

УДК 621.865.8

Пневматические мускулы и их применение в робототехнических системах

*Алыков А.Н., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Робототехнические системы и мехатроника»*

*Драницкий И.О., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Робототехнические системы и мехатроника»*

*Усачёв К.А., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Робототехнические системы и мехатроника»*

*Научный руководитель: Романова И. К., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Робототехнические системы и мехатроника»
sm7@sm.bmstu.ru*

1. Введение

В современном мире развитие техники всецело направлено на увеличение нагрузок, снижение весовых и габаритных характеристик, повышение надежности и расширение функциональных возможностей систем. С появлением новых материалов и развитием технологических процессов, становится возможным использование новых технических подходов, упрощающих решение традиционных задач. Многие рабочие процессы, ранее осуществлявшиеся с помощью громоздких и сложных в эксплуатации систем, благодаря развитию науки и создаваемым на этой основе техническим средствам, становятся значительно проще и надежнее, при одновременном снижении затрат на оборудование и эксплуатационных расходов.

Одним из ярчайших примеров данного явления является распространение в технике двигателей оболочкового типа, или по-другому «пневматических мускулов».

Пневматический мускул – это эластичный механизм, состоящий из мягкой оболочки, сжатого рабочего газа, систем газонаполнения, контрольно-исполнительных приборов для программного обеспечения автоматического управления.

Принцип действия таких оболочковых двигателей во многом основан на подражании работе скелетных мускулов живых существ: при первичном утолщении,

мышца развивает тянущее усилие, и кости, к которым она прикреплена, по мере ее осевого сокращения, подтягиваются друг к другу. В основе данного механизма лежит известное физическое явление: появление значительного осевого усилия при натяжении горизонтальной нити. (Например, провод, выдерживающий десятки тонн осевой нагрузки, обрывается под действием нескольких десятков килограмм налипшего на него снега).

Анализ механических характеристик мускулов у животных показывает их высокие характеристики: большая удельная мощность, широкий интервал рабочих скоростей, плавность работы и возможность точного позиционирования в большом диапазоне нагрузок. Неудивительно возникновение желания использовать этот метод механического воздействия в технике, но, несмотря на то, что данный вид конструкций был давно описан в исследованиях многих ученых, практическое осуществление этой концепции стало возможным лишь недавно, с появлением новых технологий и высокопрочных, податливых деформациям синтетических материалов.

2. Устройство механических мышц

Механические мышцы представляют собой пневматическую систему из эластичной оболочки, армированной гибкими нерастяжимыми связями (рис. 1).

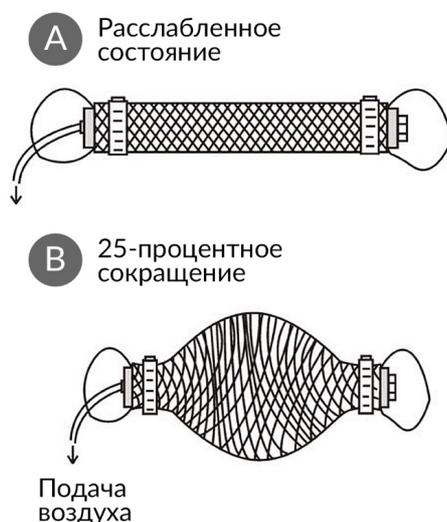


Рис. 1. Принцип работы пневматической мышцы

Подобно человеческим мышцам, для создания воздействия, происходит сокращение: в герметичную полость, снаружи опутанную гибкими связями, с помощью компрессора и системы клапанов, нагнетается рабочее тело – обычно воздух, при

повышении давления (обычно до 0,5 – 0,8 МПа из-за ограниченной прочности материала), оболочка раздувается, растет объем, увеличивая радиальные расстояния полости. В это же время, за счёт нерастяжимости окаймляющих связей, из-за сохранения их длины, появляются усилия, уменьшающие осевые размеры системы.

Предельное состояние сжатия такой мышцы — шар. При достижении данной формы оболочки, дальнейшее увеличение объема рабочего тела невозможно и привод перестает совершать работу.

