

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МЫШЦ В АЭРОДИНАМИКЕ

### THE USE OF ARTIFICIAL PNEUMATIC MUSCLES IN AERODYNAMICS

**Шевцов А. А.**<sup>1</sup>, студ., **Клоков Д. В.**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
**Жураев С. Р.**<sup>2</sup>, д-р философии по техн. наукам (PhD), доцент,

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Ташкентский государственный технический университет  
им. И. Каримова, г. Ташкент, Узбекистан

F. Shevtsov<sup>1</sup>, Stud., D. Klokov<sup>1</sup>, Ph. D. in Eng., Ass. Prof.,

S. Zhuraev<sup>2</sup>, Doctor of Philosophy in Tech. Scienc. (PhD), Ass. Prof.,

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Tashkent State Technical University named after I. Karimov,  
Tashkent, Uzbekistan

*В данной статье рассматриваются перспективные способы применения искусственных пневматических мышц МакКибена в области аэродинамики.*

*This article discusses promising ways to use mckiben's artificial pneumatic muscles in the field of aerodynamics.*

**Ключевые слова:** *пневматическая искусственная мышца, агонистический, привод.*

**Keywords:** *pneumatic artificial muscle, agonistic, drive.*

#### ВВЕДЕНИЕ:

Поскольку аэрокосмическая промышленность продолжает расширять границы инноваций, поиск более легких, эффективных и адаптируемых систем управления еще никогда не был таким актуальным. Среди множества исследуемых технологий мышцы МакКибена – тип мягкого привода, основанный на биологических системах, становятся принципиально новым решением. Названные в честь сво-

его изобретателя, эти пневматические приводы имитируют сокращение и растяжение мышц, предлагая уникальные преимущества с точки зрения гибкости, снижения веса и энергоэффективности.

На сегодняшний день применение пневматических искусственных мышц в аэрокосмической отрасли достигло своего апогея. были ограниченными, поскольку все исследования проводились в течение последних шести лет. Первым применением, связанным с аэрокосмической отраслью, было использование крупномасштабных мышц МакКибена для обеспечения возможности мягкой посадки и управления для активной парашютной системы (Чжан, Аккорси и Леонард, 2005).

## ВАРИАНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИВОДОВ МАККИБЕНА В МЕХАНИЗАЦИИ КРЫЛА

Хронологически следующим применением в аэрокосмической отрасли в литературе является прототип системы PAM (Pneumatic Artificial Muscle) TEF (рис. 1). Система PAM TEF.



Рисунок 1 – Схематическое описание системы PAM TEF

Приводы PAM также использовались для управления морфингом (рис. 2). Демонстрационный самолет, разработанный автором

и его коллегами Буберт, Вудс, Котера и другими в 2010 году. Исследователи из Техасского университета в Кингсвилле разработали морфинг концепция крыла с использованием РАМ (рис. 3). Это наиболее близкая применение в литературе к концепции, предложенной здесь, и поэтому будет обсуждаться в более подробно.



Рисунок 2 – Модель морфного крыла с приводом МакКибена без давления



Рисунок 3 – Модель морфного крыла с приводом МакКибена под давлением

Хотя эта концепция кажется многообещающей, на данный момент, но еще не проводились испытания прототипа. Его характеристики на испытательном стенде, в аэродинамической трубе или под вращением неизвестны. Влияние эластически приводимой деформированной формы профиля и разрыва на нижней поверхности на аэродинамические коэффициенты не установлено. Аналогично, срок службы актуаторов и механизмов неизвестен.

Другим важным показателем производительности, особенно для активных роторных приложений, является рабочий диапазон частот.

Для достижения цели по снижению вибрации и шума, как правило, требуются частоты активации порядка 50 Гц.

Из-за их принципа работы, пневматические актуаторы РАМ по сути являются однонаправленными актуаторами. Интересно, что их можно спроектировать так, чтобы они генерировали либо сжатие, либо растяжение в зависимости от начального угла спирали заплетенной оболочки. Как правило, силы, создаваемые сокращающимися РАМ, значительно больше, чем у аналогичных по размеру растягивающих РАМ. Кроме того, растягивающие РАМ подвержены возникновению прогиба при активации, особенно при больших длинах. По этим причинам РАМ, изученные в этом исследовании, разработаны для сокращающего действия. Сокращающее действие также более аналогично естественной мышце, что позволяет применять биологически вдохновленные конфигурации и архитектуры.

