Жидкокристаллический эластомер как роторный актуатор

В.А. Вяткин[1], **И.В. Красняков**[1], **А.П. Захаров**[2]

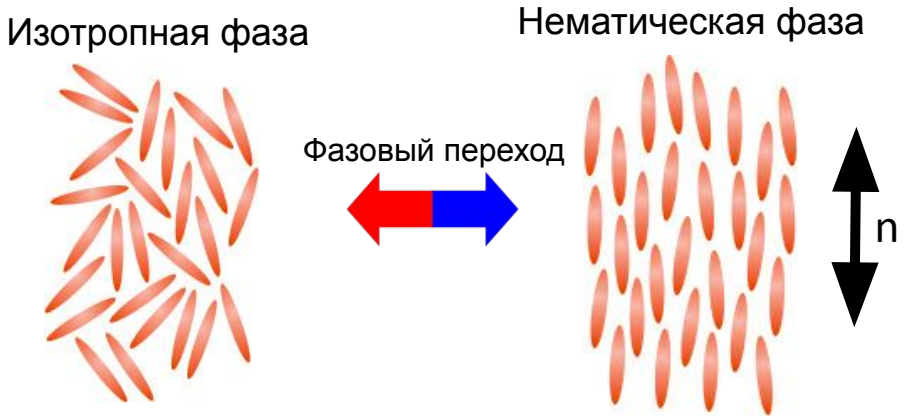
[1] **Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия**

[2] **Технион – Израильский институт технологий, Хайфа, Израиль**

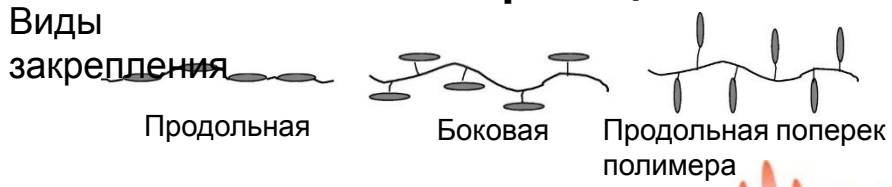
XXVII Всероссийская школа-конференция молодых ученых и студентов Математическое моделирование в естественных науках, Пермь, 3-6 октября 2018 г.

Жидкокристаллические эластомеры

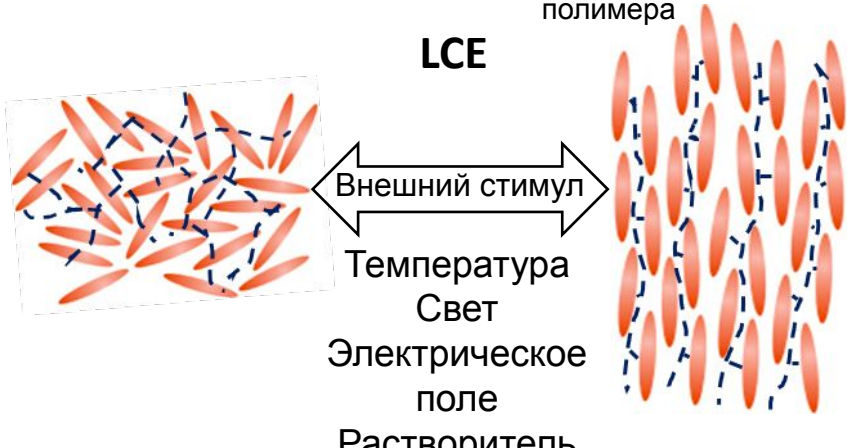
Нематический порядок в жидких кристаллах



+ полимеризация



LCE

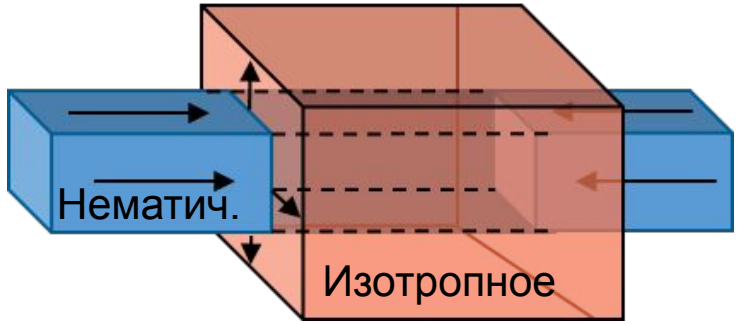


Жидкокристаллические эластомеры (LCE) – гибридные материалы, объединяющие в себе три свойства: ориентационный порядок (анизотропность), взаимосвязь между формой молекул и фазовым состоянием (механический ответ) и топологические ограничения (появление дефектов).

Свойства жидкокристаллических эластомеров:

- подвержены значительным механическим деформациям при изменении фазового состояния;
- обладают высокой чувствительностью в внешнему воздействию (например, тепловому или световому).

