

Особенности частотной зависимости сопротивления в модифицированных образцах на основе наноглин Na⁺-монтмориллонит

* Ш. М. Гасанлы^а, С. Р. Иманова^б

^аИнститут физики Национальной академии наук Азербайджана,
г. Баку, AZ-1143, Азербайджанская Республика, *e-mail: hasanli_sh@rambler.ru

^бГянджинский государственный университет,
г. Гянджа, AZ-2003, Азербайджанская Республика

Поступила 12.01.2019

После доработки 02.07.2019

Принята к публикации 09.07.2019

Приведены результаты исследований влияния частоты переменного тока на величину активного сопротивления. Выявлено, что с ростом частоты переменного поля величина активного сопротивления уменьшается до минимального значения, а с дальнейшим ростом частоты резко увеличивается. Показано, что причиной роста активного сопротивления является скин-эффект.

Ключевые слова: электропроводность, скин-эффект, бентонит, ЭДС индукции, ЭДС самоиндукции, активное сопротивление, резистор, закон Ленца.

УДК 539.2

DOI: 10.5281/zenodo.3522272

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время развитие импульсной и высокочастотной силовой электронной техники нуждается в разработке систем и устройств, компоненты которых имеют сильную зависимость активного сопротивления от частоты [1]. Вопрос о распределении тока по сечению проводника возникает в ряде задач, связанных с импульсными токами, получением сильных магнитных полей путем растекания тока по заземлителю, экранированием от электромагнитных полей [2]. При этом обычно решается задача нахождения профиля плотности тока, полного сопротивления проводника сложного профиля, в том числе многослойного проводника, и т.п. В работах [3–4] предложен способ подавления перенапряжений, основанный на создании резистора, сопротивление которого значительно увеличивается при частотах, характерных для перенапряжений. Резистор должен включаться последовательно с защищаемым объектом. При этом на низкой частоте он не будет препятствовать прохождению тока, а на высокой – будет служить поглощающим фильтром. Высокочастотное перенапряжение падает в основном на резисторе, и высокочастотная составляющая не проходит в защищаемый прибор или подстанцию, если он установлен на подходе к подстанции. Известно явление скин-эффекта – эффекта уменьшения амплитуды электромагнитных волн по мере их проникновения в глубь проводящей среды,

проявляющегося в уменьшении проводимости единичного проводника на высоких частотах [5]. Для большинства задач радиотехники явление скин-эффекта нежелательно, однако перспективным является его использование для управляемой модуляции электрического сопротивления на высоких частотах. По данным работ [6, 7], перспективным решением в указанной области является использование композитных проводников, имеющих покрытие из металлов и сплавов с существенно большим электрическим сопротивлением, с изменяющимися свойствами и структурой проводника. Согласно работе [8], композитные проводники на основе двух проводящих материалов с различным значением электропроводности и оптимально подобранной геометрией структуры способны выполнять функции помехоподавления и защиты в радиотехнических фильтрах нижних частот (ФНЧ), а также использоваться в качестве конструктивного элемента силовой электроники в устройствах защиты от перенапряжений [9–10].

Предложенная работа исследует влияние частоты переменного напряжения на величины активного сопротивления модифицированных образцов бентонита.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе использован бентонит Даш-Салахлинского месторождения (Азербайджан).

Бентонитовая глина в определенном количестве (0,5 г) была модифицирована с помощью планетарной мельницы типа FRITSCH. Для измельчения глина была размещена в агатовую ячейку с фарфоровыми шарами. Измельчение глины проведено в сухой среде при 3000 и 6000 об/мин в течение 30 минут. После модификации установлено, что размеры частиц изменились. А именно: до модификации диапазон изменений размеров частиц порошка составлял (0,8–1) микрон, после модификации при 3000 об/мин – (450–550) нм, после 6000 об/мин – (150–250) нм. Из измельченных порошков были спрессованы образцы размерами: длина 4 мм, диаметр 7 мм. При этом образец № 1 – немодифицированная глина, № 2 – модифицированная при 3000 об/мин и № 3 – модифицированная при 6000 об/мин.

На всех образцах были исследованы вольт-амперная характеристика (ВАХ), зависимости диэлектрических параметров и активного сопротивления от частоты переменного напряжения. Исследования проведены при $T = 300$ К. Диэлектрические параметры измерены с помощью цифрового иммитанса E7-20 в диапазоне частот ($25\text{--}10^6$) Гц, а величина активного сопротивления – в интервале частот ($10^4\text{--}50^4$) Гц. Результаты исследований приведены на рис. 1–5.

