

# Проект № 19-53-12039 «Магнито­зависимые свойства магнитных гибридных эластомеров со сложными внутренними взаимодействиями»

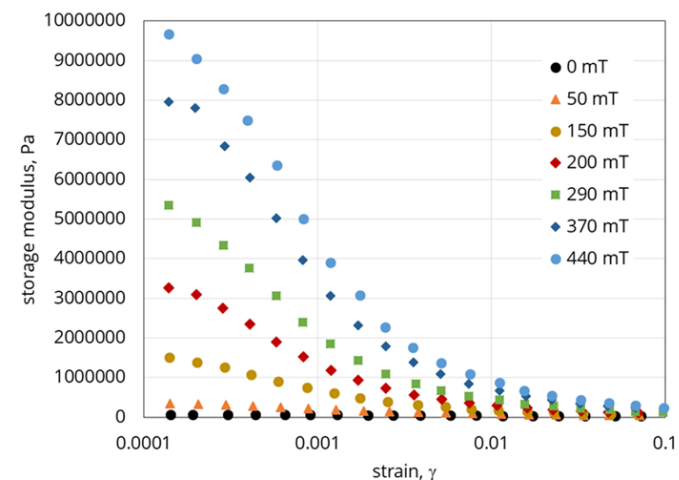
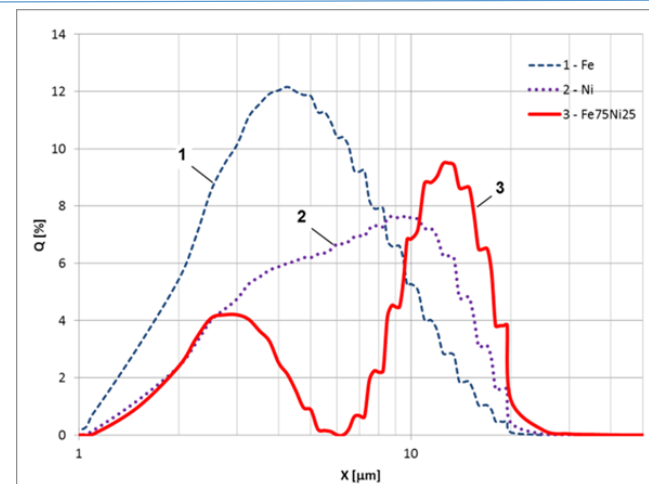
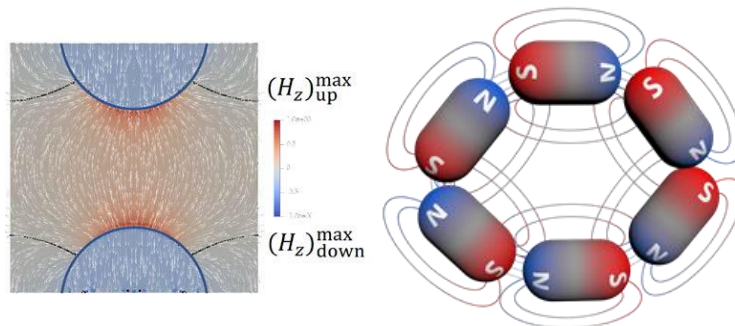
Работа направлена на исследование особенностей взаимодействия магнитных микро и нано частиц внутри эластичной полимерной матрицы под действием внешнего магнитного поля. Под действием магнитного поля, в магнитных гибридных эластомерах (МГЭ) в результате внутреннего структурирования изменяются такие свойства как упругость и вязкость, геометрия, электропроводность диэлектрические и оптические свойства.

## Полученные результаты:

– методом механохимического сплавления получены порошки пермаллоевых магнитных наполнителей с бимодальным распределением частиц по размерам который позволили создать магнитоактивный эластомер (МАЭ) с высоким магниторелогическим эффектом, который составил 8 МПа в магнитном поле 440 мТл в области малых деформаций

– исследование процессов внутреннего структурирования МГЭ содержащие магнитотвердые порошки сферического NdFeB с коэрцитивной силой 9 кЭ. Процесс намагничивания и перемагничивания такого композита приводит к образованию внутренних цепочечных и круговых структур которые объясняют особо низкую коэрцитивную силу и остаточную намагниченность такого композита.