Упругий отклик при изменении фазового состояния



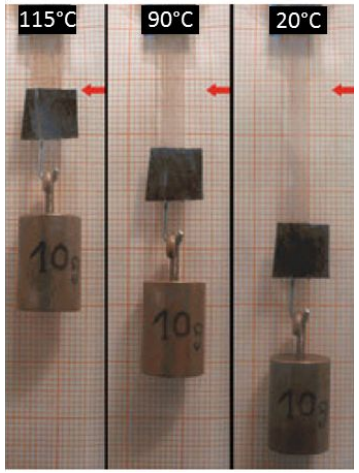
LCE актуаторы

Актуатор – универсальное исполнительное устройство. Им может быть как некоторое устройство, так и материал.

Под **актуацией** понимается приведение актуатора в возбужденное состояние или смена его состояния.

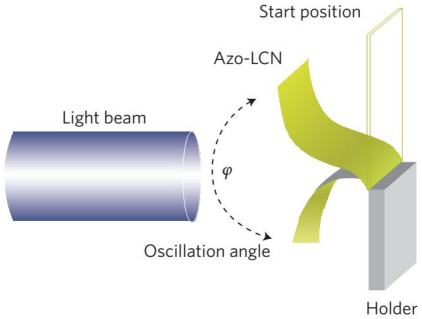
<u>Актуация может быть вызвана</u>:

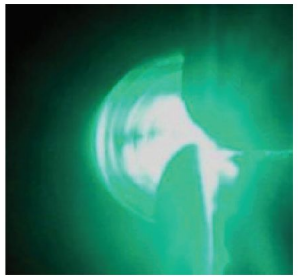
Теплом



Finkelmann, *e-Polymers* **1**, 111-123 (2001)

Светом

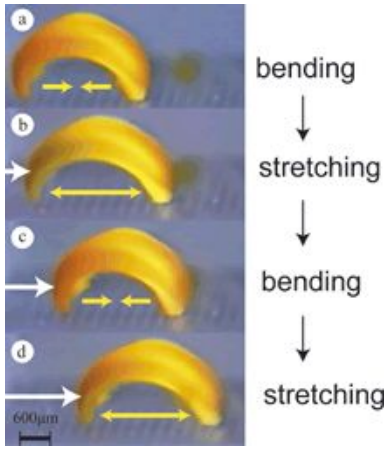




Serak et al., *Soft Matter* **6**, 779-783 (2010)

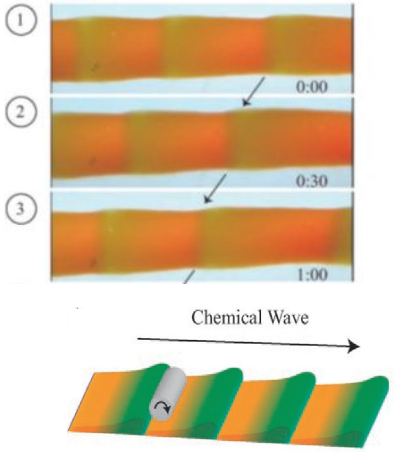
Растворитель (LC гель)

Самостоятельное перемещение



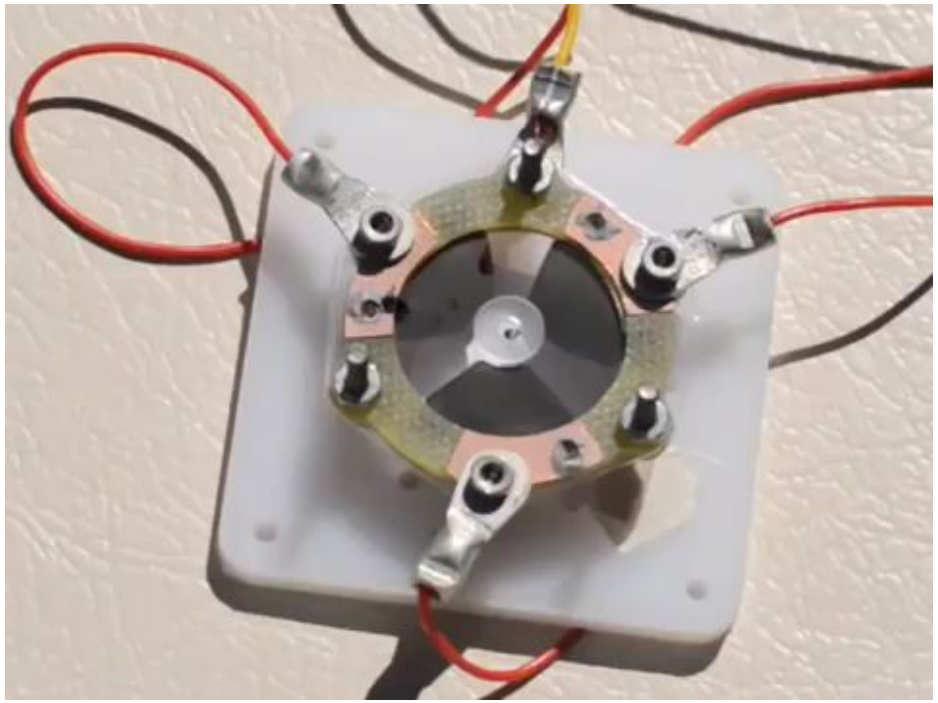
Hashimoto et al., *Adv.Materials* **19.21** (2007)