По известным величинам электрического тока и приложенному переменному напряжению была рассчитана электропроводность образцов по формуле:

$$\sigma = \frac{I l}{U S}, \quad (1)$$

где I – сила тока (А); l – длина образца в метрах; S – поперечное сечение образца (м^2); U – напряжение (В).

Активное сопротивление образцов было определено с помощью формулы:

$$R_a = \frac{1}{\sigma S} l, \quad (2)$$

где σ – электропроводность ($\text{Ом}^{-1} \text{м}^{-1}$).

Площадь поперечного сечения S образца и сила тока, проходящего через него, связаны между собою формулой:

$$I = envS, \quad (3)$$

где e – заряд электрона (Кл); n – концентрация носителей тока (м^{-3}); v – скорость носителей тока (м/с).

Из рис. 1 видно, что зависимость электрического тока от величины постоянного напряжения имеет нелинейный характер. Из-за идентичности характера зависимостей $I = f(U)$ на рис. 1 приведена ВАХ для образца № 1. Согласно многочисленным работам [11–13], причиной

нелинейности ВАХ является наличие потенциальных барьеров в исследованных образцах. Зависимости диэлектрической проницаемости от величины частоты переменного тока в исследованных образцах носят дисперсный характер (см. таблицу). Это объясняется с тем, что с ростом частоты сначала одни, а затем другие заряженные частицы (релаксаторы) не успевают за четверть периода приложенного переменного напряжения достигнуть мест локализации и, непрерывно следуя за изменением электрического поля, дают вклад уже в проводимость [11, 12], в результате чего она увеличивается.

Как видно из таблицы, с ростом уровня модификации величина диэлектрической проницаемости уменьшается. Уменьшение величины диэлектрической проницаемости объясняется тем, что при измельчении происходит дробление частиц бентонитовой глины, а это в свою очередь приводит к росту поверхностной площади и тока через образец (см. рис. 2). Кроме того, при вращении частиц из-за трения происходит их нагрев, в результате которого удаляется часть кристаллической молекулы воды и ОН группы [13]. Тем самым уменьшаются поляризуемость и, как следствие, растет электропроводность и уменьшается активное сопротивление образца (рис. 3). Как видно из рис. 2, зависимость электрического тока от частоты переменного напряжения имеет сложный характер, а именно: с ростом частоты величина переменного тока растет, достигает максимума при частоте порядка 200 кГц (рис. 2, область 1), а затем с дальнейшим ростом частоты – уменьшается (рис. 2, область 2). Отметим, что аналогичная зависимость ВАХ присуща и другим образцам. В исследованных образцах зависимости активного сопротивления от частоты переменного напряжения также носят сложный характер (рис. 3). Для наглядности на зависимости $R_a = f(F)$ (рис. 3) можно выделить три характерные области (а, б, в). Из рис. 3 видно, что независимо от степени модификации на всех образцах в области а с ростом частоты переменного напряжения величина активного сопротивления R_a резко уменьшается почти на порядок и достигает минимального значения при диапазоне частоты (150–160) кГц (область б), где наблюдается монотонное изменение активного сопротивления. В области в с ростом частоты переменного поля на всех образцах наблюдается резкий рост величины активного сопротивления.

Перед тем как анализировать полученные экспериментальные результаты, отметим, что при высоких частотах наблюдается неравномерное распределение электрического тока по сечению проводников, а именно плотность тока

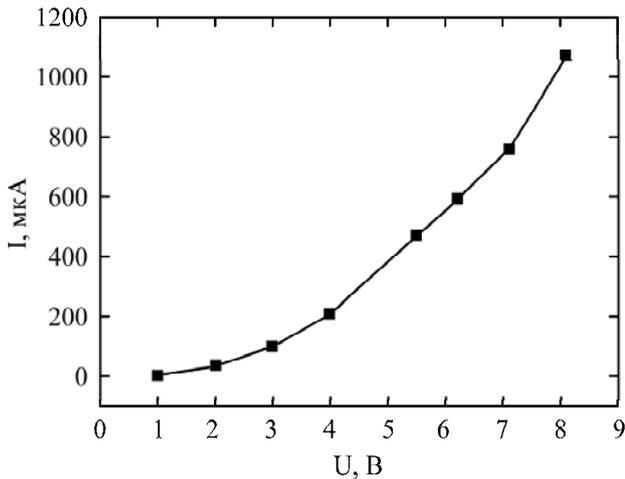


Рис. 1. Зависимость силы тока от напряжения постоянного поля для образца № 1.