- образование круговых структур при диполь-дипольном взаимодействии внутри полимерной матрицы

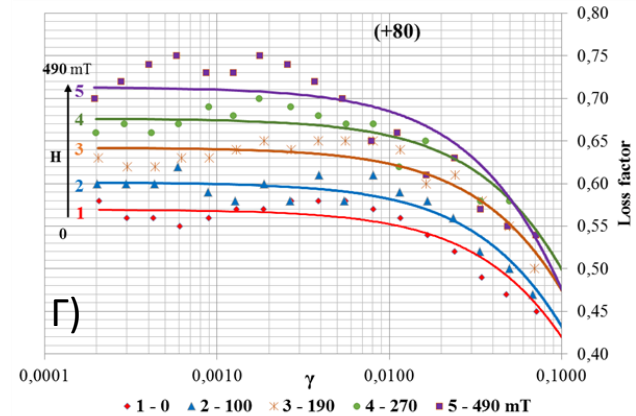
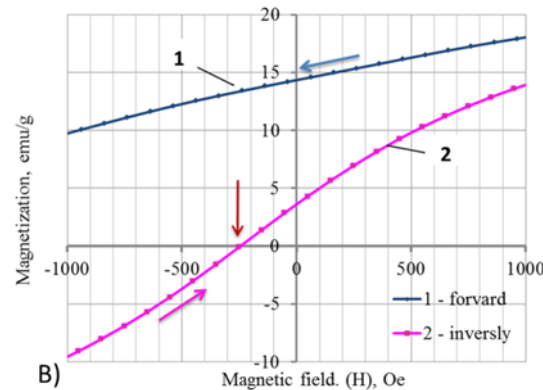
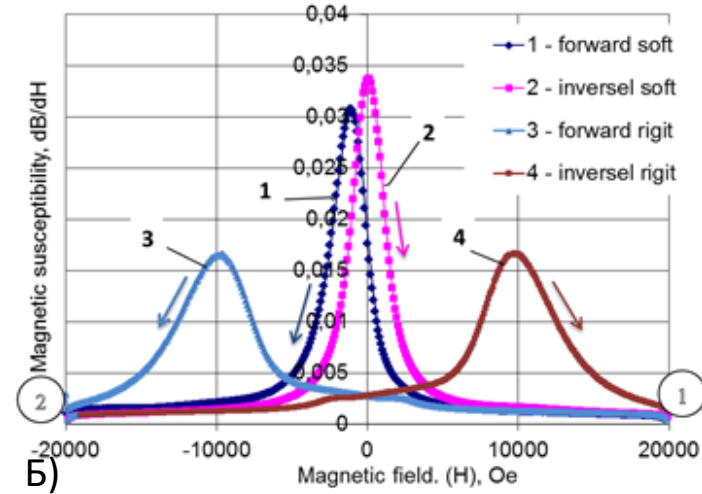
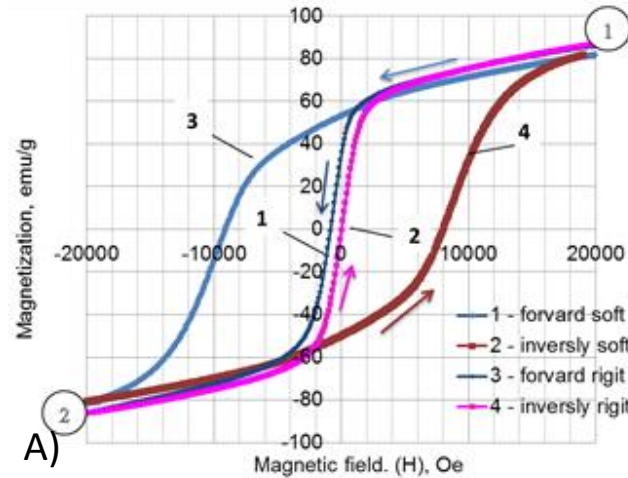


- **МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

- Кривые гистерезиса для магнитного эластомера с различной жёсткостью:
- А – интегральная кривая. Б) – дифференциальная кривая магнитной восприимчивости

