

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ЛИФТА

Цветкова Г.В., Нагхави Я., Аль-Наджар М.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: пневматический лифт, магнитная связь, магнитное взаимодействие.

Аннотация. В статье обсуждаются результаты выполненного многоэтапного проектирования и испытаний пневматического лифта. В конструкции лифта используются два основных физических процесса – во-первых, применение сжатого воздуха для создания подъемной силы, действующей на поршень в трубе, во-вторых, взаимодействие магнитов на поршне с магнитными элементами подвижной тележки лифта. Для достижения цели проекта применялись два основных метода – аналитический метод и метод численного моделирования. Расчеты показывают, что магнитное взаимодействие цилиндрического и кольцевого магнитов обеспечивает достаточно большие силы, способные продвигать полномасштабный лифт.

PNEUMATIC ELEVATOR MOTION CONTROL

Tsvetkova G.V., Naghawi Y., Al-Nadjar M.

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg

Keywords: pneumatic elevator, magnetic coupling, magnetic actuation.

Abstract. A multi-phase project design was carried out; where a pneumatic-based elevator was designed and implemented. The elevator used pneumatic pressurized air as the actuation force to elevate a piston in a pipe, and magnetic coupling were used to couple the piston to the cart. Two design methodologies were used to accomplish the physical design; the theoretical and the simulation. Using calculations, it was proved that the magnetic interaction of cylindrical and ring magnets provides sufficiently large forces that can move a full-scale elevator.

Введение

Целью проекта является разработка конструкции и изготовление лифта, приводимого в движение с помощью пневматики и использующего магнитное взаимодействие для передачи движения. Пневматически нагружаемый поршень находится внутри трубы, а тележка лифта снаружи, поскольку поршень и тележка магнитосвязаны, их движение происходит синхронно.

Для того, чтобы добиться магнитного взаимодействия поршня и тележки лифта, необходимо разместить магниты и на поршне, и на тележке, таким образом, чтобы они взаимодействовали друг с другом. При этом возникает задача найти оптимальное решение для конфигурации магнитной системы, которая позволяет получить максимальные силы при минимальной стоимости.

При проектировании пневматической и магнитной систем использовались теоретические аналитические приближения, которые затем сравнивались с результатами численного моделирования [1, 2]. Для

соответствия критериям анализа надежности расчет компонентов пневматической системы сначала выполнялся аналитически, а затем был верифицирован с помощью программы численного моделирования PTC-Creo 3.0. Для анализа магнитной системы также применялись аналитические методы и программа численного моделирования COMSOL Multiphysics для определения и оптимизации основных параметров магнитных элементов. Также были проведены изготовление и испытание пневматической системы и магнитного взаимодействия в лабораториях механического инженерного отделения Иорданского университета. На I этапе проекта были проработаны механические конструкции лифта, такие, как рельсы, пневматические трубы. На II этапе проекта был выполнен дизайн магнитного и пневматического контуров.

Конструкция пневматической системы

Пневматический лифт

Предлагаемый вариант пневматического лифта имеет две одинаковые трубы. Поскольку тележка лифта должна перемещаться от самой нижней точки до самой верхней, трубы должны продлеваться за самую верхнюю и самую нижнюю точки перемещения тележки. Внутри каждой трубы находится поршень, который перемещается вверх и вниз по всей длине трубы. Использование двух труб вместо одной позволяет лучше распределить нагрузку, поместив трубы по краям тележки, а не в центре, как в случае с одной трубой. На рисунке 1 показана схематическая модель предлагаемой конструкции.

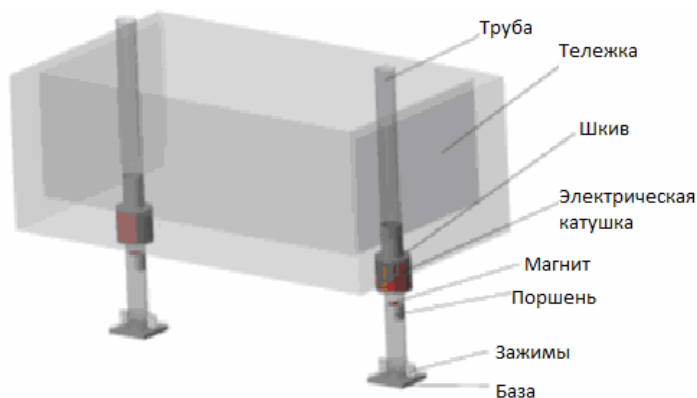


Рис.1. Концептуальная конструкция пневматического лифта с его компонентами

Таким образом, сжатый воздух давит на поршень, заставляя его перемещаться вверх – вниз. Для того, чтобы выполнить цель проекта, необходимо связать тележку лифта с поршнем. Чтобы добиться этого, можно применить магнитное взаимодействие, поместив набор постоянных магнитов на поршне, а электрическая катушка, которая работает как электромагнит (соленоид), наматывается на цилиндрическое основание, и этот цилиндр свободно скользит по трубе.