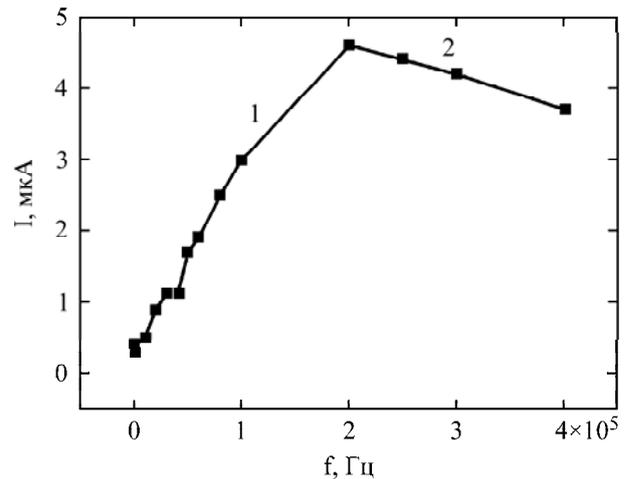


Рис. 2. Зависимость силы тока от частоты переменного напряжения для образца № 2 ($U_{\sim} = 1,14$ V).

Таблица. Изменение диэлектрической проницаемости ϵ для исследованных образцов от частоты переменного напряжения (f)

f , кГц	ϵ , немодифицированный бентонит, образец № 1	ϵ , модифицированный бентонит, 3000 об/мин образец № 2	ϵ , модифицированный бентонит, 6000 об/мин образец № 3
0,025	40800	20400	5920
0,5	6000	1944	464
5	1224	413	176
10	857	300	155
20	593	232	143
100	256	150	124
200	180	138	122

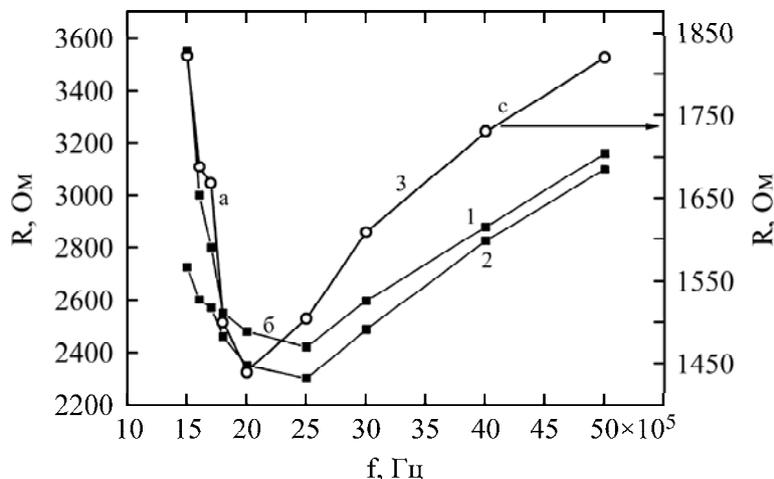


Рис. 3. Зависимость активного сопротивления от частоты переменного напряжения: 1 – образец № 1; 2 – образец № 2; 3 – образец № 3 ($U_{\sim} = 1,14$ V).

максимальна у поверхности и уменьшается по мере проникновения в глубь проводника [14]. Неравномерное распределение тока объясняется действием магнитного поля этого же проводника. Как известно, изменение магнитного потока вызывает появление электродвижущей силы (ЭДС) индукции [14]:

$$e_L = -L \frac{di}{dt}, \quad (4)$$

Если ток изменяется по синусоидальному закону, то индуцируемая ЭДС пропорциональна частоте:

$$I = I_m \sin(\omega t), \quad (5)$$

$$e_L = -\omega L I_m \cos(\omega t), \quad (6)$$

где ω – круговая частота (Гц) $\omega = 2\pi f$; L – индуктивность (Гн).

Известно, что ЭДС самоиндукции имеет направление, противоположное току в проводе и тормозит его изменение в соответствии с законом Ленца.

Следует подчеркнуть, что движущийся по проводнику переменный поток электронов создает вокруг него переменное магнитное поле.