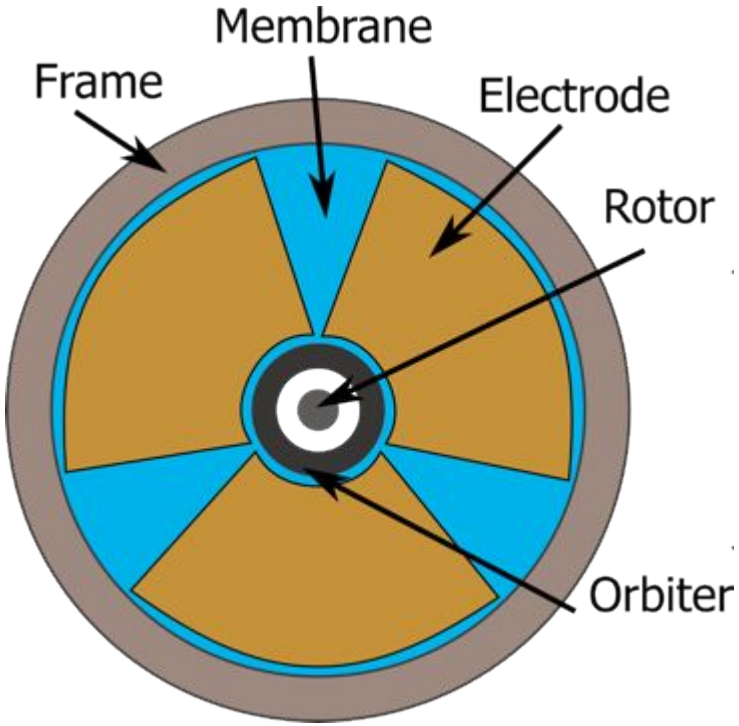
Перистальтическое движение



Hashimoto et al., *Ang. Chem.* **47**, 6690-6693 (2008)