Предложенный пневматический лифт состоит из следующих компонентов: труб, поршней, оснований труб, тележки, постоянных магнитов и электрических катушек на цилиндрическом основании.

Анализ напряженно-деформированного состояния

Труба

Так как максимальным параметром проекта является нагрузка 2500Н на каждую сторону лифта, предельное максимальное давление получается равным 0,422 МПа.

Напряжения, возникающие в трубе вследствие действия внутреннего давления, рассчитываются, используя соотношения (1-3) [4].

Тангенциальные напряжения:

$$\sigma_t = \frac{r_i^2 p_i}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2} \right), \quad (1)$$

при $r=r_i$, $\sigma = 1,999$ МПа, при $r=r_o$, $\sigma = 3,599$ МПа (где r_i – внутренний радиус трубы; r_o – внешний радиус трубы).

Радиальные напряжения:

$$\sigma_r = \frac{r_i^2 p_i}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2} \right), \quad (2)$$

при $r=r_i$, $\sigma = -0,422$ МПа, при $r=r_o$, $\sigma = 0$ МПа.

Применив теорию прочности Мизеса, получаем:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_r^2 - \sigma_r \sigma_t + \sigma_t^2}, \quad (3)$$

при $r=r_i$ $\sigma' = 2,24$ МПа, при $r=r_o$ $\sigma' = 3,599$ МПа, где σ' – эквивалентное напряжение.

Максимальное эквивалентное напряжение в трубе 3,599МПа, труба изготовлена из полиметилметакрилата (акрила), материал имеет прочность 72,56 МПа [5].

Поршень

Поршень сделан из политетрафторэтилена (фторопласта), величина прочности на растяжение которого варьируется от 0,862 до 41,4 МПа, а прочность на сжатие – от 1,5 до 23,4 МПа [4].

Поршень находится под действием сжимающей нагрузки и имеет коэффициент запаса 3,55, поскольку 0,422МПа является единственным главным напряжением. Это справедливо только для идеального случая, когда поверхность поршня является плоской, но в реальности это не так, поршень имеет пазы для размещения постоянных магнитов. Следовательно, геометрия пазов приведет к концентрации напряжений. Для этого случая было проведено численное моделирование с помощью программы Cgeo 3.0 .

Как видно на рисунке 2, с учетом влияния концентрации напряжений, максимальное напряжение около 0,900МПа. Это более чем в два раза больше 0,422МПа, рассчитанных по элементарным формулам без учета влияния концентрации напряжений. Таким образом, коэффициент запаса снижается до 1,67.

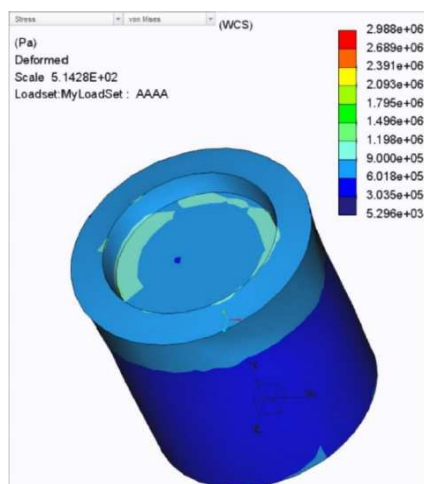


Рис. 2. Анализ напряжения поршня

Основание трубы

Для основания трубы также используется материал политетрафторэтилен (фторопласт), так что основание имеет такую же прочность, как и поршень [5, 6].

Основание трубы находится под действием максимального давления 0,422 МПа. Программа Cgeo 3.0 использовалась для численного моделирования, чтобы определить максимальные напряжения. В основании трубы возникают максимальные сжимающие напряжения равные 0,437 МПа. Таким образом, расчетный коэффициент безопасности получается равным 3,43.