Если требуется двунаправленное управление, один РАМ можно использовать с пружинной нагрузкой. В этой конфигурации требуется предварительное давление для центрирования выхода в середине рабочего диапазона. Второй вариант – заменить пружину на другой привод МакКибена, чтобы два привода работали в паре как антагонистические/агонитические мышцы. Схематически это показано на рис. 5, этот подход вдохновлен работой мышц в человеческом теле (например, расположение бицепса и трицепса) и имеет преимущество в обеспечении управления как вращением эффектора вокруг оси, так и жесткостью шарниров/суставов.

В антагонистической конфигурации движение в одном направлении обеспечивается за счет надувания агонитического РАМ, в то время как антагонистический РАМ остается вентилируемым в атмосферу. Чтобы двигаться в другом направлении, роли агонита и антагониста меняются. Ранее агонитический РАМ сдувается и становится антагонистом, в то время как ранее антагонистическая мышца под давлением превращается в агонита. Антагонистические конфигурации РАМ являются предпочтительным выбором для систем фланга задней кромки, потому что у них есть нейтральное состояние (т. е. отсутствие давления в обоих РАМ) в центре их диапазона выхода, что создает более плавный режим отказа, чем жесткое состояние над нейтральным в конфигурации РАМ против пружины. Кроме того, антагонистическая конфигурация имеет преимущество изменяемой жесткости шарнира за счет наложения предварительного давления на

оба РАМ. Увеличение давления одновременно в обоих РАМ увеличивает силу в них без изменения угла выхода фланга, что приводит к эффективному увеличению жесткости шарнира.

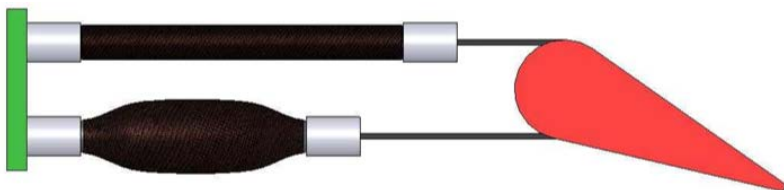


Рисунок 4 – Схема антагонистической пары РАМ, приводящей в действие закрылок заднего края.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИВОДОВ МАККИБЕНА ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ СТРЕЛОВИДНОСТИ КРЫЛЬЕВ

Изменение угла наклона крыльев самолета является важнейшей аэродинамической характеристикой, которая повышает летно-технические характеристики, стабильность и экономичность, особенно при полете на высокой скорости. Регулируя углы наклона крыльев, самолеты могут оптимизировать свои летные характеристики для различных эксплуатационных нужд, что делает эту технологию незаменимой как в военных, так и в передовых аэрокосмических приложениях.



Рисунок 4 - Механизм стреловидности крыла с приводом от сильфонного привода

Используется родственный тип пневматического привода, известный как сильфонный привод. как приводной механизм для механизма стреловидности крыла (де Мармье и Верели, 2003). Хотя оба они изготовлены из армированных эластомерных материалов, пневматический сильфон Приводы отличаются от ПАМ по структуре, геометрии и принципу действия; Приводы растяжения/сжатия. Экспериментальное испытание испытательного образца в масштабе БПЛА продемонстрировали способность антагонистической системы приведения в действие разворачивать и убирать крылья в диапазоне развертки 45 градусов

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование привода МакКибена в аэродинамических элементах знаменует собой важный шаг вперед в создании легких, эффективных, а также маневренных летательных аппаратов и спортивных автомобилей. Благодаря уникальным характеристикам данного привода возможно разрабатывать самолеты и другие машины, существенно снижая их массу и одновременно увеличивая эффективность благодаря более точному управлению и быстрой реакции. Функциональность привода МакКибена обеспечивает точность движения при более простой конструкции способствует появлению новых идей в сфере самолетостроения и машиностроения в целом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Woods, B. K. S. Control system development for pneumatic artificial muscle-driven active rotor systems / B. K. S. Woods, Y. T. Choi, C. S. Kothera, N. M. Wereley // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. – 2013. – № 36(4), P. 1177–1185. [https://doi.org/ 10.2514/1.56528](https://doi.org/10.2514/1.56528).
2. Peel, Larry. “Development of a Simple Morphing Wing Using Elastomeric Composites as Skins and Actuators” / L. Peel // *Journal of Mechanical Design*/. – 2009.
3. Woods, B. Whirl Testing of a Pneumatic Artificial Muscle Actuation System for a Full-Scale Active Rotor / Woods, Benjamin & Kothera, Curt & Wereley, Norman. // *Journal of the American Helicopter Society*. – 2014. – № 59. P. 022006-1–22006-12. <https://doi.org/10.4050/JAHS.59.022006>.

Представлено 20.05.2025