

## **ОСОБЕННОСТИ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТОАКТИВНЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ**

**Степанов Г.В.**

начальник лаборатории магнитных пигментов и композитов АО «ГНИИХТЭОС» Москва

**Лобанов Д.А.**

к.т.н. ведущий научный сотрудник АО «ГНИИХТЭОС» Москва

**Борин Д.Ю.**

к.т.н. научный сотрудник, Институт Мехатронного Машиностроения, Технический Университет Дрездена, Германия.

**Семеренко Д.А.**

к.ф.-м.н., старший научный сотрудник ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», Россия, Москва

**Стороженко П.А.**

д.х.н., профессор, АО «ГНИИХТЭОС» Москва

***Аннотация.** Работа посвящена исследованию электропроводности магнитоактивных эластомеров в присутствии магнитного поля. Исследование вольт-амперной характеристики таких материалов в постоянном токе показало, что при определённых составах МАЭ ВАХ характеристика имеет нелинейную, экспоненциальную зависимость. Величиной этой зависимости можно управлять с помощью магнитного поля. Под действием магнитного поля такой магнитный эластомер может проходить все этапы состояния от изолятора до проводника. Под действием магнитного поля электропроводность композита изменилась на 6 порядков.*

***Ключевые слова:** магнито-активный эластомер, электропроводность, магниторезистивный эффект, вольт-амперная характеристика*

## **FEATURES OF THE CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTIC OF MAGNETOACTIVE ELASTOMERS**

**Stepanov G.V.**

Head of the laboratory of magnetic pigments and composites of SSC RF JSC "GNIICHTEOS"  
Russian Technological Institute

**Lobanov D.A.**

Ph.D. SSC RF JSC "GNIICHTEOS" - Russian Technological Institute

**Borin D.Yu.**

Ph.D. Institute of Mechatronic Engineering, Technische Universitat Dresden, 01062 Dresden, Germany.

**Semerenko D.A.**

Ph.D., senior research fellow, Bauman Moscow State Technical University, Russia, Moscow

**Storozhenko P.A.**

Dr.Chc., professor, SSC RF JSC "GNIChTEOS" - Russian Technological Institute

**Annotation.** *The work is dedicated to the study of the electrical conductivity of magnetoactive elastomers in the presence of magnetic fields. Investigation of the current-voltage characteristics of such materials in direct current has demonstrated that MAE possessing certain chemical compositions exhibit nonlinear electrical characteristics, namely exponential I-V relationships. The magnitude of this dependence can be controlled using external magnetic fields, under the influence of which, such an elastomer suffers changes of state from insulator to conductor. During this process, the conductivity of the composite increases by 6 orders of magnitude.*

**Keywords:** *magnetically active elastomer, electrical conductivity, magnetoresistive effect, current-voltage characteristic*

Популярным научным направлением в последние годы стало исследование магнитных эластомеров, свойства которых изменяются под действием магнитного поля. Такие материалы относятся к классу так называемых «умных» материалов («smart materials»). Изначально они были названы магнитореологическим эластомерам, поскольку их вязкоупругие свойства изменяются под действием магнитного поля. Однако, в дальнейших исследованиях выяснилось, что данный тип материалов обладает широким спектром свойств, таких как магнитодеформационный и магнитострикционный эффект, магниторезистивный, магнитопьезорезистивный и магнитооптический эффект, эффект памяти формы [1] и др. Поэтому в научной литературе используются более общие названия, такие как магнитоактивные эластомеры (МАЭ), магнитные гели, и др. Данные материалы представляют собой композит из магнитных частиц, как правило магнитомягких, в эластичной полимерной матрице.

Имеется ряд работ в которых исследовалась электропроводность материала в переменном токе в зависимости от приложенного магнитного поля. Обычно исследования проводят на LCR-измерителе или измерителе иммитанса который используют для измерения индуктивности, сопротивления и ёмкости компонента. Из этих значений можно рассчитать полное сопротивление на любой частоте. Такие исследования были проведены много раз и показали значительное изменение сопротивления и диэлектрической проницаемости материала в магнитном поле [2, 3, 4]. Данный метод измерения магниторезистивного эффекта оказался приемлемым для данного материала, поскольку сопротивление в большинстве композиций превышает 1 Гом. В переменном токе сопротивление на несколько порядков меньше и материал работает в целом как конденсатор, состоящий из набора множества конденсаторов, соединённых последовательно и параллельно. Проведённые измерения электропроводности в постоянном токе в зависимости от напряжения, магнитного поля и гидростатического давления показали, что материал обладает множеством интересных свойств.

