векторный метод математического моделирования для пространственных механизмов, была разработана математическая модель для расчета длин штанг СПК трипода (со сменной длиной штанг) исходя из его конструктивных размеров и положения рабочего органа.

Данная модель была реализована в программной среде Mathcad 2000 Professional. Адекватность разработанной модели была подтверждена с использованием трехмерной модели разработанной в программном пакете Компас-3D V8 Plus.

Используя результаты расчета длин штанг СПК трипода, было проведено исследование динамических показателей перемещения штанг СПК, таких как скорость и ускорение перемещения.

Проведенные исследования показали, что приводам станков СПК в сравнении со станками с последовательной кинематикой при перемещении рабочего органа по одной и той же траектории требуется проходить в среднем в 3,6 раза меньшее расстояние, при этом скорость перемещения в среднем в 3,4 раза меньше, а ускорение перемещения в 3,3 раза меньше.

Литература:

1. Кузнецов, Ю.М. Компонувки верстатів з механізмами паралельної структури [Текст] / Ю.М. Кузнецов, Д.О. Дмитрієв, Г.Ю. Діневич ; під заг. ред. Ю.М. Кузнецова. – Херсон : ПП Вишемирський В.С., 2009. – 456 с.

2. Reimund Neugebauer (Hrsg.). Parallelkinematische Maschinen [Text] : Entwurf, Konstruktion, Anwendung. – Germany, 2006. – 259 с.

3. Подленко, О.Н. Параметрический синтез формообразующих систем станков на базе механизмов с параллельной кинематикой [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Подленко Олег Николаевич. – Хабаровск, 2005. – 145 с.

4. Подзоров, П.В. Синтез технологического оборудования на основе механизмов параллельной кинематики [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Подзоров Павел Викторович. – М., 2003. – 392 с.

5. Иванов, А.В. Обеспечение качественных показателей компоновки станка-манипулятора с параллельной кинематикой [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Иванов Александр Васильевич. – Хабаровск, 2006. – 115 с.

6. Яковець, В.П. Аналітична геометрія [Текст] : навч. посібник / В.П. Яковець, В.Н. Боровик, Л.В. Ваврикович. – Суми : ВТД «Університетська книга», 2004. – 296 с.

7. Макаров, Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad [Текст] : учебн. курс / Е.Г. Макаров. – СПб : Питер, 2005. – 448 с.