Без учета деформации материала оболочки, процессы, происходящие в механических мышцах, описываются простейшими уравнениями термодинамики. За бесконечно малый промежуток времени, в оболочку подается бесконечно малая масса газа dm , а объем оболочки увеличивается на величину dV . Тогда работа по увеличению объема рассчитывается в соответствии с формулой:

$$dW_m = pdV.$$

Так как увеличение объема сопровождается изменением длины мышцы на dl , работа по преодолению внешней нагрузки:

$$dW_l = -Fdl.$$

Приравняв два выражения, получим, что тянущее усилие, создаваемое оболочковым приводом, будет определяться следующим выражением:

$$F = -p \frac{dV}{dl}.$$

Из данного уравнения видно, что усилие, развиваемое пневматической мышцей, будет пропорционально величине $-dV/dl$, называемой эффективной площадью привода, по аналогии с традиционным пневматическим цилиндром. При увеличении объема от минимального до предельного, усилие уменьшается от F_{max} до нуля. В тоже время, величина создаваемой силы растет с увеличением относительного давления в оболочке p (рис. 2).

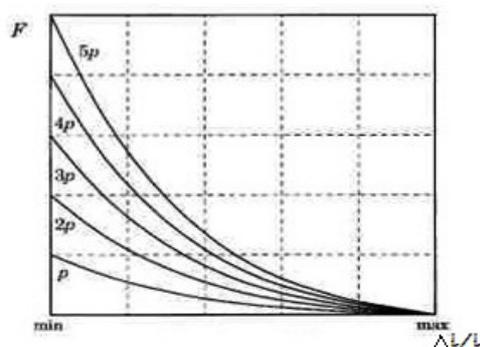


Рис. 2. Силовая характеристика привода

Необходимо отметить, что оболочковый актуатор данного типа, как и природный прообраз, является приводом одностороннего действия – то есть, работающим исключительно на сокращение. При нагнетании давления, создается сила, направленная на уменьшение линейного размера мышцы, но обратного процесса не происходит. Для возврата системы в исходное «расслабленное» состояние, а так же для возможности двухсторонней работы привода, чаще всего применяются схемы, в которых мышцы делают парными – то есть, антогонистами (рис. 3). В такой паре, одна отвечает за сжатие, а ее антогонист – за растяжение.

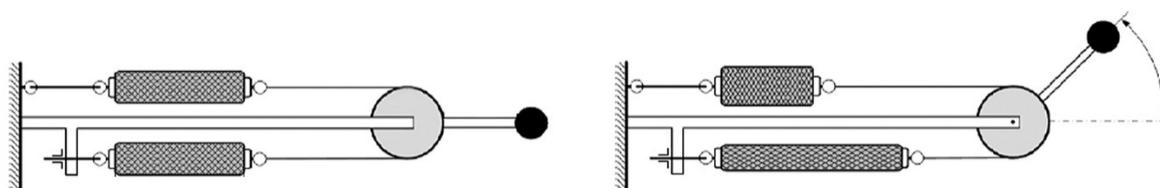


Рис. 3. Мышцы-антогонисты

Как указывалось ранее, тянущее усилие мышцы определяется уравнением

$$F = -p \frac{dV}{dl}.$$

Из этого уравнения можно выделить некоторые закономерности работы пневматической мышцы:

- Развиваемое усилие прямо пропорционально величине давления газа в оболочке;
- Развиваемое усилие прямо пропорционально изменению объема с учетом длины (аналогия эффективной площади привода в традиционном пневмоцилиндре).

В пневмоцилиндре площадь поршня остается неизменной в независимости от перемещения. В отличие от этого, в пневматических мышцах по мере сокращения длины от l_{max} до l_{min} объем увеличивается от V_{min} до V_{max} , эффективная площадь привода уменьшается, а усилие уменьшается от F_{max} до нуля. Теоретически при нулевом сокращении развиваемое усилие стремится к бесконечности.

