

in parts from single depth images, *VISAPP International Conference on Computer Vision Theory and Applications*. February 2013. pp. 119–135.

6. **Kefer M., Kubinger W.** Evaluation of Kinect Depth Sensor for Use in Mobile Robotics, *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium*, 2011, vol. 22, no. 1.

7. **Knuth D.** Section 6.1: Sequential Searching. Sorting and Searching. *The Art of Computer Programming 3*, Addison-Wesley, 1997, pp. 396–408.

8. **Muja M., Lowe D. G.** Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration, *VISAPP International Conference on Computer Vision Theory and Applications*, 2009, pp. 331–340.

9. **Mount D. M., Arya S.** ANN: A Library for Approximate Nearest Neighbor Searching, available at: <http://www.cs.umd.edu/~mount/ANN/> (date of access: 05.11.2014).

10. **Connor M.** The Simple, Thread-safe Approximate Nearest Neighbor (STANN), available at: <https://sites.google.com/a/comgeom.com/stann/Home> (date of access: 05.11.2014).

11. **Forsyth D.A., Ponce J.** *Computer Vision: A Modern Approach, Robotics and Autonomous Systems*, 2006, vol. 11, no. 3, pp. 84–92.

12. **Review** information on the nearest neighbor algorithm, available at: <http://www.basegroup.ru/library/analysis/regression/knn/> (date of access 05/11/2014).

УДК 62-522.7

DOI: 10.17587/mau.16.470-475

П. А. Лошицкий, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., p.loshitskiv@rtc.ru,

Е. Е. Шеховцова, конструктор, shehovcova@rtc.ru,

Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт
робототехники и технической кибернетики

Расчет и моделирование работы промышленного манипулятора на силовых оболочковых элементах

На примере одного из вариантов промышленного манипулятора рассмотрена возможность успешного применения силовых оболочковых элементов типа "пневматический мускул" в качестве исполнительного привода в степенях подвижности манипулятора, а также показаны преимущества данной конструкции по сравнению с уже существующими аналогами.

Ключевые слова: силовой оболочковый элемент, пневматический привод, манипулятор

Введение

На сегодняшний день существует множество различных видов промышленных роботов, в которых применены различные типы приводов и реализуются различные кинематические схемы. В то же время разработчики современных робототехнических систем не очень активно применяют в своих разработках новые элементы приводной техники, предпочитая традиционные виды приводов. Такая ситуация существенно замедляет появление на рынке новых разработок в области автоматизации производственных процессов, обладающих лучшими

технично-экономическими показателями по сравнению с существующими аналогами.

По мнению авторов, одним из таких типов приводов, незаслуженно обделенных вниманием со стороны разработчиков, являются силовые оболочковые элементы (СОЭ) типа "пневматический мускул" (ПМ). СОЭ типа ПМ представляет собой гибкую трубчатую оболочку, армированную нерастяжимыми нитями, на концах которой закреплены присоединительные фланцы. При подаче сжатого воздуха в полость оболочки происходит ее расширение в диаметральном направлении и, как следствие, сокращение оболочки в осевом направлении. Более подробно о СОЭ типа ПМ (далее по тексту СОЭ) можно прочитать в работах [1–4].

На основе анализа силовых характеристик СОЭ (рис. 1) [1] можно выделить основные достоинства и недостатки силовых элементов.

К достоинствам можно отнести высокие значения развиваемого усилия, особенно в начальном положении, высокую удельную мощность и отсутствие сухого трения и люфтов между перемещающимися частями, что позволяет работать на ползучих скоростях. К основным недостаткам можно отнести малое значение перемещения относительно длины СОЭ и существенное падение развиваемого усилия при сокращении СОЭ. Тем не менее, несмотря на существенные ограничения, которыми обладает данный тип СОЭ, они могут успешно применяться в различной приводной технике, в том

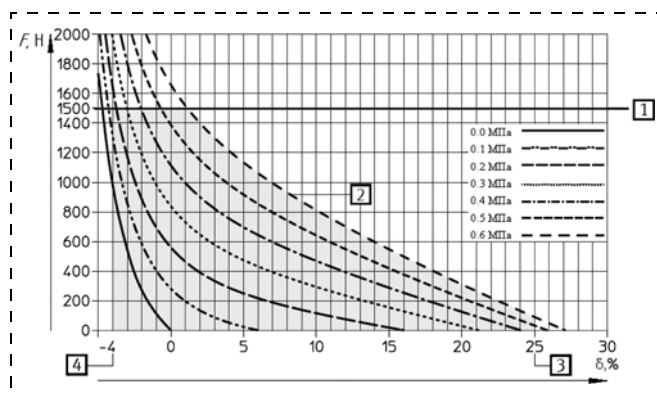


Рис. 1. Силовые статические характеристики СОЭ типа ПМ с диаметром оболочки 20 мм (F — развиваемая сила, δ — относительное сокращение СОЭ)

