

УДК 618.718.4

В.В. Волков, аспирант,

А.М. Поляков, доцент, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: victorius86@bk.ru, apolyakov.mail@gmail.com

КОНСТРУКЦИЯ И КИНЕМАТИКА СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ИМПЛАНТИРУЕМЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ С ПРИВОДАМИ НА ОСНОВЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МУСКУЛОВ

Предлагается новая конструкция стенда-симулятора на основе шестистепенной платформы Стюарта для испытаний имплантируемых металлоконструкций, используемых при лечении заболеваний позвоночника и крупных суставов человека, которая позволяет реализовать сложные законы движения подвижной платформы, в том числе соответствующие требованиям международных стандартов.

Ключевые слова: платформа Стюарта, стенд-симулятор, кинематика, имплантат.

ВВЕДЕНИЕ

Механизмы, в основе которых лежат платформы типа Стюарта, используются для генерации управляемых пространственных движений некоторого твердого тела. Начиная с начала 70-х годов прошлого века и до настоящего времени предложено множество различных структурных схем таких механизмов, отличающихся сочетанием кинематических пар разных типов и расположением стержневых звеньев (ног) относительно подвижной и неподвижной платформ.

Манипуляторы на основе платформ Стюарта имеют параллельную структуру и обладают рядом достоинств, существенных при реализации требуемых пространственных движений жесткой подвижной платформы и каких-либо фиксированных относительно нее деталей или устройств. Такая задача возникает, например, при необходимости испытаний имплантатов, заменяющих элементы позвоночника и систем стабилизации локальных областей позвоночника, например, транспедикулярных или вентральных систем. Известны также примеры использования манипуляторов на основе платформ Стюарта при определении (путем испытаний) биомеханических функций некоторых элементов биологических объектов.

При испытаниях необходимо как можно точнее воспроизводить естественные движения одного из элементов испытываемых систем, а для некоторых имплантатов стандарты жестко определяют условия испытаний. Например, стандарты ISO 18192-1 и ISO 18192-2 регламентируют относительные угловые движения между сочлененными компонентами, структуру приложенной силы, скорость, продолжительность и условия испытаний на износ тотальных эндопротезов межпозвоночных дисков; стандарт ASTM F2077-03 регламентирует проведение испытаний имплантатов межтеловой фиксации (кейджей) и межпозвоночных дисков на усталостную выносливость. В качестве примера на рисунке 1 представлена диаграмма перемещений и нагрузки для испытаний поясничных межпозвоночных имплантатов согласно требованиям стандартов ISO/DIS 18192-1 и ASTM F2077-03.

Опыт использования манипуляторов на основе платформ Стюарта для генерации самых разнообразных пространственных движений твердого тела позволяет говорить и об их эффективности при моделировании пространственных движений элементов позвоночника в процессе испытаний.

Целью данной работы является кинематический синтез манипулятора на основе взаимнообратного обобщенного алгоритма решения прямой и обратной задачи кинематики, а так же обоснование выбора типоразмеров приводов платформы.

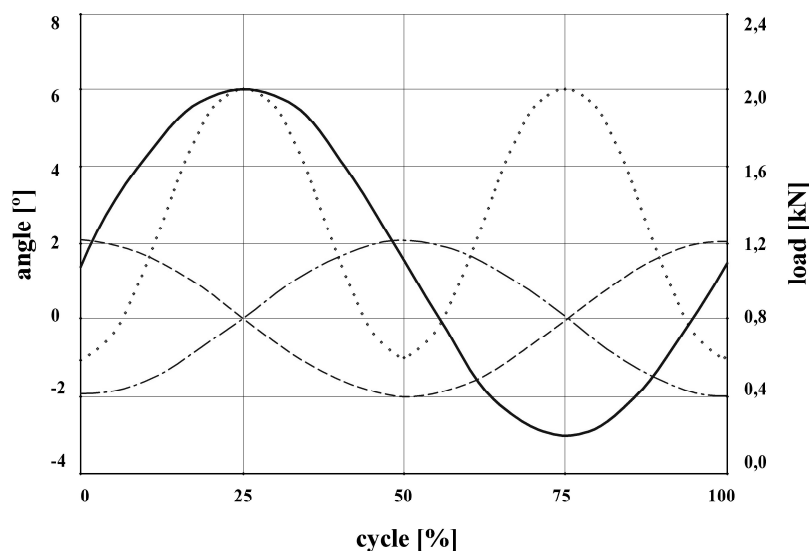
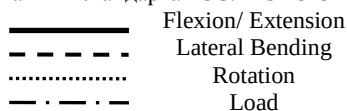


Рисунок 1 – Диаграмма перемещений и нагрузки для испытаний поясничных межпозвоночных имплантатов согласно требованиям стандарта ISO/DIS 18192-1 – три степени свободы по перемещениям:



1. КИНЕМАТИКА ПЛАТФОРМЫ СТЮАРТА

Для параметрического синтеза платформы необходимо решение прямой и обратной задач кинематики, которые формулируются следующим образом:

- прямая задача – определить положение и ориентацию подвижной платформы при известных длинах стреловых звеньев;
- обратная задача – определить длины стреловых звеньев при заданном положении и ориентации подвижной платформы.