Проектирование магнитной системы

Концептуальный дизайн

Выбранной моделью магнитного взаимодействия является набор постоянных магнитов, закрепленных на поршне и электрическая катушка, намотанная на цилиндрической оправке, которая может свободно скользить по трубе и, которая генерирует отталкивающую магнитную силу (рис. 3).

Численное моделирование

Основными частями, которые обеспечивают магнитное взаимодействие, являются электрическая катушка и набор постоянных магнитов. Три постоянных магнита из сплава неодим-железо-бор (NdFeB) наклеиваются на поршень, два верхних магнита (относительно к положению в пазу) имеют остаточную плотность магнитного потока B_r равную 1,4 Тесла, третий магнит на дне паза имеет остаточную плотность магнитного потока B_r равную 0,9 Тесла.

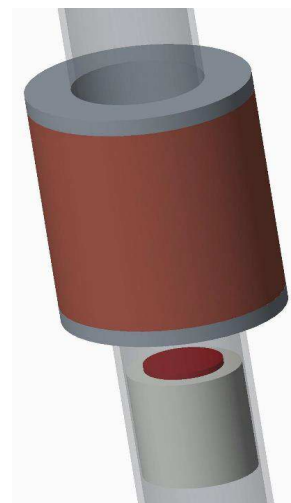


Рис. 3. Модель взаимно-отталкивающихся магнита и катушки

В дополнение к этому, другой набор постоянных магнитов закрепляется на другой стороне поршня, такая конфигурация используется только для испытаний. Второй набор магнитов предназначен для удержания магнитов обоих наборов в пазах поршня, что делает возможным не применять склеивающих материалов, поскольку оба набора магнитов собраны согласно по потоку и взаимно притягиваются. Таким образом, проект допускает возможность легко выполнить модификацию. В дополнение к вышесказанному, второй набор магнитов, даже, несмотря на то, что он находится относительно далеко, вносит дополнительный вклад в полный магнитный поток магнитной системы поршня и приводит к увеличению магнитной силы. Это было подтверждено результатами численного моделирования, как показано на рисунке 4. Второй набор состоит из нижнего и верхнего магнитов (относительно положения в пазу), имеющих плотность магнитного потока равную 1,4 Тесла и толщину 28мм.

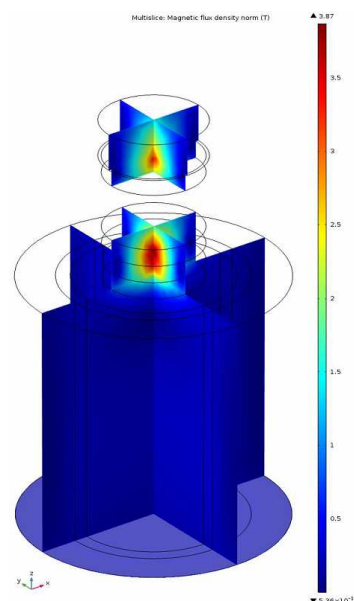


Рис. 4. Распределение магнитного потока при совместной работе катушки и постоянных магнитов, ток в катушке 10А

Выводы и направления дальнейших работ

Электромагнитное взаимодействие порождает магнитные волны, которые могут оказывать влияние на здоровье человека. Кроме того, воздушный компрессор является источником шума и вибраций [7]. Таким образом, предлагаемый тип лифтов является предпочтительным для промышленного использования, там, где воздушный компрессор уже применяется для других целей.

Обычные коммерческие лифты (использующие двигатель и противовес) требуют использования многих достаточно дорогих компонентов, например, таких как двигатель. Применение пневматического лифта, обойдется значительно дешевле, особенно в промышленности, там, где сжатый воздух уже используется для других целей, и дополнительный компрессор не нужен. Такие лифты могут применяться в горном машиностроении.

В лабораториях механического инженерного отделения Иорданского университета успешно завершено многоэтапное проектирование, закончены проработка конструкции и изготовление пневматического лифта нового типа. Сжатый воздух в конструкции лифта применяется для создания подъемной силы, действующей на поршень в трубе, а магнитное взаимодействие используется для передачи движения от поршня к подвижной тележке лифта.

Успешно изготовлен и испытан на протечки и прочность пневматический контур, с помощью воды и избыточного давления до 0,400МПа при гидроиспытаниях. При общих испытаниях с нагрузкой и магнитным взаимодействием пока не удалось добиться плавного перемещения тележки лифта. Общие испытания проводились без дополнительного груза, действовал только вес тележки.