числе и манипуляционных системах. При этом использование СОЭ позволит существенно упростить конструкцию изделий, снизить ее стоимость и повысить надежность. Кроме того, использование пневматических приводов в ряде случаев более выгодно по сравнению с электромеханическими приводами, например, при работах на взрыво- и пожароопасных объектах. В то же время указанные недостатки СОЭ в ряде случаев могут компенсироваться за счет применения тех или иных компоновочных решений при проектировании приводов на СОЭ, что будет показано в рассматриваемом в статье примере.

Выбор кинематической схемы манипулятора и исполнительного привода

В данной статье рассмотрим возможность применения СОЭ в манипуляторах с грузоподъемностью до 2 кг, относящихся к легкой группе (от 1 до 5 кг) [5]. В основном манипуляторы рассматриваемой группы работают на конвейерных линиях, где, получая команды от технического зрения, они выполняют сортировку, укладку (установку) или отбраковку идущего по ленте конвейера продукта. Производительность таких систем составляет примерно 60...90 операций в минуту в зависимости от сложности выполняемых операций. Таким образом, можно утверждать, что в большинстве случаев рабочие зоны, в которых работает манипулятор, находятся в одной или двух плоскостях. Исходя из этого предположения рассмотрим кинематическую схему, приведенную на рис. 2.

В данной кинематической схеме присутствует линейная степень подвижности на конце стрелы манипулятора. Такая схема манипулятора позволяет избежать перемещения захватного устройства в вертикальной плоскости за счет вертикального перемещения самих губок. Это, в свою очередь, дает возможность выполнить степени подвижности 2 и 3 пассивными, движение этих степеней будет определяться движением степени подвижности 1. Возможен вариант без линейных степеней подвижности, тогда пассивной может быть только степень подвижности 3, однако в этом случае придется реализовать высокоточный привод не только в степени 1, но и в степени 2. В то же время линейную степень подвижности в захвате можно реализовать с помощью стандартного пневмоцилиндра, работающего по двум-трем положениям, что значительно выгоднее с точки зрения стоимости применяемых комплектующих. При этом надо учитывать, что расположение привода непосредственно во второй степени подвижности может не позволить достичь требуемых характеристик манипулятора из-за значительного увеличения массы стрелы манипулятора и, соответственно, ее инерционности. Как следствие, потребуются вынесение привода из второй степени подвижности на основании, что не позволит получить выгоду от упрощения конструкции по

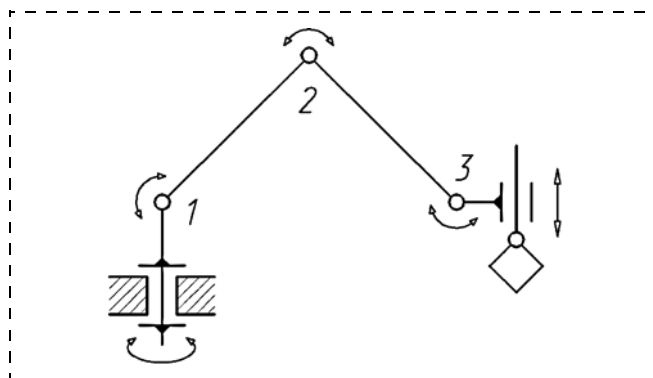


Рис. 2. Кинематическая схема манипулятора

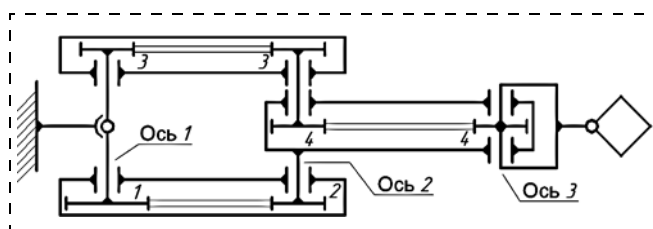


Рис. 3. Кинематическая схема манипулятора с двумя зависимыми степенями подвижности