Обратная задача кинематики в наиболее полной форме одним из первых была сформулирована и решена Е.Ф. Fichter [1]. Она имеет единственное и очень простое решение. Решение же прямой задачи кинематики достаточно сложно и приводит к множеству различных конфигураций платформы при заданных длинах стреловых звеньев. В связи с этим, в конце 80-х – начале 90-х годов прошлого века, ее решению отводилось одно из центральных мест в исследовании платформ Стюарта. Численным методом полиномиального продолжения (a numerical technique of polynomial continuation) было установлено, что для платформы общей геометрии существует до 40 различных решений прямой задачи кинематики [2]. В статье [3], опубликованной через год после [2], авторы, приведя постановку прямой задачи кинематики к канонической форме, показали, что в общем случае платформа может иметь до 64 различных конфигураций, соответствующих заданным длинам стреловых звеньев.

Известно также множество других работ посвященных решению задач кинематики платформ Стюарта, в которых использовались как численные, так и аналитические методы. К настоящему времени, как отмечается, например в [4], канонические задачи кинематики принципиально решены практически для любых возможных компоновок платформ, но исследования в этой области продолжаются, т.к. нерешенными остаются некоторые косвенные задачи. В частности — не решена задача выбора единственного решения прямой задачи кинематики из множества возможных, определяющего «желаемую» конфигурацию платформы. Решение этой задачи важно при силовом анализе, параметрическом синтезе конструкции и системы управления приводами платформы.

Конфигурационное пространство шестистепенной платформы Стюарта определяется условиями замкнутости шести векторных контуров (рисунок 2):

$$\vec{r}_{0O_1} + R \cdot \vec{a}_{1A_i} - \vec{b}_{0B_i} = \vec{l}_i, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, 6$, $\vec{r}_{0O_1} = \overrightarrow{O_0O_1} = \begin{pmatrix} x_{0O_1} & y_{0O_1} & z_{0O_1} \end{pmatrix}^T$ – вектор, соединяющий начало O_0 глобальной декартовой ортонормированной системы координат $O_0x_0y_0z_0$, связанной с неподвижной платформой, с началом O_1 подвижной декартовой ортонормированной системы координат $O_1x_1y_1z_1$, связанной с

подвижной опорой; $\vec{a}_{1A_i} = \overrightarrow{O_1 A_i} = (x_{1A_i} \ y_{1A_i} \ z_{1A_i})^T$ – вектор, соединяющий точку O_1 с центром сферической кинематической пары A_i , заданный в системе координат $O_1 x_1 y_1 z_1$; $\vec{b}_{0B_i} = \overrightarrow{O_0 B_i} = (x_{0B_i} \ y_{0B_i} \ z_{0B_i})^T$ – вектор, соединяющий точку O_0 с центром сферической кинематической пары B_i , заданный в системе координат $O_0 x_0 y_0 z_0$; $\vec{l}_i = \overrightarrow{B_i A_i}$ – вектор, соединяющий точки B_i и A_i , заданный в системе координат $O_0 x_0 y_0 z_0$; R – матрица преобразования координат; оператор $(\cdot)^T$ обозначает транспонированный вектор $(\cdot)$.

Вращение подвижной платформы будем описывать углами Эйлера, представляя их в виде вектора $\Gamma = (\psi \ \vartheta \ \phi)^T$. В этом случае матрица R имеет вид [5]:

$$R = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \psi - \sin \phi \sin \psi \cos \vartheta & \cos \phi \sin \psi + \sin \phi \cos \psi \cos \vartheta & \sin \phi \sin \vartheta \\ -\sin \phi \cos \psi - \cos \phi \sin \psi \cos \vartheta & -\sin \phi \sin \psi + \cos \phi \cos \psi \cos \vartheta & \cos \phi \sin \vartheta \\ \sin \vartheta \sin \psi & -\sin \vartheta \cos \psi & \cos \vartheta \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Пусть $\|(\cdot)\| = (\cdot)^T (\cdot)$ – норма вектора $(\cdot)$. Тогда, приравняв нормы векторов в левой и правой части (1), получим:

$$\|\vec{r}_{0O_1} + R \cdot \vec{a}_{1A_i} - \vec{b}_{0B_i}\| = \|\vec{l}_i\|, \quad (3)$$