Жесткость пневмомышцы можно определить по формуле

$$K = \frac{dF}{dl} = -\frac{dp}{dV} \left(\frac{dV}{dp} \right)^2 - p \frac{d^2V}{dl^2}.$$

Первая составляющая определяется сжимаемостью газа. Вторая – переменной эффективной площадью в условиях изобарного процесса. Так же можно заметить, что увеличение давления увеличивает жесткость привода.

При использовании антагонистической пары (рис. 4) тянущие усилия для каждой мышцы будут определяться уравнениями

$$F_1 = -p_1 f_1 (l_{10} - x) \text{ и } F_2 = -p_2 f_2 (l_{20} + x),$$

где f_1 и f_2 - эффективная площадь мышц

x – положение нового равновесного состояния

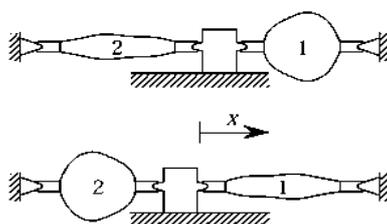


Рис. 4. Мышцы-антагонисты линейного перемещения

Результирующая сила рассчитывается по формуле:

$$F = F_1 - F_2 = -p_1 \frac{dV_1}{dl_1} + p_2 \frac{dV_2}{dl_2} = p_1 \frac{dV_1}{dx} + p_2 \frac{dV_2}{dx}.$$

Жесткость антагонистической пары определяется выражением:

$$K = -\frac{dF}{dx} = -\frac{dp_1}{dV_1} \left(\frac{dV_1}{dx}\right)^2 - \frac{dp_1}{dV_2} \left(\frac{dV_2}{dx}\right)^2 - p_1 \frac{d^2V_1}{dx^2} - p_2 \frac{d^2V_2}{dx^2}.$$

Динамическая модель пневматической мышцы (рис. 5)

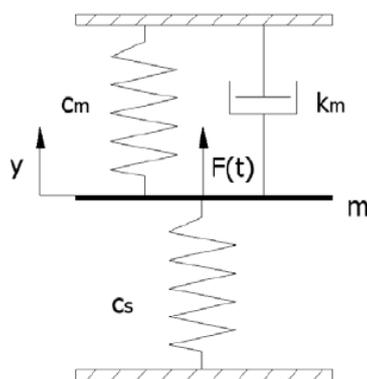


Рис. 5. Динамическая модель:

c_m - жесткость мышцы,
 k_m - коэффициент демпфирования,
 c_s - жесткость пружины нагрузки,
 m - масса нагрузки,
 $F(t)$ – сторонние силы.

Формула динамической модели записывается с использованием уравнения Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_i} = F_i - \frac{\partial E_p}{\partial q_i} - \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где:

E_k – кинетическая энергия,

E_p – потенциальная энергия,

D – энергия рассеивания,

F – нагрузочная сила,

q – перемещение,

$\dot{q} = dq/dt$ – скорость.

Кинетическая энергия модели рассчитывается по формуле:

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i \dot{y}_i^2 = \frac{1}{2} m \dot{y}^2.$$

Производная кинетической энергии выражается формулой:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{y}_1} \right) = m \ddot{y}.$$

Потенциальная энергия определяется по формуле:

$$E_p = -\frac{1}{2} c_m y^2 + \frac{1}{2} c_s y^2 + mgy.$$

Производная потенциальной энергии:

$$\frac{\partial E_p}{\partial y} = -c_m y + c_s y + mg.$$

Энергия рассеивания и ее производная рассчитываются формулами:

$$D = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n k_{mi} \dot{y}_i^2 = \frac{1}{2} k_m \dot{y}^2,$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = k_m \dot{y}.$$

Окончательное уравнение движения описывается формулой:

$$m\ddot{y} - c_m \dot{y} + c_s y + mg = F(t) - k_m \dot{y}.$$

3. Преимущества и недостатки

Преимуществом оболочковых приводов перед традиционными, являются следующие качества:

Механическая мышца обладает инверсной силовой характеристикой (рис. 6). Любой механический двигатель начинает работать от минимальной мощности, которую он увеличивает в процессе разгона, механическая мышца, наоборот, начинает работать от максимальной мощности, которая в конце сокращения снижается до нуля. Это свойство наиболее важное, так как позволяет осуществлять интенсивный разгон привода и последующее его торможение.