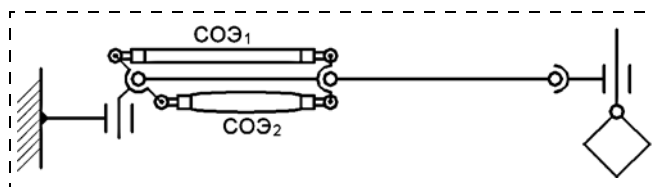


Рис. 4. Расположение СОЭ относительно звеньев манипулятора

сравнению с рассматриваемой кинематической схемой. Таким образом, кинематическая схема манипулятора, в которой реализованы зависимые степени подвижности 2 и 3 относительно степени подвижности 1, представлена на рис. 3.

В данной кинематической схеме соотношение диаметров шкивов 1 и 2 должно быть равно 2:1, это обеспечит при повороте первого звена вокруг оси на угол α поворот второго звена вокруг оси 2 на угол -2α . Диаметр шкивов 3 и 4 может быть выбран из конструктивных соображений при сохранении их расположения, как показано на рис. 4.

В связи с небольшим ходом СОЭ наиболее выгодно расположить их вдоль звена манипулятора, при этом существенного влияния на массу звена они не окажут. В то же время это позволит увеличить их ход. Расположение СОЭ относительно звеньев манипулятора представлено на рис. 4.

В данной схеме усилие, развиваемое СОЭ₁, увеличивается вместе с ростом весового момента от стрелы манипулятора, и наоборот, когда СОЭ₁ максимально сокращен и имеет минимальное усилие, нагрузка на него также минимальна. СОЭ₂ в данном случае используется как возвратный элемент и не испытывает существенной нагрузки.

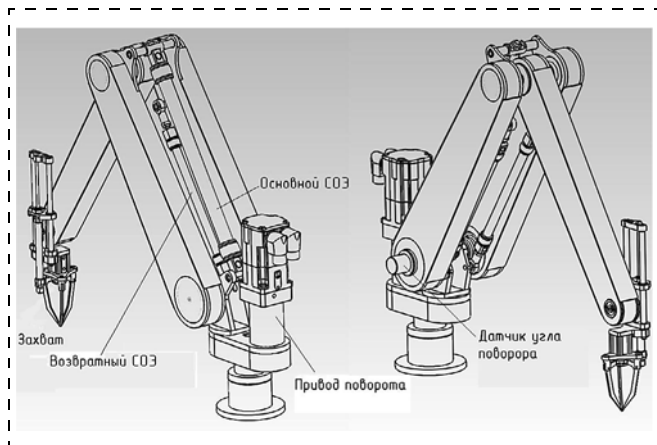


Рис. 5. Внешний вид манипулятора

Элементы манипулятора	Масса, кг	Расстояние между осями, м	Расстояние до центра масс звена, м	Момент инерции, кг · м ²
Звено 1	3,6	0,4	0,23	0,2275
Звено 2	1,6	0,4	0,21	0,096
Захватное устройство	0,9	—	—	0,0033
Нагрузка	1,5	—	—	0,0365