или:

$$\vec{r}_{0O_1}^T \cdot \vec{r}_{0O_1} + \vec{a}_{1A_i}^T \cdot \vec{a}_{1A_i} + \vec{b}_{0B_i}^T \cdot \vec{b}_{0B_i} + 2\vec{r}_{0O_1}^T \cdot (R\vec{a}_{1A_i}) - 2\vec{r}_{0O_1}^T \cdot \vec{b}_{0B_i} - 2\vec{b}_{0B_i}^T \cdot (R\vec{a}_{1A_i}) - \vec{l}_i^T \cdot \vec{l}_i = 0. \quad (4)$$

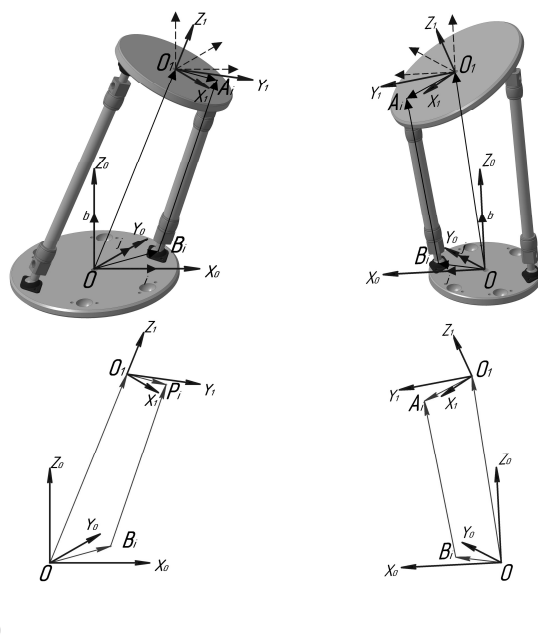


Рисунок 2 – Замкнутые векторные контуры платформы и системы координат:
а) с большим диаметром неподвижной платформы; б) с большим диаметром подвижной платформы

Левые части уравнения связей платформы представляют собой систему функций $\Psi_i(\vec{Q})$, $\Psi_i(\vec{Q}) = 0$, $i = 1, 2, \dots, 6$, с векторным аргументом $\vec{Q} = (x_{O_1} \ y_{O_1} \ z_{O_1} \ \psi \ \vartheta \ \phi)^T$, которую можно трактовать как вектор-функцию $\vec{\Theta}(\vec{Q})$ векторного аргумента $\vec{Q}$:

$$\vec{\Theta}(\vec{Q}) = (\Psi_1(\vec{Q}) \ \Psi_2(\vec{Q}) \ \Psi_3(\vec{Q}) \ \Psi_4(\vec{Q}) \ \Psi_5(\vec{Q}) \ \Psi_6(\vec{Q}))^T \quad (5)$$

Таким образом, матрица Якоби системы уравнений имеет вид:

$$H = \frac{\partial \vec{\Theta}(\vec{Q})}{\partial \vec{Q}^T} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \Psi_1}{\partial x_{O_1}} & \frac{\partial \Psi_1}{\partial y_{O_1}} & \frac{\partial \Psi_1}{\partial z_{O_1}} & \frac{\partial \Psi_1}{\partial \varphi} & \frac{\partial \Psi_1}{\partial \vartheta} & \frac{\partial \Psi_1}{\partial \psi} \\ \frac{\partial \Psi_2}{\partial x_{O_1}} & \frac{\partial \Psi_2}{\partial y_{O_1}} & \frac{\partial \Psi_2}{\partial z_{O_1}} & \frac{\partial \Psi_2}{\partial \varphi} & \frac{\partial \Psi_2}{\partial \vartheta} & \frac{\partial \Psi_2}{\partial \psi} \\ \frac{\partial \Psi_3}{\partial x_{O_1}} & \frac{\partial \Psi_3}{\partial y_{O_1}} & \frac{\partial \Psi_3}{\partial z_{O_1}} & \frac{\partial \Psi_3}{\partial \varphi} & \frac{\partial \Psi_3}{\partial \vartheta} & \frac{\partial \Psi_3}{\partial \psi} \\ \frac{\partial \Psi_4}{\partial x_{O_1}} & \frac{\partial \Psi_4}{\partial y_{O_1}} & \frac{\partial \Psi_4}{\partial z_{O_1}} & \frac{\partial \Psi_4}{\partial \varphi} & \frac{\partial \Psi_4}{\partial \vartheta} & \frac{\partial \Psi_4}{\partial \psi} \\ \frac{\partial \Psi_5}{\partial x_{O_1}} & \frac{\partial \Psi_5}{\partial y_{O_1}} & \frac{\partial \Psi_5}{\partial z_{O_1}} & \frac{\partial \Psi_5}{\partial \varphi} & \frac{\partial \Psi_5}{\partial \vartheta} & \frac{\partial \Psi_5}{\partial \psi} \\ \frac{\partial \Psi_6}{\partial x_{O_1}} & \frac{\partial \Psi_6}{\partial y_{O_1}} & \frac{\partial \Psi_6}{\partial z_{O_1}} & \frac{\partial \Psi_6}{\partial \varphi} & \frac{\partial \Psi_6}{\partial \vartheta} & \frac{\partial \Psi_6}{\partial \psi} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Якобиан J платформы определяется как определитель матрицы:

$$J = \det H = \det \frac{\partial \vec{\Theta}(\vec{Q})}{\partial \vec{Q}^T}. \quad (7)$$

Система скалярных уравнений связей (4) и якобиан (7) полностью определяют геометрическую кинематику шестистепенной платформы Стюарта: рабочее пространство, конфигурационное пространство, включающее, в том числе, и сингулярные конфигурации, решения прямой и обратной задачи кинематики.

2. КИНЕМАТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МАНИПУЛЯТОРА

Основная цель создания стенда-симулятора – испытания конструктивных элементов, используемых при лечении заболеваний позвоночника методом моделирование движений его элементов. Таким образом, стенд проектируется для выполнения определенной задачи, но, по возможности, должен быть универсальным с точки зрения возможности моделирования различных движений платформы в заданных пределах изменения компонент вектора $\vec{Q}$. В качестве приводов предлагается использовать пневмомускулы типа DMSP/MAS производства фирмы FESTO [6].

Структура стенда представляется жесткой неподвижной платформой, которая связана с подвижной платформой с помощью шести искусственных мышц, каждая из которых крепится к обеим платформам с помощью сферических шарниров. В среде Solidworks разработаны трехмерные модели стендов различных типов с целью оценки их функциональных возможностей и выбора оптимального, с точки зрения кинематики, динамики и управления, варианта. Стенд может быть смонтирован на базе универсальной разрывной машины, например IR5145-5, на неподвижном основании которой крепится неподвижная платформа. Модель позвоночника с одной стороны жестко закрепляется с помощью концевых элементов на подвижной платформе манипулятора, с другой – на верхней (подвижной) траверсе разрывной машины. Такая конфигурация позволяет испытывать различные по длине модели позвоночника, а также задавать в широких диапазонах требуемое начальное нагружение.

Пусть заданы шесть периодических функций компонент вектора $\vec{Q}$, характеризующих заданное движение подвижной платформы:

$$x_{O_1} = f_1(t) = f_1(t + T_x), \dots, \psi = f_6(t) = f_6(t + T_\psi). \quad (8)$$

Соответственно, периоды этих функций: $T_x, T_y, T_z, T_\varphi, T_\vartheta, T_\psi$. В общем случае они могут быть равными, кратными или же не кратными. В случае, когда периоды кратные, каждая из функций считается периодической с наибольшим периодом $T = \max(T_x, T_y, T_z, T_\varphi, T_\vartheta, T_\psi)$. В случаях не кратных периодов одна или несколько функций модифицируются так, чтобы периоды всех функций были кратными.

Требуется определить длины стержневых элементов стенда для каждого положения и ориентации платформы, т.е. решить обратную задачу кинематики.

Система уравнений (4) имеет простое аналитическое решение. В качестве иллюстраций на рисунке 4 приведены графики зависимостей $l_i = g_i(k)$, $i = 1, 2, \dots, 6$, полученные для компонент вектора $\vec{Q}$:

$$x_{O_1} = f_1(k) = 0; \quad y_{O_1} = f_2(k) = 0; \quad z_{O_1} = f_3(k) = 0,355 - 0,005 \cos(2\pi k); \quad \psi = f_4(k) = -\frac{\pi}{180} \cos(\pi k);$$

$\vartheta = f_5(k) = \frac{\pi}{180} \cos(\pi k)$; $\varphi = f_6(k) = \frac{1,7\pi}{180} + \frac{4,3\pi}{180} \sin(\pi k)$, которые подобраны таким образом, чтобы соответствовать диаграмме, представленной на рисунке 1, т.е. для соблюдения требований стандарта ISO/DIS 18192-1. Графики зависимостей компонент вектора $\vec{Q}$ от $k \in (0,2)$ представлены на рисунке 3.