1-2 – мягкая матрица.  
3-4 – жёсткая матрица

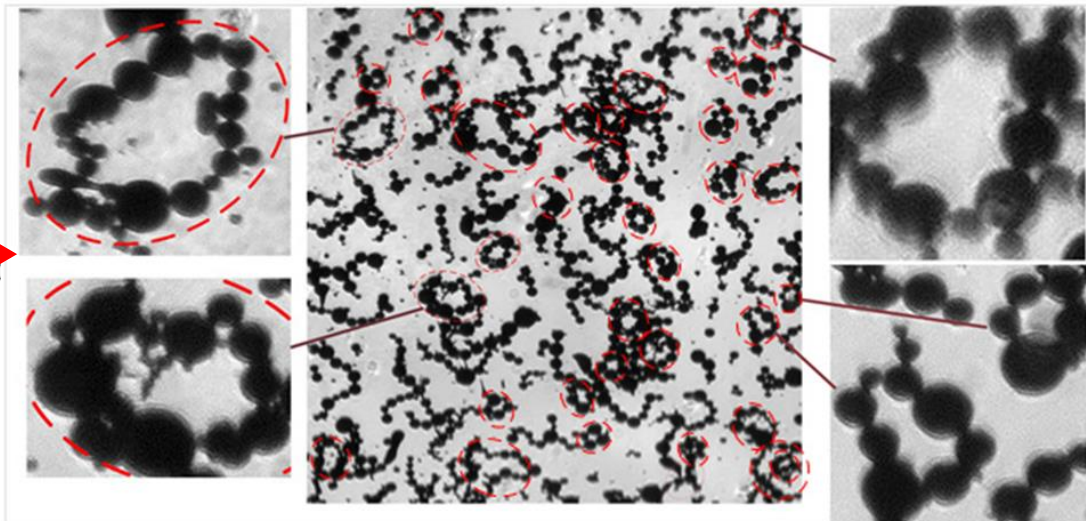
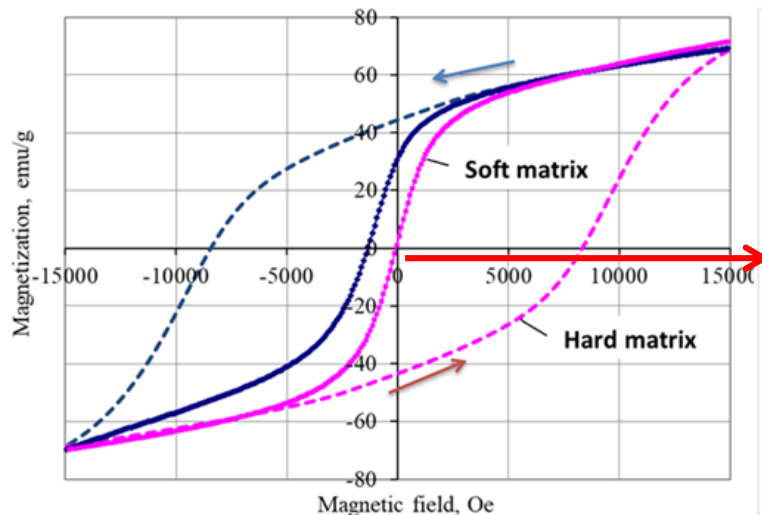
- Частицы внутри полимерной матрицы способны структурироваться и вращаться под действием внешнего магнитного поля. При определенной величине магнитного поля, остаточной намагниченности и упругости полимерной матрицы на кривой магнитной восприимчивости можно наблюдать процессы, как перемагничивания, так и вращения частиц (1, 2, рис А,Б).



В) Петля гистерезиса имеет ассиметричный вид, который определяется направлением первичного намагничивания магнитного эластомера. В определённых условиях условная коэрцитивная сила может иметь отрицательную величину. В) ↓ - отрицательная коэрцитивная сила.

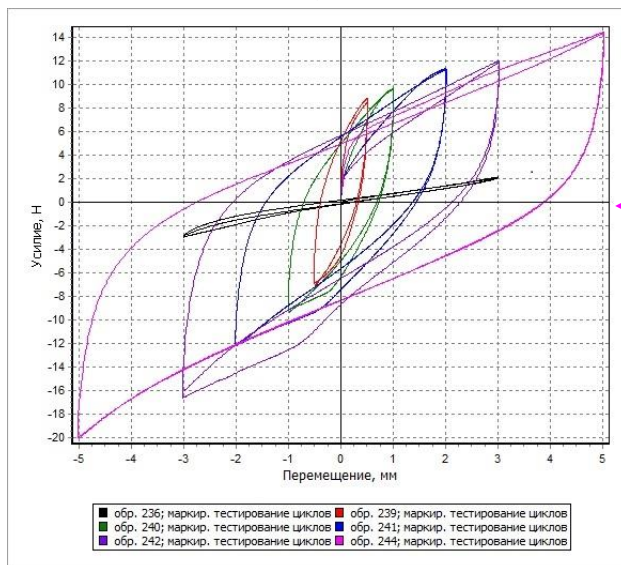
**Реологические свойства:** Г) – Аномально высокие демпфирующие свойства МГЭ которые возрастают в магнитном поле от 0 до 500 мТл во всём диапазоне деформаций.

## МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ



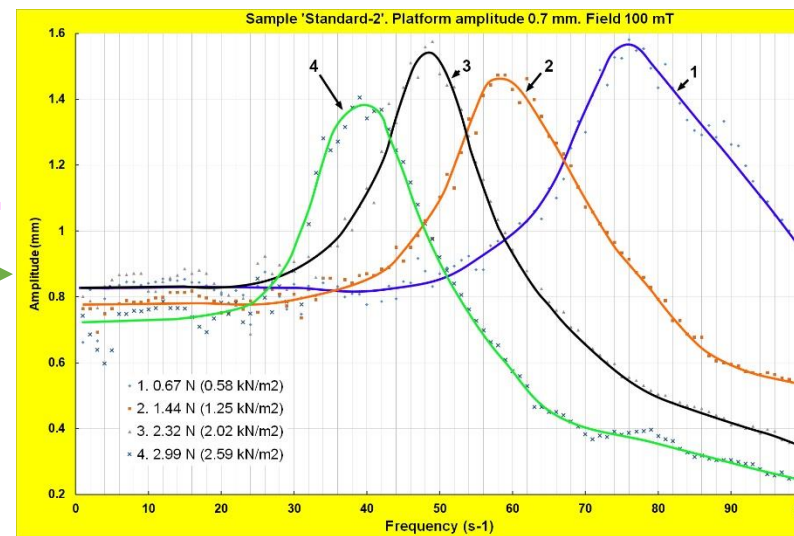
## Оптические наблюдения

Частицы внутри полимерной матрицы способны **структурироваться и вращаться** под действием внешнего магнитного поля. При определенной величине магнитного поля, остаточной намагниченности и упругости полимерной матрицы внутри полимерной матрицы **образуются круговые структуры**, при этом остаточная намагниченность стремится к нулю.

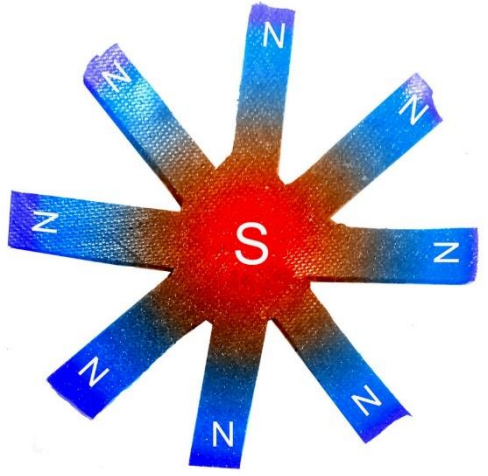


Упругие свойства  
МГЭ в  
магнитном поле.

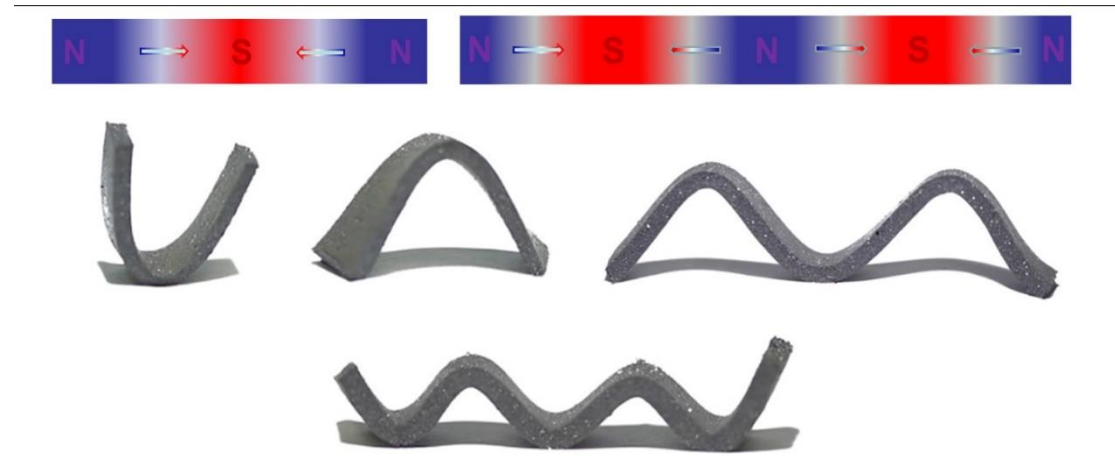
Резонансные  
кривые на  
вибростенде,  
под разной  
нагрузкой