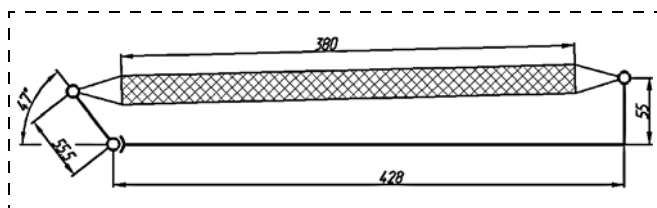


Рис. 6. Присоединительные размеры для основного СОЭ

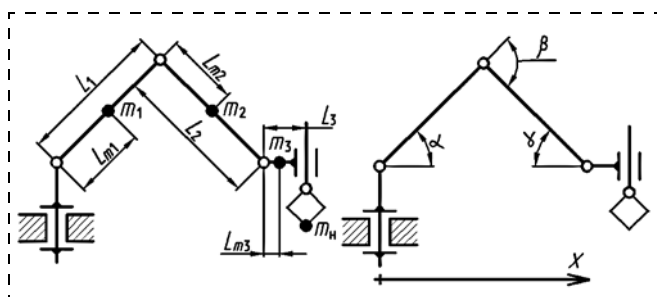


Рис. 7. Расчетная схема манипулятора

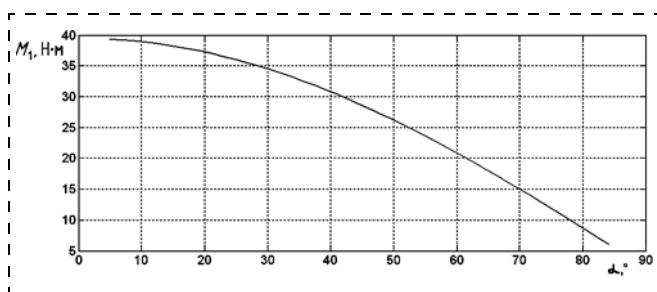


Рис. 8. Зависимость весового момента от угла наклона стрелы манипулятора

Для выбора типоразмеров СОЭ и их длин необходимо знать массу звеньев и моменты их инерции относительно осей вращения. Общий вид манипулятора представлен на рис. 5.

Данный манипулятор имеет ряд отличий по сравнению с представленной выше кинематической схемой. В нем добавлена степень подвижности для ориентации захвата. Массогабаритные параметры звеньев манипулятора и параметры нагрузки приведены в таблице, в качестве максимальной нагрузки, перемещаемой в захвате, принята нагрузка в 1,5 кг, что вполне достаточно для рассматриваемого нами круга задач.

Также в ходе компоновки было получено расположение точек для крепления СОЭ, представленное на рис. 6.

В данные габаритные размеры удалось вписать СОЭ с диаметром оболочки 20 мм и длиной 380 мм. Силовые характеристики СОЭ для данных размеров приведены на рис. 1. Данные присоединительные размеры позволяют осуществлять наклон первого звена от 5 до 85°, при этом максимальное сокращение СОЭ — 18 %, что укладывается в рабочий диапазон СОЭ (см. рис. 1).

Статический и динамический расчет манипулятора

Рассчитали весовой момент манипулятора на основе схемы, представленной на рис. 7, с использованием следующих обозначений:

l_i — длина i -го звена; l_{mi} — расстояние до i -го центра масс; m_i — масса i -го звена; J_i — момент инерции i -го звена ($i = 1, 3$); m_H, J_H — масса нагрузки и ее момент инерции относительно оси вращения захватного устройства.

Согласно кинематическим взаимосвязям имеем следующие соотношения между углами α, β и γ :

$$\beta = -2\alpha; \gamma = \alpha. \quad (1)$$

Тогда весовой момент в шарнире 1 (см. рис. 3) будет равен

$$M_1 = m_1 g L_{m1} \cos \alpha + (L_1 + L_{m2}) m_2 g \cos \alpha + ((L_1 + L_2) \cos \alpha + L_{m3}) m_3 g + ((L_1 + L_2) \cos \alpha + L_3) m_H g. \quad (2)$$

Поскольку активной является только первая степень подвижности, то нет необходимости рассчитывать момент в других степенях подвижности. При этом учтем, что в рассматриваемой конструкции манипулятора (см. рис. 5) величины L_3 и L_{m3} равны нулю, поскольку захватное устройство расположено на оси вращения последней степени подвижности. Графически зависимость (2) представлена на рис. 8.

Сравним найденную характеристику с моментом, развиваемым СОЭ.

На рис. 9 приведена расчетная схема, позволяющая связать изменения угла α , относительного сокращения СОЭ δ и плеча h приложения силы, развиваемой СОЭ.

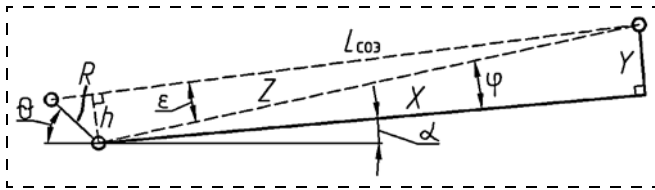


Рис. 9. Расчетная схема для определения развиваемого СОЭ момента

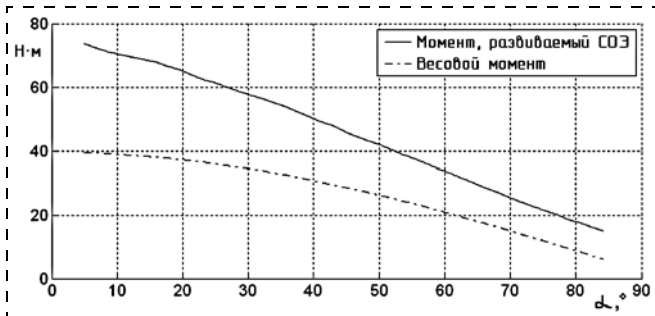


Рис. 10. Зависимость развиваемого СОЭ момента от угла наклона стрелы манипулятора