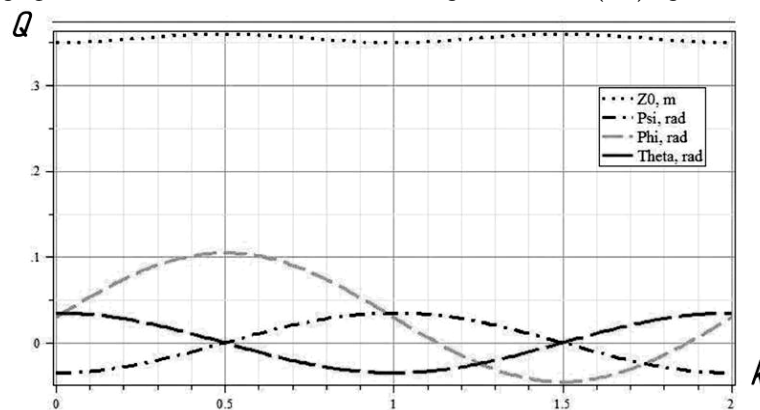


Рисунок 3 – Графики зависимостей компонент вектора $\vec{Q}$ от $k \in (0,2)$

Решения получены для варианта, при котором опоры A_i смещены по отношению к опорам B_i на угол $\frac{\pi}{3}$; радиус расположения шарниров на неподвижной опоре: $R_B = 0,15$ м; радиус расположения шарниров на подвижной опоре: $R_A = 0,1$ м.

Считая время t безразмерным, примем наибольший период равным k ($T = k$) и разобьем его на достаточно большое число n равных частей так, чтобы:

$$\forall j \in [0, n], \forall f_k, k = 1, 2, \dots, 6 : \max |f_k(j+1) - f_k(j)| \rightarrow 0 \quad (9)$$

В n точках вычислим значения длин стержневых звеньев $l_i = g_i(j)$, $j = 0, 1, \dots, n$ и решим прямую задачу кинематики, т.е. в каждой из точек решим систему (4) при известных значениях $l_i = g_i(j)$.

Фактически на данном этапе прямую задачу кинематики можно считать решенной, так как найдено отображение $F: \vec{Q} \rightarrow \vec{L}$ при условии

$$F^{-1}(\vec{L}) = \{\vec{Q} \in \vec{Z} : F(\vec{Q}) \in \vec{L}\} \quad (10)$$

Т.е., отображение F можно считать взаимно однозначным при заданных законах изменения компонент вектора $\vec{Q}$.

Но это же решение может быть получено одним из численных методов, например, методом, предложенном в [7]. При этом, считая известной начальную конфигурацию платформы, на каждом из n шагов в качестве начальных приближений могут быть взяты значения компонент вектора $\vec{Q}$, полученные на предыдущем шаге. Такая процедура желательна с точки зрения проверки устойчивости решения прямой задачи кинематики в смысле единственности ее решения. Малым изменениям длин стержневых звеньев (компонент вектора $\vec{L}$: $\delta \vec{L} = (\delta l_1 \ \delta l_2 \ \delta l_3 \ \delta l_4 \ \delta l_5 \ \delta l_6)^T$) должны соответствовать малые и единственные изменения компонент вектора $\vec{Q}$, $\delta \vec{Q} = (\delta x_{0O_1} \ \delta y_{0O_1} \ \delta z_{0O_1} \ \delta \varphi \ \delta \vartheta \ \delta \psi)$. Следовательно, итерационные процессы решений системы (4) на каждом шаге, при выборе начальных приближений предложенным способом, должны приводить к единственным и, в общем случае, как было отмечено выше, известным решениям. Другими словами, для всех возможных комбинаций вектора $\vec{L}$ платформа должна принимать единственную конфигурацию из множества возможных.

Для выполнения условия (1) необходимо, чтобы для всех возможных векторов $\vec{Q}$ при реализации заданных законов движения якобиан платформы (7) был бы отличным от нуля.

Действительно, так как система (4) справедлива для всех возможных векторов $\vec{Q}$ и $\vec{L}$, то вариация вектора $\vec{\Theta}(\vec{Q})$ может быть записана следующим образом:

$$\delta\bar{\Theta} = \frac{\partial\bar{\Theta}}{\partial\bar{Q}^T} \delta\bar{Q} + \frac{\partial\bar{\Theta}}{\partial\bar{L}^T} \delta\bar{L} = 0, \quad (11)$$

поскольку вектор-функция $\bar{\Theta}$ является и функцией векторного аргумента $\bar{L}$.