DEA роторный микромотор





Структура DEA роторного микромотора

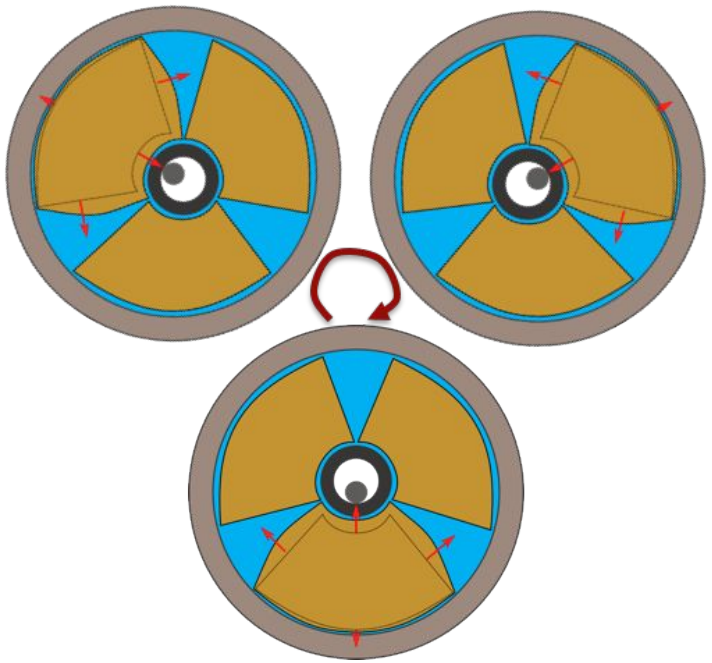
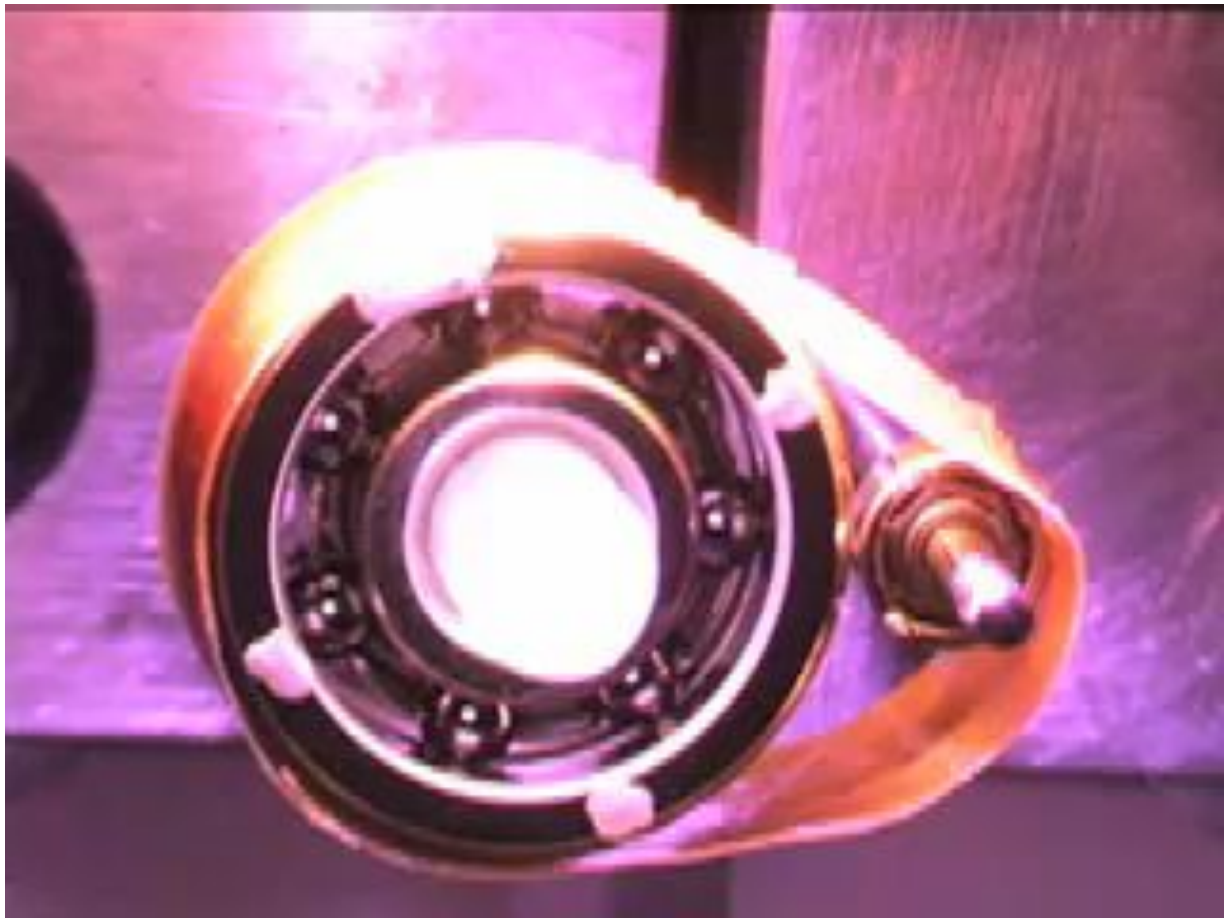


Схема работы DEA роторного микромотора

Imboden, Ji et al. DEA Rotary micro-motor (https://lmts.epfl.ch/EAPmotor)