Найдем гипотенузу Z и угол φ :

$$Z = \sqrt{X^2 + Y^2}; \quad \varphi = \arctg \frac{Y}{X}. \quad (3)$$

По теореме косинусов найдем $L_{COЭ}$:

$$L_{COЭ} = \sqrt{R^2 + Z^2 - 2RZ \cos(\pi - \alpha - \varphi - \theta)}. \quad (4)$$

Угол ε найдем с помощью теоремы синусов:

$$\frac{L_{COЭ}}{\sin(\pi - \alpha - \varphi - \theta)} = \frac{R}{\sin \varepsilon}. \quad (5)$$

С учетом соотношений (5) и (3) найдем изменение плеча h :

$$h = Z \sin \varepsilon = \sqrt{X^2 + Y^2} \frac{R}{L_{COЭ}} \sin(\pi - \alpha - \theta - \arctg \frac{Y}{X}). \quad (6)$$

Относительное сокращение СОЭ δ найдем по формуле

$$\delta(\alpha) = \frac{L_{COЭ}(0) - L_{COЭ}(\alpha)}{L_{COЭ}(0)} \cdot 100 \%. \quad (7)$$

Используя силовую характеристику СОЭ (см. рис. 1) и выражения (6) и (7), построим характеристику развиваемого СОЭ момента и сравним его с моментом, найденным по формуле (2) (рис. 10).

Как видно из рис. 10, выбранный СОЭ создает достаточное усилие для преодоления весового момента. Так как данный манипулятор должен работать с достаточно высокой производительностью, динамическая нагрузка может оказаться достаточно существенной и также должна быть учтена.

Для расчета возникающих динамических нагрузок при работе манипулятора необходимо задать характер движения захвата от времени, что позволит определить перемещение всех остальных звеньев. Как уже упоминалось ранее, производительность

систем такого класса должна быть равна 60...90 операциям в минуту, поэтому зададим в качестве максимального времени подъема стрелы манипулятора значение $t_{\max} = 0,75$ с, что соответствует максимальному рабочему циклу 1,5 с. Такое значение времени выбрано исходя из того факта, что при работе манипулятор должен будет выполнять различные по продолжительности циклы, что в среднем позволит попасть в нужную производительность.

В качестве координаты перемещения захвата примем x (см. рис. 7), а в качестве переменной времени — t . Крайние положения захвата найдем из выражений:

$$\begin{aligned} x_0 &= (L_1 + L_2) \cos \alpha_0; \\ x_{\max} &= (L_1 + L_2) \cos \alpha_{\max}. \end{aligned} \quad (8)$$

Как было сказано выше, угол α изменяется от 5 до 85° .

При заданной требуемой производительности существенным вопросом становится выбор характера движения звеньев манипулятора. В целях снижения динамических нагрузок на исполнительный привод и обеспечения плавности старта и торможения захватного устройства в качестве характера движения последнего звена зададим следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) &= C_1 \sin\left(\pi \frac{2}{t_{\max}} t\right); \\ \dot{x}(t) &= -\frac{C_1 t_{\max}}{2\pi} \cos\left(\pi \frac{2}{t_{\max}} t\right) + C_2; \end{aligned} \quad (9)$$

$$x(t) = -\frac{C_1 t_{\max}^2}{4\pi^2} \sin\left(\pi \frac{2}{t_{\max}} t\right) + C_2 t + C_3.$$

Постоянные коэффициенты C_1 , C_2 и C_3 в соотношениях (9) найдем с учетом граничных условий:

$$x(0) = x_0, \quad x(t_{\max}) = x_{\max}, \quad \dot{x}(0) = 0. \quad (10)$$

Тогда имеем

$$C_2 = C_1 \frac{t_{\max}}{2\pi}, \quad C_3 = x_0, \quad C_1 = \frac{2(x_{\max} - x_0)\pi}{t_{\max}^2},$$