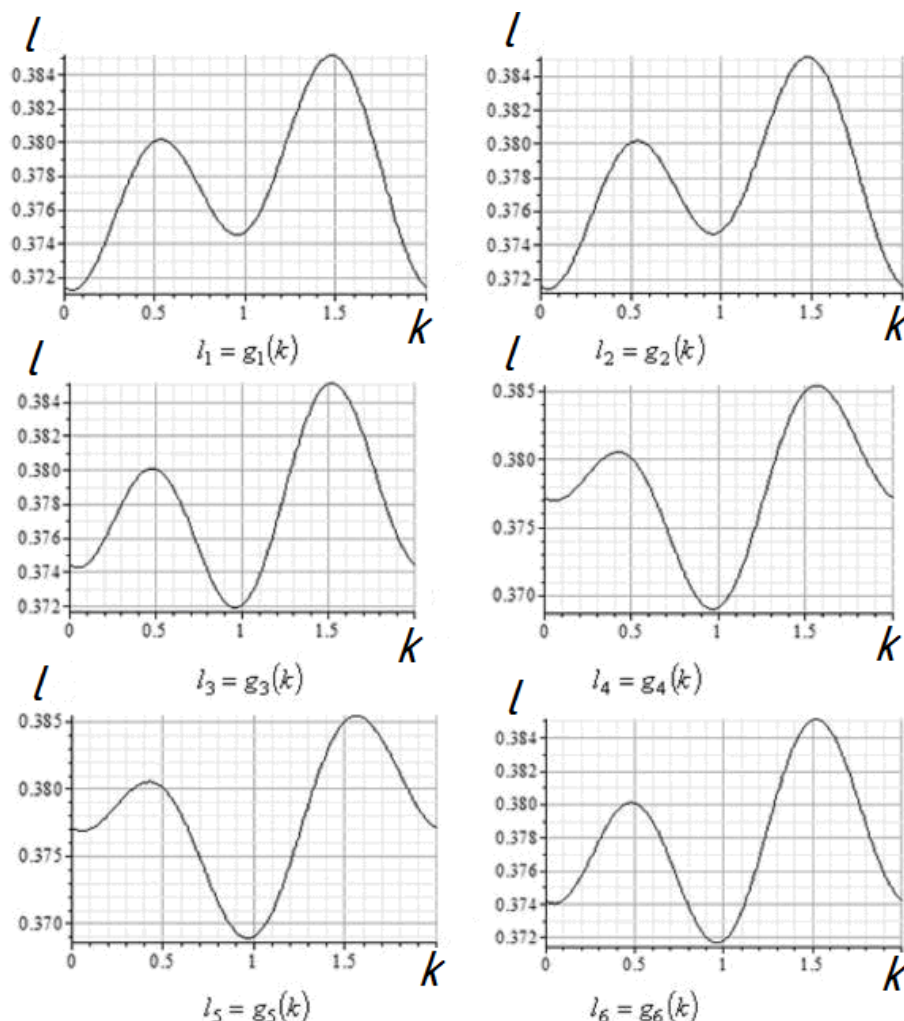


Рисунок 4 – Графики зависимости длин стержневых звеньев $l_i = g_i(k)$, $k = 1, 2, \dots, 6$ при реализации заданных законов изменения компонент вектора $\bar{Q}$: $\|\overrightarrow{OB_i}\| = 0.1_m$; $\|\overrightarrow{OA_i}\| = 0.1_m$

Таким образом, из (11) получим:

$$\delta\bar{Q} = -\left(\frac{\partial\bar{\Theta}}{\partial\bar{Q}^T}\right)^{-1} \frac{\partial\bar{\Theta}}{\partial\bar{L}^T} \delta\bar{L}. \quad (12)$$

Обратная матрица $\left(\frac{\partial\bar{\Theta}}{\partial\bar{Q}^T}\right)^{-1}$ существует только в том случае, когда матрица $\frac{\partial\bar{\Theta}}{\partial\bar{Q}^T}$ невырожденная; следовательно, как и было отмечено выше, якобиан платформы для всех возможных векторов $\bar{Q}$ должен быть отличен от нуля: $J = \det H = \det \frac{\partial\bar{\Theta}(\bar{Q})}{\partial\bar{Q}^T} \neq 0$.