Рекомендуется выполнить дальнейшее изучение динамики пневматической системы и системы управления. Так как сжимаемость воздуха и трение между движущимися частями конструкции приводят к нелинейному отклику и рывкам при движении тележки, дальнейшие исследования должны обеспечить оптимальную управляемость движения тележки лифта под нагрузкой. Рекомендуется также провести больше натурных экспериментальных исследований магнитного взаимодействия для верификации результатов численного моделирования и лучшего понимания природы динамического поведения, так как проведенное численное моделирование выполнялось в приближении статического нагружения.

И последнее, в настоящей изготовленной модели, электрическая катушка может быть заменена кольцевым постоянным магнитом. Это существенно упростит и облегчит конструкцию и, соответственно, существенно увеличит полезную нагрузку, которую сможет транспортировать лифт.

Список литературы

1. Creo Parametric 3D Modeling Software [Electronic resource]: <https://www.ptc.com/en/products/creo/parametric>.
2. COMSOL [Electronic resource]: <https://www.comsol.com>.
3. Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики. Т. 1. – М.: Наука, 1982. – 352с.
4. Skotnikova M.A., Popov A.A., Ivanova G.V., Tsvetkova G.V., Padgurskas J. Localization of plastic deformation in HCP-, BCC- and FCC-alloys at indentation // Materials Today: Proceedings. 2019 International Scientific Conference on Materials Science: Composites, Alloys and Materials Chemistry, MS-CAMC 2019. Amsterdam, 2021. P. 611-618.
5. Седакова Е.Б., Козырев Ю.П., Тарасенко Е.А., Москалец А.А. Структурные модели полимерных композитов триботехнического назначения: Учебное пособие. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ИПРЕСС, 2020. – DOI: 10.18720/SPBPU/2/i20-91.
6. Tsvetkova G., Skotnikova M. Engineering and research of wearability coating on the basis of high-strength steel // Proceedings of 9th International Scientific Conference, BALTTTRIB 2017 – Dedicated to 100th Anniversary of Restitution of Lithuania, 2018, pp. 166-171.
7. Юйсян Ч., Тарасенко Е.А. Определение механических и акустических характеристик хрупких материалов при различной скорости нагружения образцов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2020. Т. 63. № 7. С. 673-681.

References

1. Creo Parametric 3D Modeling Software [Electronic resource]: <https://www.ptc.com/en/products/creo/parametric>.
2. COMSOL [Electronic resource]: <https://www.comsol.com>.
3. Loitsyansky L.G., Lurie A.I. Course of theoretical mechanics. Vol. 1. – M.: Science, 1982. – 352p.

4. Skotnikova M.A., Popov A.A., Ivanova G.V., Tsvetkova G.V., Padgurskas J. Localization of plastic deformation in HCP-, BCC- and FCC-alloys at indentation // Materials Today: Proceedings. 2019 International Scientific Conference on Materials Science: Composites, Alloys and Materials Chemistry, MS-CAMC 2019. Amsterdam, 2021. P. 611-618.
5. Sedakova E.B., Kozyrev Yu.P., Tarasenko E.A., Moskalets A.A. Structural models of polymer composites for tribotechnical purposes: Study guide. – SPb.: PolitechPress, 2020. – DOI: 10.18720/SPBPU/2/i20-91.
6. Tsvetkova G., Skotnikova M. Engineering and research of wearability coating on the basis of high-strength steel // Proceedings of 9th International Scientific Conference, BALTTTRIB 2017 – Dedicated to 100th Anniversary of Restitution of Lithuania, 2018, pp. 166-171.
7. Yusyan Ch., Tarasenko E.A. Determination of the mechanical and acoustic characteristics of brittle materials at different sample loading rates // News of higher educational institutions. Instrumentation. 2020. Vol. 63. No. 7. P. 673-681.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Цветкова Галина Викторовна – к.т.н., доцент	Tsvetkova Galina Viktorovna – candidate of technical sciences, associate professor
Нагхави Янал – студент магистратуры	Naghawi Yanal – graduate student
Аль-Наджар Мохаммад – студент магистратуры	Al-Nadjar Mohammad – graduate student
tsvetkova_gv@mail.ru	

Получена 16.03.2022