или

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) &= \frac{2(x_{\max} - x_0)\pi}{t_{\max}^2} \sin\left(\pi \frac{2}{t_{\max}} t\right); \\ \dot{x}(t) &= -\frac{x_{\max} - x_0}{t_{\max}} \cos\left(\pi \frac{2}{t_{\max}} t\right) + \frac{x_{\max} - x_0}{t_{\max}}; \\ x(t) &= -\frac{x_{\max} - x_0}{2\pi} \sin\left(\pi \frac{2}{t_{\max}} t\right) + \frac{x_{\max} - x_0}{t_{\max}} t + x_0. \end{aligned} \quad (11)$$

Графически найденные зависимости представлены на рис. 11.

Найдем зависимость изменения угла α от x :

$$\begin{aligned} x(t) &= (L_1 + L_2) \cos \alpha(t); \\ \alpha(t) &= \arccos\left(\frac{x(t)}{L_1 + L_2}\right). \end{aligned} \quad (12)$$

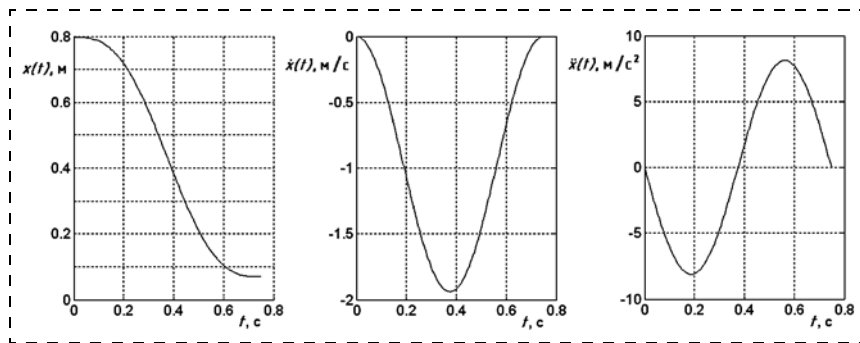


Рис. 11. Зависимости координаты, скорости и ускорения захватного устройства от времени

Найдем угловую скорость и ускорение дифференцированием соотношений (12):

$$\dot{\alpha}(t) = -\frac{\dot{x}(t)}{\sqrt{(L_1 + L_2)^2 - x(t)^2}}; \quad (13)$$

$$\ddot{\alpha}(t) = -\frac{\dot{x}((L_1 + L_2)^2 - x(t)^2) + x(t)\dot{x}(t)}{((L_1 + L_2)^2 - x(t)^2)\sqrt{(L_1 + L_2)^2 - x(t)^2}}.$$

Зная зависимости $x(t)$ и $\alpha(t)$, найдем изменение кинетической энергии системы T :

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_H, \quad (14)$$

где T_i — кинетическая энергия i -го звена; T_H — кинетическая энергия переносимого объекта.

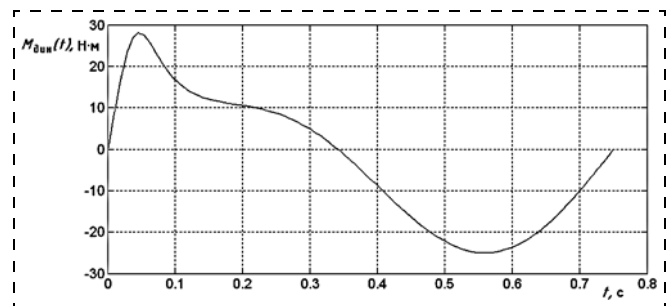


Рис. 12. Динамический момент, возникающий при работе СОЭ

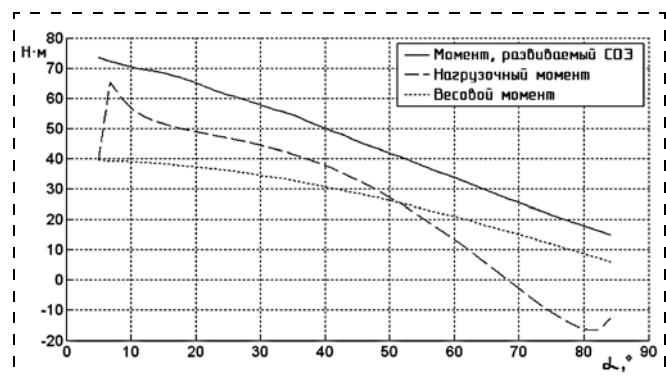


Рис. 13. Полный нагрузочный момент и момент, развиваемый СОЭ, в зависимости от изменения угла наклона стрелы манипулятора