Кроме этого, можно показать, что последнее условие важно не только с кинематической, но и с динамической точки зрения, пусть, например, главный вектор $\bar{F}$ и главный момент $\bar{M}$ внешних сил, приложенных к подвижной платформе, представлены в виде вектора $\bar{P}$:

$$\bar{P} = (F_x \quad F_y \quad F_z \quad M_x \quad M_y \quad M_z). \quad (13)$$

Предположим, что компоненты вектора $\vec{M}$ вычислены относительно полюса подвижной платформы (точка O_1). В случае идеальных связей для любых возможных перемещений звеньев платформы должно выполняться условие:

$$\vec{P}^T \cdot \delta \vec{Q}^* + \vec{R}^T \cdot \delta \vec{L} = 0, \quad (14)$$

где $\vec{R} = (R_1 \ R_2 \ R_3 \ R_4 \ R_5 \ R_6)^T$ – вектор обобщенных сил; $\delta \vec{Q}^* = \begin{pmatrix} \delta \vec{r}_0 \\ \delta \vec{\Gamma}^* \end{pmatrix}$; $\delta \vec{\Gamma}^* = B \cdot \delta \vec{\Gamma}$;

$\delta \vec{r}_0 = (\delta x_{0O_1} \ \delta y_{0O_1} \ \delta z_{0O_1})^T$; $\delta \vec{\Gamma} = (\delta \psi \ \delta \vartheta \ \delta \varphi)^T$; матрица B определяется проекциями бесконечно малых поворотов на оси неподвижной системы координат, связанной с основанием платформы (13):

$$B = \begin{pmatrix} 0 & \cos \psi & \sin \psi \sin \vartheta \\ 0 & \sin \psi & -\cos \psi \sin \vartheta \\ 1 & 0 & \cos \vartheta \end{pmatrix}.$$

Перепишем условие (14), введя новую матрицу $\Phi = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & B \end{pmatrix}$, где $I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$:

$$\vec{P}^T \cdot \Phi \cdot \delta \vec{Q} = -\vec{R}^T \cdot \delta \vec{L}.$$

Учитывая теперь (12), получим: $\vec{R}^T = \vec{P}^T \cdot \Phi \cdot \left(\frac{\partial \vec{\Theta}}{\partial \vec{Q}^T} \right)^{-1} \frac{\partial \vec{\Theta}}{\partial \vec{L}^T}$ или

$$\vec{R} = \left(\left(\frac{\partial \vec{\Theta}}{\partial \vec{Q}^T} \right)^{-1} \frac{\partial \vec{\Theta}}{\partial \vec{L}^T} \right)^T \cdot \Phi^T \cdot \vec{P}. \quad (15)$$

Для большей наглядности вычислим норму вектора обобщенных сил $\|\vec{R}\|$:

$$\|\vec{R}\| = \vec{R}^T \vec{R} = \frac{1}{\det \left(\frac{\partial \vec{\Theta}}{\partial \vec{Q}^T} \right)^2} \cdot \vec{P}^T \cdot \left(\vec{\Theta}' \cdot \frac{\partial \vec{\Theta}}{\partial \vec{L}^T} \right) \cdot \left(\vec{\Theta}' \cdot \frac{\partial \vec{\Theta}}{\partial \vec{L}^T} \right)^T \cdot B \cdot \vec{P}, \quad (16)$$

где принято, что $\left(\frac{\partial \vec{\Theta}}{\partial \vec{Q}^T} \right)^{-1} = \frac{1}{\det \left(\frac{\partial \vec{\Theta}}{\partial \vec{Q}^T} \right)} \cdot \vec{\Theta}'$; $\vec{\Theta}'$ – матрица, присоединенная к якобиевой.

Анализ выражения (16) показывает, что в сингулярных конфигурациях и даже вблизи их обобщенные уравнивающие платформы силы стремятся к бесконечности. Следовательно, при проектировании платформы необходимо так подбирать ее кинематические параметры, чтобы при реализации требуемого закона движения якобиан был бы не только отличен от нуля во всех возможных конфигурациях, но и был как можно большим по модулю.

3. ВЫВОДЫ

Для испытаний элементов позвоночника, искусственных имплантатов, систем фиксации и т.д. могут быть использованы стенды-симуляторы (манипуляторы) на основе шестистепенных платформ Стюарта. Такие стенды способны с высокой точностью воспроизводить различные законы движения элементов позвоночника, в том числе, и в соответствии с требованиями международных стандартов.

Одним из наиболее важных критериев синтеза манипулятора является норма якобиана

$$\|J\| = \left(\det \left(\frac{\partial \vec{\Theta}}{\partial \vec{Q}^T} \right) \right)^2 > 0 \Rightarrow \max. \quad (17)$$

При заданном законе движения не каждая компоновка платформы соответствует критерию (17), но в результате кинематического синтеза такая компоновка может быть найдена или, по крайней мере, путем варьирования кинематических параметров может быть найдена такая компоновка, при которой в течение одного цикла работы будет выполнено условие

$$\forall \vec{Q} : \|J\| = \left(\det \left(\frac{\partial \vec{\Theta}}{\partial \vec{Q}^T} \right) \right)^2 \neq 0. \quad (18)$$

На практике для каждого конкретного испытания и в соответствии с условиями испытаний необходимо реализовать оригинальную компоновку платформы, что не представляет больших затрат труда при условии сборки конструкции на основе стандартных модулей.