**Многополюсное намагничивание.** Полоска МАЭ может деформироваться обратимо при приложении магнитного поля. Направление деформации и принимаемая форма зависят от направления магнитного поля.



**Форма – звезда**



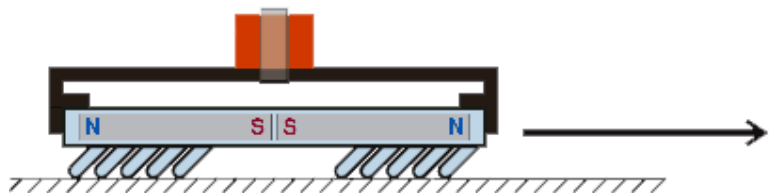
**Форма – червяк.** Может применяться при конструировании микродвижателя

Такой тип магнитного эластомера может применяться в виде микродвижателей или мягких захватов в робототехнике.

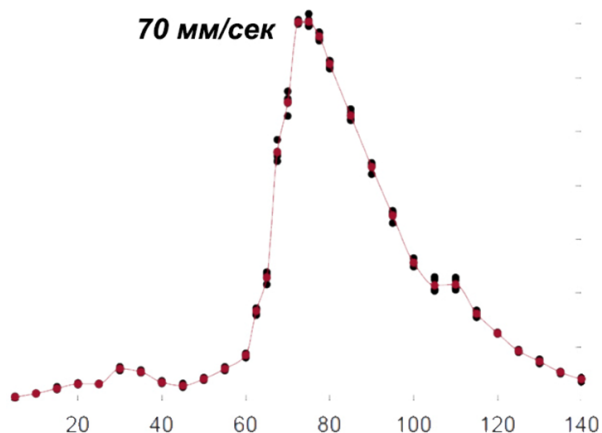


**Эффекты деформации в магнитном поле.** Механизм деформации заключается во взаимодействии намагниченных участков магнитного эластомера с внешним магнитным полем, что приводит к его деформации в соответствии с правилом взаимодействия магнитных полюсов.

Микроробот

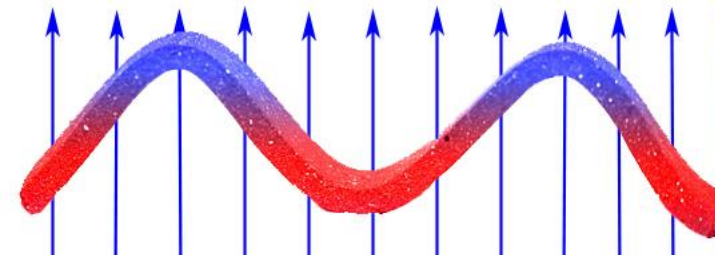


Скорость передвижения микроробота от частоты деформации магнитного эластомера.