Так как первое звено совершает только вращательные движения относительно оси 1 (рис. 3), имеем:

$$T_1 = J_1 \frac{\dot{\alpha}^2}{2}. \quad (15)$$

Второе звено перемещается в пространстве вслед за поворотом первого и при этом само совершает поворот вокруг оси 2:

$$T_2 = J_2 \frac{\dot{\beta}^2}{2} + m_2 \frac{(L_1 \dot{\alpha})^2}{2}. \quad (16)$$

Третье звено (захватное устройство) поворачивается вокруг оси 3 и совершает поступательное движение, описываемое $x(t)$:

$$T_3 = J_3 \frac{\dot{\gamma}^2}{2} + m_3 \frac{\dot{x}^2}{2}. \quad (17)$$

Для нагрузки запишем аналогичное выражение, заменив массу звена на массу нагрузки:

$$T_H = J_H \frac{\dot{\gamma}^2}{2} + m_H \frac{\dot{x}^2}{2}. \quad (18)$$

Соответственно, используя выражения (1), (11) и (13)—(18), имеем:

$$T = (J_1 + 4J_2 + J_3 + J_H + m_2 L_1^2) \frac{\dot{\alpha}^2}{2} + (m_3 + m_H) \frac{\dot{x}^2}{2}. \quad (19)$$

Работа, совершаемая СОЭ при перемещении стрелы манипулятора в каждый момент времени, будет равна кинетической энергии системы. Тогда, чтобы найти необходимую мощность исполнительного привода, продифференцируем выражение (19):

$$P(t) = \frac{dT}{dt} = (J_1 + 4J_2 + J_3 + J_H + m_2 L_1^2) \dot{\alpha} \ddot{\alpha} + (m_3 + m_H) \dot{x} \ddot{x}. \quad (20)$$

В то же время мощность рассчитывается следующим образом:

$$P(t) = M_{\text{дин}}(t) \dot{\alpha}(t), \quad (21)$$

где $M_{\text{дин}}(t)$ — динамический момент.

Тогда, используя (13), (20) и (21), найдем динамический момент:

$$M_{\text{дин}}(t) = \frac{P(t)}{\dot{\alpha}(t)} = (J_1 + 4J_2 + J_3 + J_H + m_2 L_1^2) \ddot{\alpha}(t) - (m_3 + m_H) \sqrt{(L_1 + L_2)^2 - x(t)^2} \ddot{x}(t). \quad (22)$$

Используя исходные данные из таблицы, построим зависимость (22) (рис. 12).

Используя выражения (11) и (12), можно представить зависимость (22) как функцию не времени, а угла α , подразумевая при этом, что угол α изменяется во времени согласно зависимости (12). Это позволит найти полный нагрузочный момент на СОЭ при работе манипулятора (рис. 13).

Поскольку СОЭ является приводом одностороннего действия и развивает усилие только в одном на-

правлении, то для обеспечения отрицательного момента как раз служат возвратные СОЭ (см. рис. 4, 5). Учитывая, что момент, который требуется развить возвратным СОЭ, достаточно мал (рис. 13) и при данных значениях углов возвратные СОЭ как раз развивают усилие, близкое к максимальному, данный момент будет обеспечиваться возвратными СОЭ с существенным запасом.

Вывод

Как видно из рис. 13, выбранная схема манипулятора и используемые в ней СОЭ, позволяют работать с требуемой нагрузкой при заданной производительности. К преимуществам данного манипулятора можно отнести тот факт, что перемещение захвата в заданное положение осуществляется двумя приводами в отличие от других манипуляторов, где число приводов не менее трех (например, триподы). Учитывая этот факт, данный манипулятор может успешно применяться для сортировки, отбраковки и укладки продуктов на конвейерных

лентах, выигрывая по сравнению с другими изделиями за счет более низкой стоимости. Наличие в манипуляторе дополнительных степеней подвижности, таких как линейное перемещение захвата, не окажет существенного влияния на стоимость изделия из-за своей простоты и низкой стоимости комплектующих.