Мотор Икеды

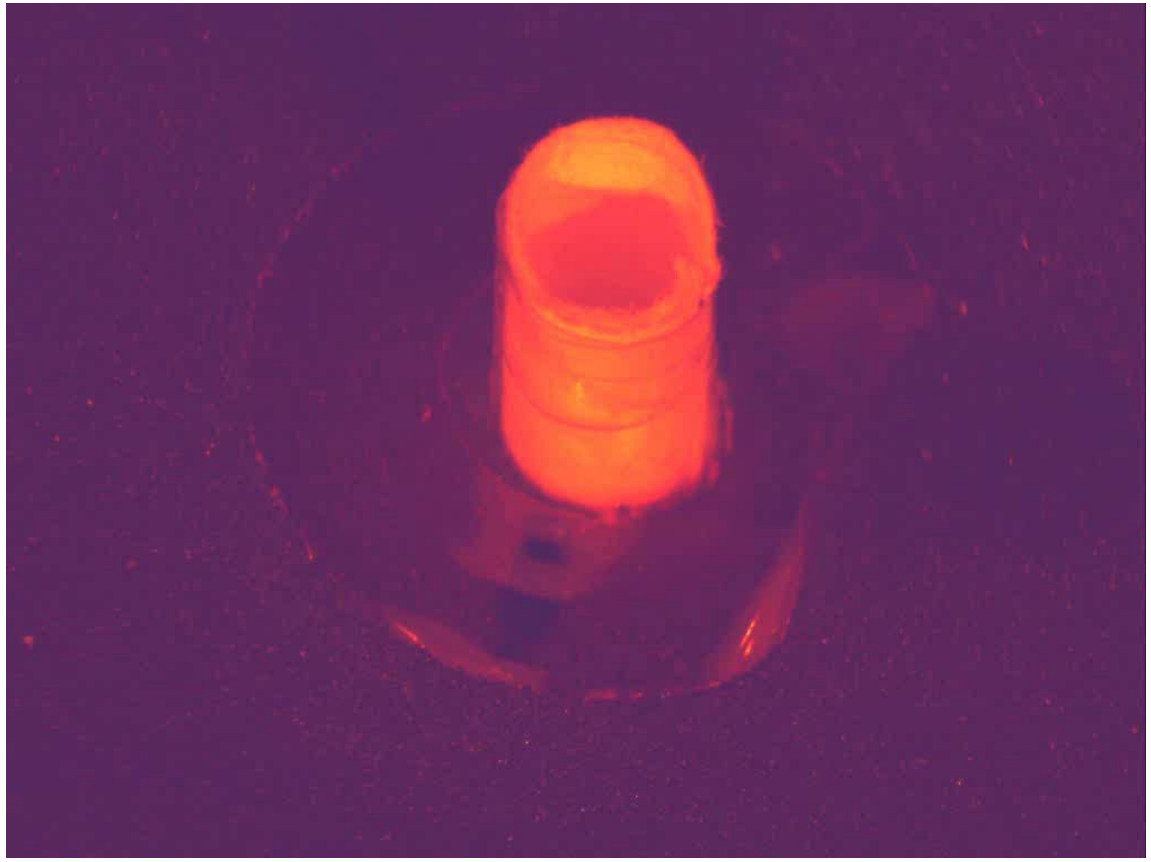


Ikeda et al. *Angew. Chem.*, **120**, 5064 –5066 (2008)

Конструкция мотора:
Мотор представляет собой систему шкивов, на которую помещена LCE-пленка в форме ремня.

Принцип работы мотора:
Часть LCE-пленки на правом шкиве освещается ультрафиолетом. В результате возникает локальная сила сжатия.
Часть LCE-пленки на левом шкиве освещается видимым светом. В результате возникает локальная сила растяжения.
Одновременное воздействие видимого света и ультрафиолета приводит к вращению системы шкивов.

Эксперимент



Hao Zeng (Tampere University of Technology, Finland)

Тонкая пленка нематического эластомера

Лазер циклически сканирует и локально нагревает эластомер

При воздействии лазера эластомер сгибается (т.к. анизотропен по толщине – принцип термостата)

Время остывания > время нагрева

Трение о подложку может быть изменено (на видео бумага)

Цель работы

Изучение динамических свойств жидкокристаллических эластомеров, подверженных значительным механическим деформациям при изменении фазового состояния.

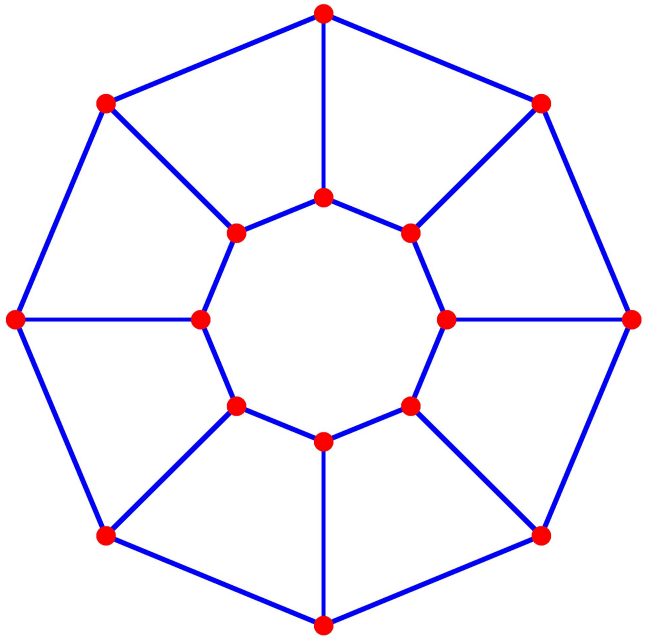


Схема роторного мотора № 1

<u>Конструкция мотора</u>:

Мотор состоит из двух кольцевых и *n* радиальных активных нитей, соединённых в форму диска.
Внутреннее кольцо жестко закреплено на поворотном стержне и может только вращаться вокруг центра стержня.
Внешнее кольцо и радиальные нити ограничены в деформации только сохранением целостностью структуры и актуацией.
Вся конструкция находится на подложке.