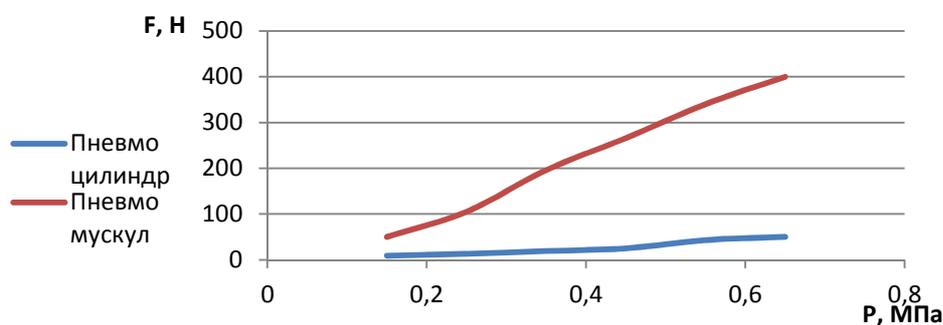


Рис. 6. Сравнительные характеристики «пневмомускула» и стандартного пневматического цилиндра того же диаметра

Существенно низкая стоимость из-за исключения из конструкции различного рода компенсирующих звеньев (подшипниковые опоры), резкое снижение требований на допуски по точности расположения и качеству обработки посадочных мест для мышц в конструкции, что упрощает механическую обработку. Упрощение металлоконструкции привода и технологии его изготовления.

Применение в конструкции механических мышц новых материалов, отсутствие трущихся частей (ей не нужна смазка и техническое обслуживание в период работы), отсутствие люфтов подвижных частей, а также устойчивость материала к агрессивным

условиям, позволяет не только использовать «мышцы» в неблагоприятной среде, но и резко снизить требования к очистке сжатого воздуха от пыли и конденсата. Значит можно исключить из системы индивидуальные блоки подготовки сжатого воздуха и обходиться только компрессорными системы очистки.

Оболочковые двигатели обладают высокой надежностью срабатывания даже при отрицательных температурах эксплуатации. Однозначность связи между совершенным перемещением и давлением в оболочке, в некоторых случаях позволяет отказаться от датчиков положения привода и всех финансовых затрат связанных с установкой и с их стоимостью.

Существует отдельная область применения механических мышц, где они вне конкуренции по ценовым и функциональным показателям. Например, оборудование для производств с жесткими требованиями к стерильности. Другая область применения этих двигателей, из которой в скором будущем будут вытеснены все типовые линейные двигатели – приводы со 100% гарантией надежности. К этой области относятся приводы летательных аппаратов, оборудование ядерных реакторов и подводных лодок. Оболочковые двигатели не могут не сработать, если подан управляющий сигнал. Резкое сокращение мышцы и отсутствие трения исключает вероятность «заедания» элементов привода при деформациях корпусов как тепловых, так и аварийных.

Главный недостаток пневмомыщц – необходимость в компрессоре для нагнетания воздуха. Также к недостаткам можно отнести малую величину диапазона перемещений относительно длины, несколько меньший диапазон рабочих температур в сравнении с традиционными приводами, падение развиваемого усилия при сокращение оболочкового элемента, не реверсивность действий - пневмомускул является приводом одностороннего действия.

В простейшем случае оболочковый двигатель работает как цилиндр одностороннего действия. При изменении внешней силы мускул ведет себя как пружина: он повторяет действие нагрузки. Можно регулировать как усилие предварительного сжатия этой «пневматической пружины», так и ее жесткость. В качестве пружины мускул может работать с постоянным давлением или с постоянным объемом. При этом получаются разные характеристики, что позволяет отлично их сочетать с условиями конкретного применения.