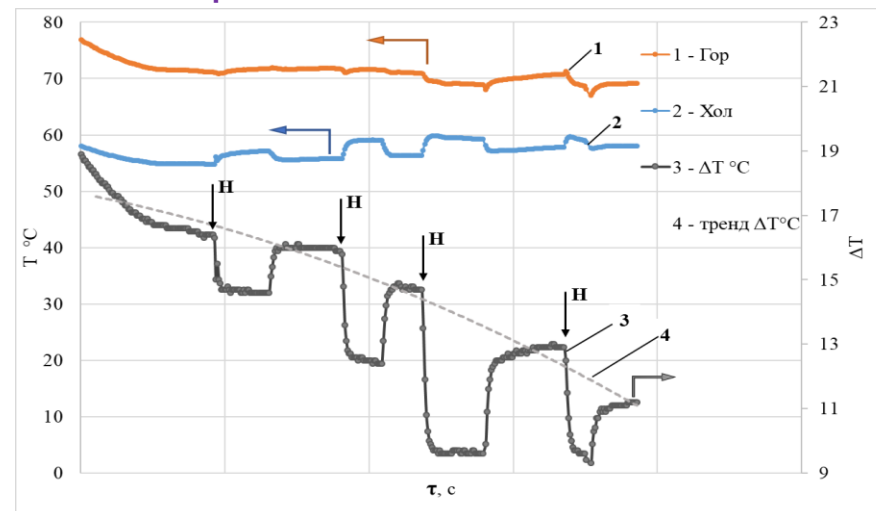
Скорость достигает 70 мм/сек

. Reiche M., Becker T. I., Stepanov G. V., Zimmermann K. A Multipole Magnetoactive Elastomer for Vibration-Driven Locomotion // Soft Robotics. 2023 Vol. 10, No. 4. P. 770-784.



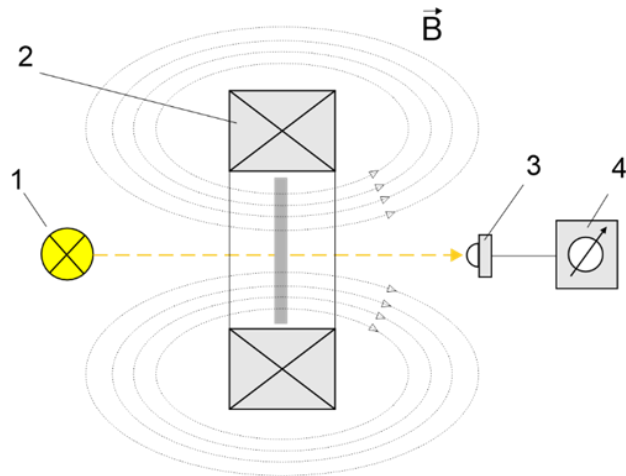
Деформация в магнитном поле

Теплопроводность в магнитном поле



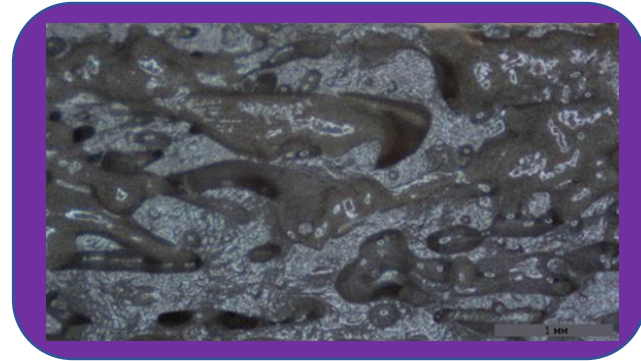
Теплопроводность МАЭ в магнитном поле повышается на 30%

# Магнитооптический эффект магнитного эластомера

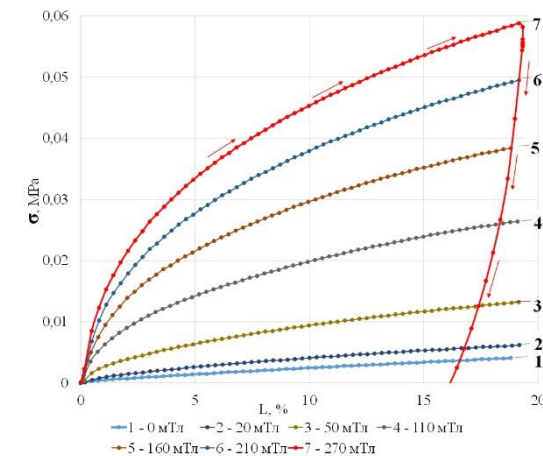


Под действием магнитного поля происходит структурирование частиц в вертикальной плоскости по магнитному полю, что создаёт окна прозрачности.

Новый тип демпфирующего магнитного эластомера на «эмульсиях» силиконовых каучуков