При этом, как видно из рис. 4а, магнитное поле возникает как вне проводника, так и внутри него. Это вызвано тем, что каждый электрон при движении создает вокруг себя магнитное поле. При этом часть электронов движется вблизи оси проводника, создает магнитное поле не только во вне, но и внутри проводника. Причем наиболее быстро движутся электроны, находящиеся у поверхности проводника, а по мере приближения к середине проводника амплитуда (размах) колебаний электронов становится все меньше и меньше. Это связано с тем, что, во-первых, при всяком изменении скорости движения электрона на него действует ЭДС самоиндукции, противодействующая этому изменению – формула (4), а во-вторых, ЭДС самоиндукции зависит от числа магнитных силовых линий вокруг движущегося электрона. Поэтому чем большим числом магнитных силовых линий охватывается электрон, тем труднее ему совершать колебательное движение. По этой причине электроны, находящиеся у поверхности проводника, колеблются с большой амплитудой, а электроны, находящиеся глубоко внутри проводника, – с малой. Дело в том, что первые охватываются только теми магнитными силовыми линиями, которые расположены вне проводника, а вторые охватываются как внешними, так и внутренними магнитными силовыми линиями. Таким образом, плотность переменного тока получается большей у поверхности проводника и меньшей внутри его (рис. 4б). Как видно из рис. 4б, наибольшая плотность тока проявляется около самой поверхности проводника.

Внутренние магнитные силовые линии Внешние магнитные силовые линии



Рис. 4. Поверхностный эффект (скин-эффект) как фактор увеличения активного сопротивления в цепи переменного тока. Ток вытесняется магнитным полем на поверхность проводника (а), поэтому у поверхности проводника плотность тока больше, чем внутри проводника (б).

На основе вышеизложенного наблюдаемые экспериментальные результаты можно объяснить следующим образом. Согласно формуле (5), рост электрического тока через образец (рис. 2, область 1) связан с ростом частоты переменного напряжения. В свою очередь это приводит к росту электропроводности – формула (1), а также к уменьшению активного сопротивления

образца, что подтверждается экспериментальными результатами (рис. 3, область а).

Рост активного сопротивления объясняется тем, что при очень высоких частотах противодействие ЭДС самоиндукции внутри проводника становится настолько сильным, что все носители тока двигаются в узком слое поверхности (рис. 4б) (это явление называется поверхностным эффектом – скин-эффектом) [10–13]. Из формулы (2) видно, что активное сопротивление проводника зависит от его сечения, в то же время полезным сечением при токе высокой частоты оказывается только тонкий наружный слой проводника (рис. 4б). Другими словами, уменьшается эффективное сечение образца (рис. 4б), а также, согласно уравнению (3), величина тока через образец. Вследствие этого растет активное сопротивление образца с ростом частоты переменного напряжения (рис. 3, область с).

Таким образом, установлено влияние частоты переменного напряжения на величину активного сопротивления для исследуемых образцов, а именно с ростом частоты переменного напряжения величина активного сопротивления уменьшается, доходит до минимума, а затем с ростом частоты резко увеличивается. Показано, что причиной роста активного сопротивления в области высоких частот является скин-эффект.

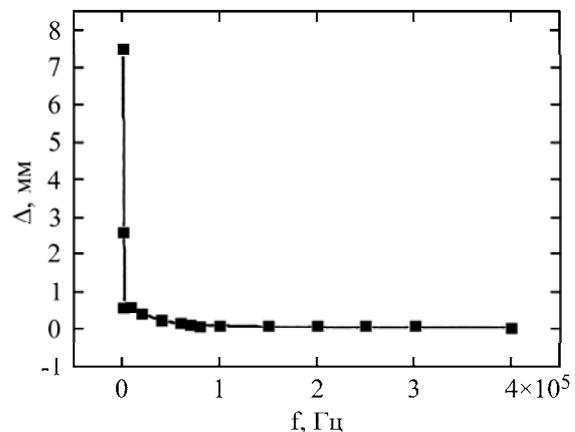


Рис. 5. Зависимость глубины проникновения магнитного поля от частоты переменного напряжения для образца № 3.

Отметим, что резкость проявления поверхностного эффекта усиливается не только при увеличении частоты переменного напряжения, но и при повышении магнитной проницаемости μ и удельной проводимости σ материала. Это объясняется тем, что увеличение μ вызывает увеличение потока внутри провода, то есть приводит к возрастанию индуктивности проводника L , а увеличение μ усиливает влияние ЭДС самоиндукции. Связь глубины проникновения поля с физическими характеристиками вещества определяли выражением [14, 15]:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\gamma\mu_0\mu}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f\mu\mu_0\gamma}}, \quad (7)$$

где ω – круговая частота; γ – проводимость; μ_0 – магнитная проницаемость ($\mu_0 = 4\pi/10^{-7}$ Гн/м); μ – магнитная проницаемость.