Долговечность пневмомускула зависит от режима работы, особенно если имеет место нагрев, вызванный деформацией и дополнительной нагрузкой.

4. Примеры

Еще в 1950 году врач из Великобритании Джери МакКибен разработал систему пневмомышц для ортопедических целей. С тех пор **McKibbenMuscle** нашли применение не только в искусственных конечностях, но и в робототехнике, биомеханике, промышленности.

Международный концерн Festo является ведущим мировым поставщиком пневматических и электромеханических систем для автоматизации производства различных отраслей промышленности. Контролируемая мощность, моментальное сжатие и разжатие – основные преимущества пневматического мускула MAS (рис. 7). Использование полиамидных волокон в оболочке позволило достичь больших усилий и ускорений даже при больших нагрузках. А область применения пневматических мускулов MAS распространяется от простой системы позиционирования до привода запорно-регулирующей арматуры.



Рис. 7. MAS пневмомускул

Схожесть пневматических и биологических мышц дали возможность воссоздания в металле двигательной активности животных. Наибольших успехов добились японские ученые из университета Осаки в своем проекте «Pneupard» – пневматический гепард. Благодаря использованию искусственных мышц робот, так же как и живой гепард, может похвастаться и скоростью бега, и плавностью походки. Кроме того робот-гепард успешно преодолевает случайные неровности, которые имитируют, например кочки на траве.

5. Выводы

Основные задачи развития приводов на сегодняшний день: увеличение силовых способностей, снижение весовых и габаритных характеристик, повышение надежности и расширение функциональных возможностей систем, нашли свое решение в пневматических мускулах с использованием новых технологий и высокопрочных, податливых деформациям синтетических материалов. Значительных успехов достигли инженеры в повышении управляемости мышцами, которая обеспечивается системой

воздушных клапанов. Но задачей завтрашнего дня будет достижение автономности и мобильности, избавление от громоздкого внешнего двигателя.

Пневматические мышцы используются в качестве альтернативы традиционным пневматическим, электроприводным манипуляторам, как имеющие лучшую удельную мощность и меньшую стоимость. И в последнее десятилетие наблюдается значительное увеличение промышленного и научного использования гибких приводов в медицине, в авиационно-космической промышленности, в био- и промышленной робототехнике, в автоматизации машиностроения и других отраслях.

Список литературы

1. Занозин С.Г., Маслов А.З., Сорокин В.Н., Марти А.Н., Усова Е.В. Механические мышцы MATIS как базовый элемент пропорциональной приводной техники // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2007. №6. С. 30-35.
2. Марти А.Н. Предпосылки создания технических аналогов скелетных мышц // Машиностроитель. 2007. № 4. С. 35–41.
3. Шароватов В.Т., Лошицкий П.А. Математическая модель силового бесштокового пневмоцилин-дра одностороннего действия оболочкового типа // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 2. С. 30–36.
4. Шихирин В.Н., Ионова В.Ф., Шальнев О.В., Котляренко В.И. Эластичные механизмы и конструкции: монография. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. 286 с.
5. Daerden F., Lefebber D. Pneumatic artificial muscles: actuators for robotics and automation // European Journal of Mechanical and Environmental Engineering. Vol. 47. 2002. P. 10-21.
6. Daerden F. Conception and realization of Pleated Pneumatic Artificial Muscles and their use as compliant actuation elements: PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, 1999.
7. Pneumatic muscle – measurement results and simulation models. Available at: <http://bambus.iel.waw.pl/pliki/ogolne/prace%20IEL/240/17.pdf>, accessed 18.03.2015.
8. ТРИЗ – анализ направлений проектирования искусственных мускулов. Режим доступа: http://2045.ru/pdf/kopp_Beliaev_Schukin.pdf, дата обращения 18.03.2015.
9. Pneumatic Artificial Muscles: actuators for robotics and automation. Available at: http://lucy.vub.ac.be/publications/Daerden_Lefebber_EJMEE.pdf, accessed 18.03.2015.