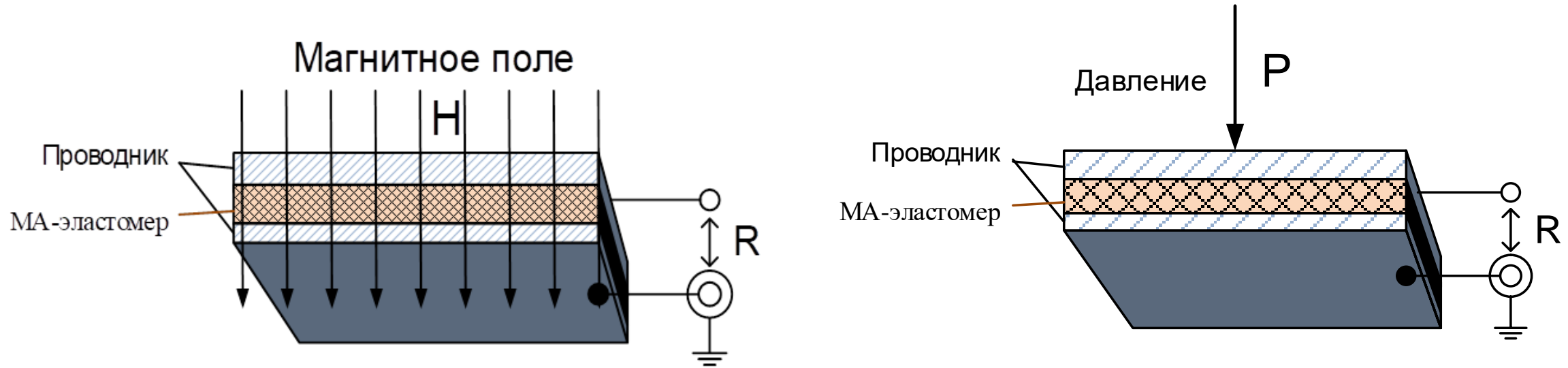


Магнитный силиконовый эластомер с «эмульсионной» структурой имеет высокий тангенс механических потерь

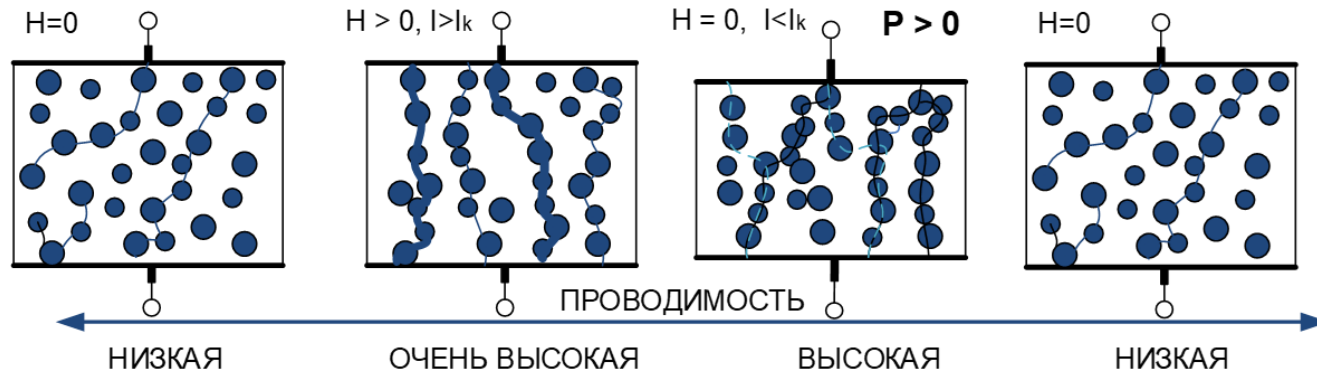


Гистерезис деформации магнитного эластомера с пермаллоевым наполнителем

# Магнитопьезорезистивный эффект в магнитных эластомерах

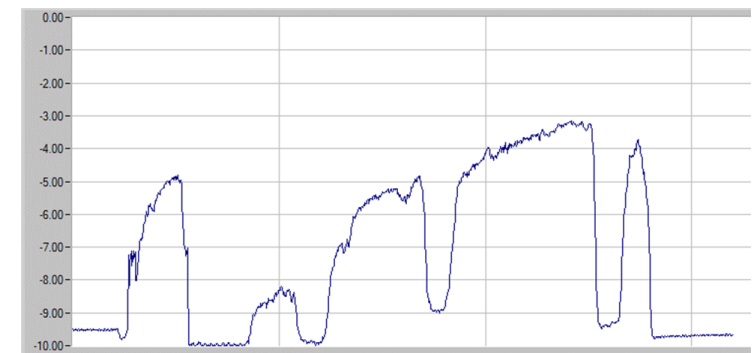


Датчики магнитного поля



Механизм изменения проводимости под действием магнитного поля и давления

Датчики давления



Изменение сопротивления МАЭ под действием магнитного поля и давления