Для исследований был взят МАЭ который представлял собой композит, состоящий из силиконовой полимерной матрицы с внедрёнными частицами железоникелевого сплава с размером 10 мкм и концентрацией 75% масс. Исследование магниторезистивного эффекта проводили на образце диаметром 2 см и толщиной 1.5 мм расположенного между электрическими контактами. Измеряли вольт-амперную характеристику (ВАХ) при разных магнитных полях приложенных к материалу. Получены нелинейные зависимости тока от напряжения, которые также зависят от величины магнитного поля которое прикладывалось к образцу как показано на рис.1.

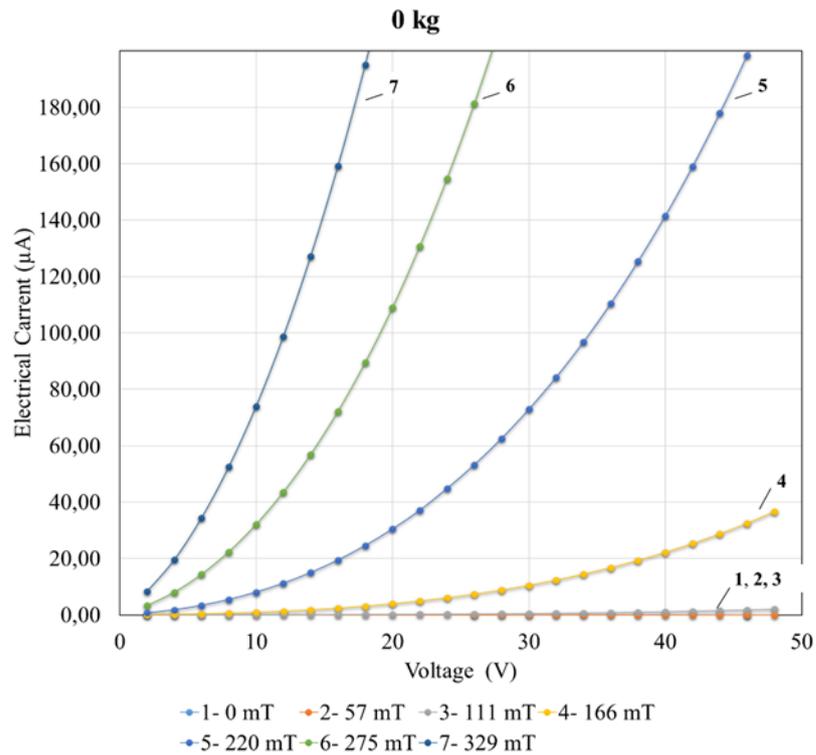
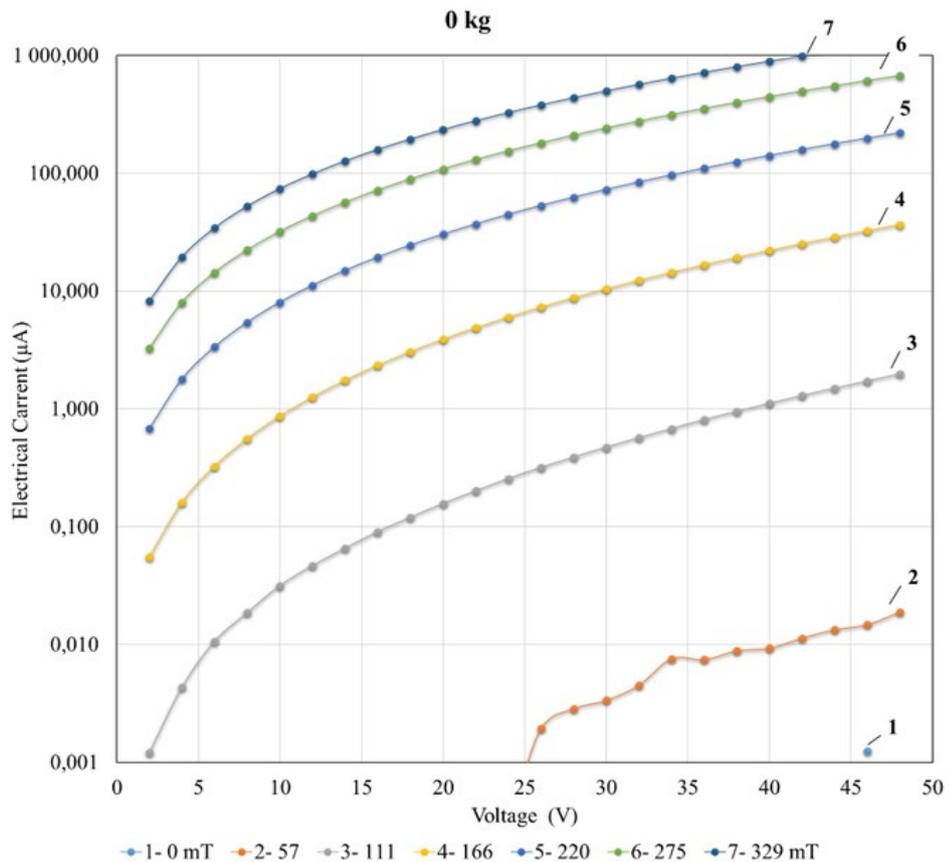