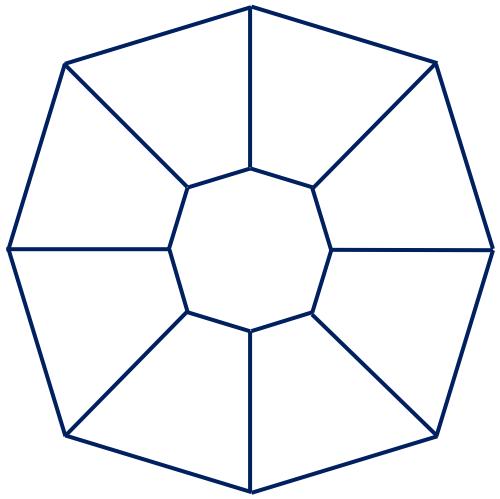
<u>Принцип работы</u>:

Циклическая активация структуры из активных и пассивных нитей приводит к выполнению механической работы за счет деформаций и силы трения между конструкцией и подложкой.

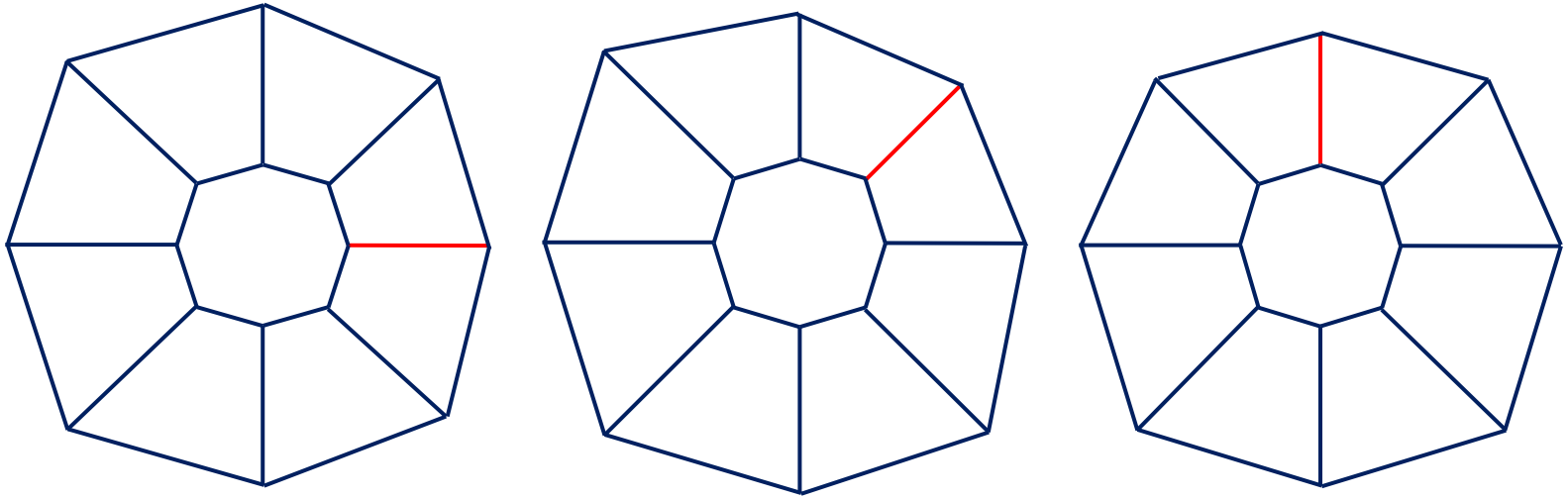
Динамика роторного мотора

<u>Предполагается</u>:

- нить при осевом сжатии изгибается, а не остается прямой, изменяя свою длину;
- процесс актуации быстрее, чем процесс деактивации;
- актуация производится с постоянной угловой скоростью ω;
- актуация однородна в поперечном и продольном направлении нитей;
- на каждом шаге вращения луча активации система приходит в равновесное состояние.



Недеформированное состояние



Последовательное воздействие луча активации на радиальные нити; нити, на которые в данный момент действует луч, окрашены красным цветом

Деформирование активных нитей

- Активные нити, представляющие собой жидкокристаллический эластомер, способны менять свою длину на фактор λ, принимая оптимальную длину

$$\bar{l} = \lambda l_0$$

Так как процесс актуации, когда нити становятся короче, быстрее процесса деактивации, необходимого для восстановления первоначальной длины, поэтому нити, которые находятся после прохождения луча активации имеют длины зависящие от скорости вращения луча

$$\lambda_r = 1 - (1 - \lambda)\exp(-kt_r)$$

Интервал времени t_r определяет запаздывание в восстановлении нитей до начальных длин.