По известным величинам с помощью формулы (7) были рассчитаны значения Δ . Из-за идентичного характера зависимостей $\Delta = f(F)$ для исследованных образцов на рис. 5 приведена зависимость $\Delta = f(F)$ для образца № 3.

Как видно из рис. 5, с ростом частоты переменного напряжения зависимость $\Delta = f(F)$ имеет экспоненциальный характер. При расчетах для исследованных образцов была взята $\mu = 1$. Отметим, что в современной радиотехнике при очень высоких частотах наличие скин-эффекта учитывается, а именно: многие детали (волноводы, коаксиальные линии) покрываются тонким, хорошо проводящим слоем серебра, так как их сопротивление практически определяется только поверхностным слоем.

ВЫВОДЫ

Применение полученных экспериментальных результатов на практике.

1. Резкое уменьшение активного сопротивления в диапазоне частот (150–160) кГц можно использовать как электронный частотный ключ.

2. Рост активного сопротивления в области частот ($f > 160$ кГц) можно применить как ограничитель перенапряжений. При этом резистор должен включаться последовательно с защищаемым объектом. В таком случае на низкой частоте он не будет препятствовать прохождению тока, а на высокой – будет служить погашающим фильтром.

ЛИТЕРАТУРА

1. Власов А.А. *Макроскопическая электродинамика*. 2-е изд. М.: Наука, 2005.
2. Берёзкина С.В., Кузнецова И.А., Юшканов А.А. *ЖТФ*. 2004, **74**(12), 67–71.
3. Коробейников С.М., Сарин Л.И., Челазнов А.А. *Труды Второй Всероссийской научно-технической конференции «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6–35 кВ»*, Новосибирск, 15–17 октября. 2002, с. 52–59.
4. Aveek Bid, Achyut Bora, Raychaudhuri A.K. *Phys Rev B*. 2006, **74**, 035426.

5. Матвеев А.Н. *Электричество и магнетизм*. М.: Высшая школа, 1983. 463 с.
6. Patent US 4383225. F. Mayer. N 06/166,403. *Cables with high immunity to electro-magnetic pulses (EMP)*. Appl. date 07.07.1980; publ. date 10.05.1983.
7. Patent US 7671278. Fong J.-G., Lee H.-F., Chen K.-F. N 11/981,287. *Cable having EMI-suppressing arrangement and method for making the same*. Appl. date 31.10.2007; publ. date 02.03.2010.
8. Patent US 5883565. Furino J.P. N 08/941, 7044. *Frequency dependent resistive element*. Appl. date 01.10.1997; publ. date 16.03.1999.
9. Патент 2284622 Российская Федерация. Ефимов Б.В., Данилин А.Н., Колобов В.В. № 2005105918/09. *Устройство для защиты от перенапряжений*. Заявл. 02.03.2005; опубли. 27.09.2006.
10. Патент 132633 Российская Федерация. Коробейников С.М., Илюшов Н.Я., Лавров Ю.А., Лопатин В.В., Брыкин В.П. и др. № 2013120271/07. *Устройство для подавления высокочастотных перенапряжений*. Заявл. 30.04.2013; опубли. 20.09.2013.
11. Валеев Х.С., Квасков В.Б. *Нелинейные металлооксидные полупроводники*. М.: Энергоиздат, 1983. 160 с.
12. Hasanli Sh.M, Azizova Sh.M, Khalilov Dj.Kh., Kharirchi F. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2012, **48**(1), 48–51.
13. Imanova S.R., Hasanli S.M, Samadova U.F., Guseynov R.K. *Eur J Eng Res Sci*. 2018, **3**(6), 28–31.
14. Калашников С.Г. *Электричество*. М.: Физматлит, 2003. 624 с.
15. Бессонов Л.А. *Теоретические основы электротехники*. 9-е изд. М.: Высшая школа, 1996.

Summary

The paper presents the study results of the influence of the frequency of the alternating current on the value of active resistance. It has been revealed that with an increase in the frequency of the alternating field, the value of the active resistance increases to a minimum value, and with a further increase in the frequency, it increases sharply. It is shown that the cause of the growth of active resistance is the skin effect.

Keywords: electrical conductivity, skin effect, bentonite, electromotive force of induction, electromotive force of self-induction, active resistance, resistor, Lenz law.