Требованиям модульности конструкции в полной мере удовлетворяют приводы на основе пневмомускулов. Для стенда-симулятора, реализующего закон движения, использованный в данной работе, была выбрана конкретная модель пневмомускула производства фирмы FESTO – DMSP-40-400N-RM-RM со следующими параметрами: конструкция – шланг, армированный прочными нитями; режим работы – одностороннего действия, тянущий; внутренний диаметр – 40 мм; номинальная длина (стандартная длина равна внутреннему диаметру $\times 10$) – 400 мм; максимальная дополнительная нагрузка, свободно подвешенная – 250 кг; максимальное допустимое сокращение – 25 % от номинальной длины; максимальное растяжение – 3 % от длины шланга; рабочее давление – 0...6 бар; усилие при максимально допустимом рабочем давлении – 6000 Н; масса – 0,707 кг; ресурс работы – от 100 тыс. до 10 млн. циклов переключений при обычном применении; подвод воздуха – радиально, с двух сторон (RM-RM). Долговечность пневмомускула зависит от режима работы, особенно если имеет место нагрев, вызванный деформацией и дополнительной нагрузкой. Поэтому по рекомендациям FESTO был выбран пневмомускул типа **RM-RM** с подводом/отводом воздуха с двух сторон, в случае которого значительно снижается нагрев мускула и увеличивается срок его службы.

Перспективой дальнейших исследований является анализ якобиана манипулятора для различных вариантов компоновки платформы и соотношений кинематических параметров.

Библиографический список использованной литературы

1. Fichter E.F. A Stewart Platform-Based Manipulator: General Theory and Practical Construction / E.F. Fichter // Int. Journ. Robot. Res. — 1986. — Vol. 5. — № 2. — P. 157–182.
2. Raghavan M. The Stewart Platform of General Geometry Has 40 Configurations / M. Raghavan // Journ. Mech. Des. — 1993. — Vol. 115. — № 2. — P. 277–232.
3. Dasgupta B. A canonical formulation of the direct position kinematics problems for a general 6-6 Stewart platform / B. Dasgupta, T.S. Mruthyunjaya // Mechanism and Machine Theory. — 1994. — Vol. 29. — № 6. — P. 819–827.
4. Турлапов В.Е. Решение задач кинематики для платформ Стюарта методом группы нулевого порядка / В.Е. Турлапов // Прикладная геометрия. — 2002. — № 5. — С. 23–40.
5. Фу К. Робототехника / К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли. — М.: Мир, 1989. — 622 с.
6. Пневматический мускул MAS [Электронный ресурс]. — FESTO, 2010. — Режим доступа: http://www.festo.com/INetDomino/coorp_sites/ru/1b433eb8d078cbd2c1256c7e0039bf43.htm Friday, 13 August 2000 03:25:13.
7. Polyakov A. A numerical solving algorithm for polynomial equation systems / A. Polyakov // Applied Automatic Systems: Proceedings of selected AAS 2009 papers — 2009, Scopje-Istanbul, 26-29 September. — Scopje-Istanbul, 2009. — P.109–112.

Поступила в редакцию 04.02.2011 г.

Волков В.В., Поляков О.М. Конструкція й кінематика стенда з приводом на основі пневматичних м'язів для випробувань металоконструкцій, що імплантуються

Пропонується нова конструкція стенда-симулятора на основі шестиступеневої платформи Стюарта для випробувань металоконструкцій, що імплантуються та використовуються для лікування захворювань хребта і великих суглобів людини і дозволяє реалізувати складні закони руху рухомої платформи, в тому числі такі, що відповідають вимогам міжнародних стандартів.

Ключові слова: платформа Стюарта, стенд-симулятор, кінематика, імплантат.

Volkov V.V., Polyakov A.M. Design and kinematics of a stand on the basis of pneumatic muscle for testing implantable metalwork

Developed is a new design of the stand-simulator based on a six-degree Stewart platform for testing implantable metalwork, used to treat diseases of the spine and large joints of man, which allows for fairly sophisticated laws of motion of the mobile platforms, including relevant international standards are proposes.

Keywords: Stewart platform, stand-simulator, kinematics, implant.