Расчет формы структуры

Расчет формы структуры производится с учетом того, что на каждом шаге поворота луча активации структура приходит к равновесному состоянию, удовлетворяя условию

$$\frac{\delta F}{\delta \mathbf{X}} \to 0$$

$\mathbf{X}$ – координаты системы

Энергия эластичности

$$F = \frac{1}{2} EA \sum_{\text{fibers}} \left[\underbrace{\left| l_i / \bar{l}_i - 1 \right|^2}_{\text{Энергия осевой деформации}} + \underbrace{\frac{1}{4} (r_i \kappa_i)^2}_{\text{Энергия изгиба}} \right]$$

Выражение для расчета кривизны *к*

$$2 l_0 \sin\left(\frac{l_0 \kappa}{2} \right) = l \cdot l_0$$

Поскольку характерное время релаксации намного меньше чем характерное время вращения луча, задача минимизации общей энергии для поиска равновесных состояний решалась на каждом шаге поворота луча следуя уравнению псевдо-эволюции системы

$$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t} + \omega \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \phi} = -\frac{\delta F}{\delta \mathbf{X}}$$

Алгоритм расчета

1. Установить положение луча активации на i-ой радиальной нити в текущий момент времени t.
2. Вычислить распределение

$$\lambda_r = 1 - (1 - \lambda)\exp(-kt_r)$$

   и вычислить оптимальные длины нитей.
3. Найти равновесное состояние, решив задачу минимизации энергии:
   a) Вычислить изменение энергии из-за малого виртуального перемещения для каждого узла на внешнем кольце вокруг оси вращения в радиальном направлении и в нормальном направлении к плоскости структуры;
   b) Вычислите изменение энергии из-за малого виртуального перемещения внутреннего кольца как твердого тела вокруг оси вращения;
   c) Найти новые положения узлов согласно методу градиентного спуска

$$\boldsymbol{X}_{new} = \boldsymbol{X} - \gamma \nabla F$$

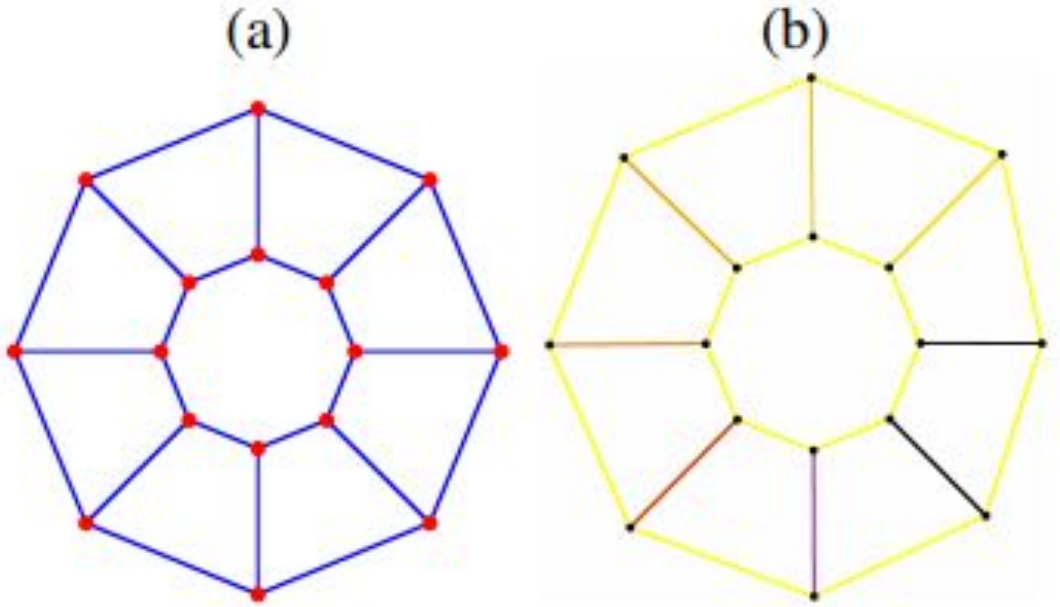
   где γ мало, и одновременно обновлять все координаты узлов;

Алгоритм расчета

d) Выполнять шаги 3 a-c до тех пор, пока не приблизимся к минимуму энергии эластичности:

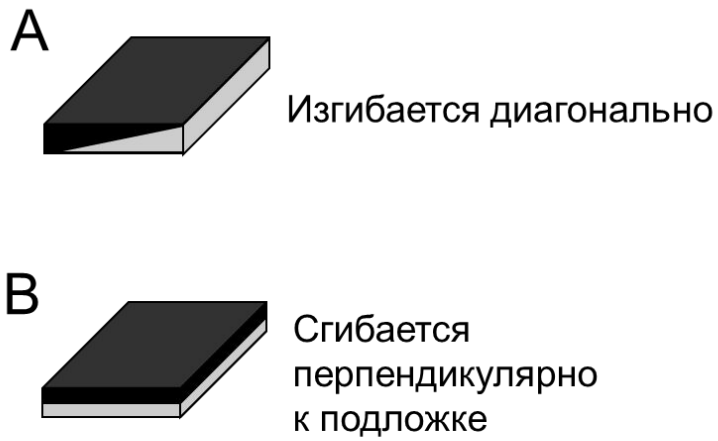
$$\frac{\delta F}{\delta \boldsymbol{X}} \to 0$$