Список литературы

1. **Пневмомускул** MAS. URL: http://www.festo.com/cat/ru_ru/data/doc_m/PDF/RU/MAS_RU.pdf.
2. **Sárosi J., Fabulya Z.** New Function Approximation for the Force Generated by Fluidic Muscle // *International Journal of Engineering, Annals of Faculty of Engineering Hunedoara*. 2012. Vol. 10 (2). P. 105–110.
3. **Gang Wang, Norman M. Wereley, Thomas Pillsbury.** Non-linear quasi-static model of pneumatic artificial muscle actuators // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. March 2015. Vol. 26, N. 5. P. 541–553.
4. **Шароватов В. Т., Лошицкий П. А.** Математическая модель силового оболочкового бесштокового пневмоцилиндра двустороннего действия оболочкового типа // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2012. № 4. С. 24–30.
5. **Спыну Г. А.** Промышленные роботы. Конструирование и применение. Учеб. пособ. Киев, Высшая школа, 1991, 311 с.

Calculation and Simulation of an Industrial Manipulator on the Power of the Shell Elements

P. A. Loshitskiy, p.loshitskiy@rtc.ru✉, **E. E. Shehovcova**, shehovcova@rtc.ru,
Central Research and Development Institute for Robotics and Technical Cybernetics,
St.-Petersburg, Russian Federation

*Corresponding author: Loshitskiy Peter A., Ph. D., Senior Researcher,
Central Research and Development Institute for Robotics and Technical Cybernetics,
St.-Petersburg, Russian Federation, e-mail: p.loshitskiy@rtc.ru*

*Received on June 11, 2014
Accepted March 23, 2015*

The purpose of this article is to present an example of an industrial manipulator, a possibility of successful application of power shell elements such as a pneumatic muscle as an actuator. The power shell elements have such advantages as low weight, high power density, high speed, no backlash and dry friction in the moving parts. These advantages make the power shell elements a promising actuator for various robotic systems, including manipulation. A manipulator's design calculation and its kinematic scheme make it suitable to work in the assembly lines and implement the function of sort or rejection of products. To meet these requirements, the calculation is based on the manipulator's working efficiency of 60–90 cycles per minute and capacity of up to 2 kg. These initial data present an important problem of reduction the inertia of the boom geometry. This problem is solved due to certain power actuators of the shell elements and use of the passive degrees of freedom. The article presents a possible kinematic scheme for such a manipulator, its external appearance and approximate weight and size parameters of its units. In the article the manipulator's characteristics are proved by the static and dynamic calculations. The static analysis took into consideration the current weight loads from the parts of the manipulator in its various configurations. The dynamic analysis of the selected parts of the trajectory of the manipulator is based on the most optimal mode in terms of the emerging dynamic loads and the calculations are done with their account. In order to prove a possibility of application of the force elements as actuators of the manipulator, the total load is presented, which is exerted on them by the movement of the manipulator jib, and which is compared with the characteristics of the power shell elements. At the end of the article the conclusions and analysis of the results are presented.

Keywords: power shell component, pneumatic actuator, manipulator

For citation:

Loshitskiy P. A., Shehovcova E. E. Calculation and Simulation of an Industrial Manipulator on the Power of the Shell Elements, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 7, pp. 470–475.

DOI: 10.17587/mau.16.470-475

References

1. **Пневмомускул** MAS, available at: http://www.festo.com/cat/ru_ru/data/doc_ru/PDF/RU/MAS_RU.pdf.
2. **Sárosi J., Fabulya Z.** New Function Approximation for the Force Generated by Fluidic Muscle, *International Journal of Engineering, Annals of Faculty of Engineering Hunedoara*, 2012, vol. 10 (2), pp. 105–110.
3. **Gang Wang, Norman M. Wereley, Thomas Pillsbury.** Non-linear quasi-static model of pneumatic artificial muscle actuators, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, March 2015, vol. 26, no. 5, pp. 541–553.
4. **Sharovатов V. T., Loshitskii P. A.** *Matematicheskaya model' silovogo obolochkovogo besshtokovogo pnevmotsilindra dvustoronnego deistviya obolochkovogo tipa* (Mathematical Model of the Power Pneumocylinder without a Rod of Bilateral Action Membrane Type), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 4, pp. 24–30 (in Russian).
5. **Spynu G. A.** *Promyshlennyye roboty. Konstruirovaniye i primeneniye* (Manufacturing automatics. Design and Application), Kiev, Vysshaya shkola, 1991, 311 p. (in Russian).