Рис. 1. Зависимость электрического тока протекающего через МАЭ от приложенного напряжения.

Как видно из рис. 1 ВАХ имеет нелинейный характер и также величина тока зависит от магнитного поля. С увеличением магнитного поля проводимость образца возрастает, но общий нелинейный характер сохраняется. Более подробно ВАХ при всех магнитных полях представлена на рис. 2.



*Рис. 2 Зависимость ВАХ образца при различных магнитных полях.*

Как видно из рис 2, исходный образец имеет очень маленькую проводимость, при напряжении 46 В ток соответствует 1 нА, что является пределом чувствительности прибора. Удельное сопротивление материала порядка 1 ГОм·см. Однако с увеличением приложенного магнитного поля сопротивление начинает уменьшаться и ток в цепи возрастает от 1 нА до 1 мА в поле 329 мТл, т.е. на 6 порядков величины. Механизм этого явления заключается очевидно в процессах структурирования магнитного электропроводящего наполнителя внутри эластичной полимерной матрицы под действием магнитного поля. Данный механизм был впервые предложен в статье [4] при объяснении магнитореологического и магнитострикционного эффектов наблюдаемых в этом материале. Следует отметить, что общий характер ВАХ при разных магнитных полях не изменяется. В целом вид ВАХ описывается степенной функцией, но в области повышенных напряжений (более 20 В) описывается экспоненциальной зависимостью. Рассматривая возможные механизмы протекания тока через образец можно заключить, что проводимость осуществляется по механизму туннелирования эмитированных электронов от каждой частицы магнитного наполнителя через полимерную матрицу. Более плавный рост проводимости чем экспоненциальный можно объяснить наличием двух типов проводимости – линейного по закону Ома и экспоненциального по закону туннелирования и их сложением в конечном итоге. Диэлектрической средой в композите является силиконовая матрица технического назначения, которая обладает собственной электропроводностью.

Работа поддержана РФФИ №19-53-12039 и DFG No. Wo 3343/3-1

#### **Список использованных источников:**

1. Степанов Г.В., Крамаренко Е.Ю. Двенадцать свойств магнитоактивного эластомера. В сборнике: 17-я Международная плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям. Сборник научных трудов. 2016. С. 187-197.
2. Stepanov G. V., Semerenko D.A., Bakhtiarov A.V., Storozhenko P.A. Magnetoresistive Effect in Magnetoactive Elastomers // J. Supercond. Now Magn, 2013, Vol 26, P. 1055–1059. <https://doi.org/10.1007/s10948-012-1853-1>
3. Bica I. Quadrupolar magnetoresistor based on electroconductive magnetorheological elastomer // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2009, V.15, P.769–772. doi:10.1016/j.jiec.2009.09.029
4. Semisalova A. S., Perov N. S., Stepanov G. V., Kramarenko E. Yu., Khokhlov A. R. Strong magnetodielectric effects in magnetorheological elastomers // Soft Matter. - 2013, Vol. 9, pp. 11318–11324. <https://doi.org/10.1039/C3SM52523F>
5. Stepanov G V, Borin D.Yu., Raikher Yu L, Melenev P.V., Perov N. S. Motion of ferro-particles inside the polymeric matrix in magnetoactive elastomers // J. Phys.: Condens. Matter – 2008. – V.20. - 204121.(6pp)