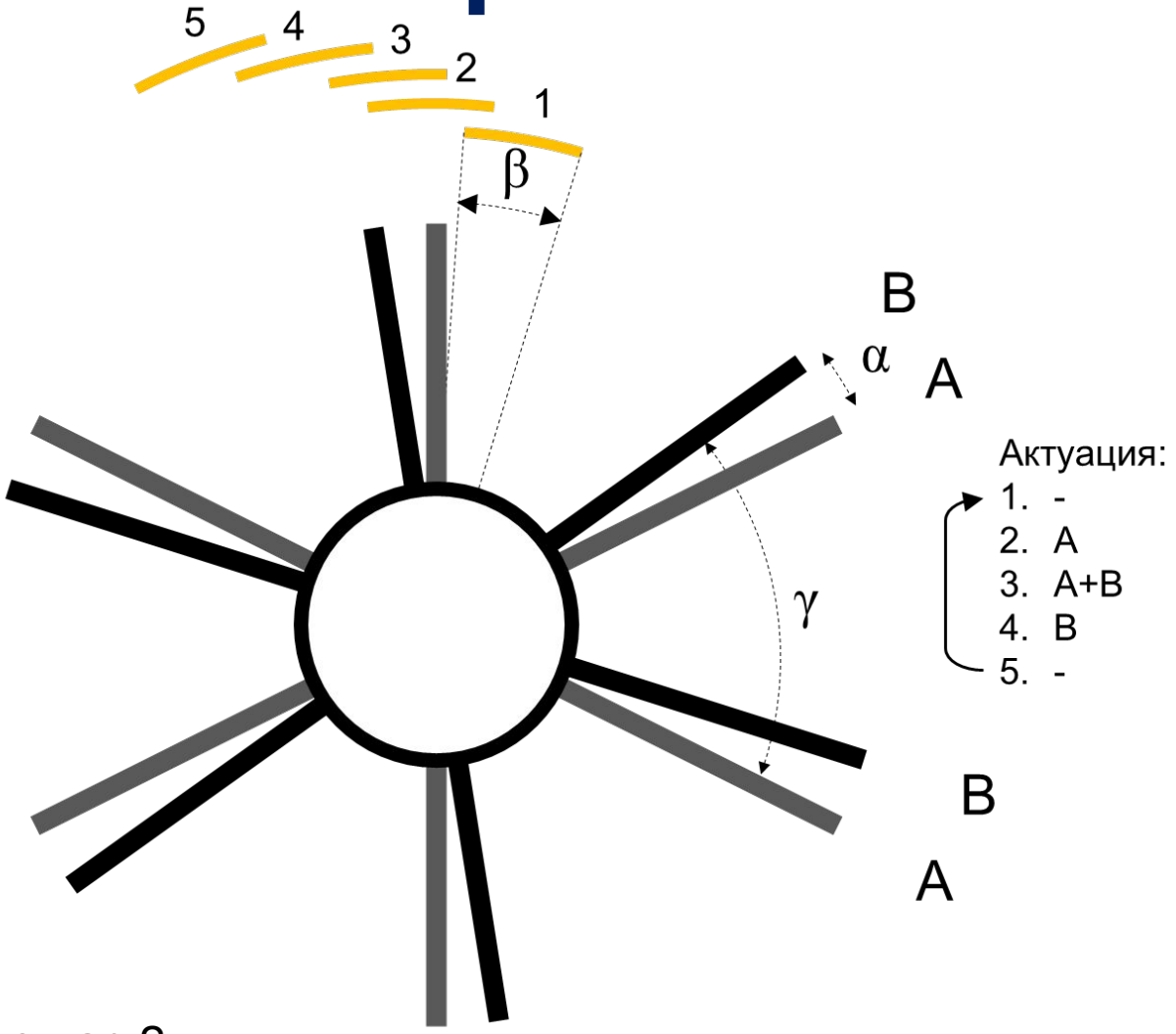
4. Сделать шаг по времени, переместив луч активации на i+1 – ю радиальную нить.
5. Повторить шаги 1 – 3.



(a) Схема роторного мотора до начала актуации
(b) Схема роторного мотора после одного цикла при k=0,5

Схема роторного мотора № 2





α – угол между нитями A и B

β – ширина луча (выбирается так чтобы >α)

γ – угол между парами нитей (>β), минимальное число пар 2

Количество лучей активации = число пар нитей

Спасибо за внимание!

vva063@bk.ru