

УДК 537.312

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ НАНОЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

*С.М. Коробейников, В.Е. Шевченко, А.В. Ридель, Л.П. Горева**

Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

E-mail: korobeynikov@corp.nstu.ru, ridel@corp.nstu.ru, goreva@corp.nstu.ru

Аннотация. *Предпринята попытка оценки электропроводности наножидкости на основе трансформаторного масла. Для этого было приготовлено несколько образцов наножидкости с различными концентрациями диэлектрических наночастиц диоксида кремния и проводящих наночастиц цинка. Экспериментально были измерены диэлектрическая проницаемость и электропроводность полученных наножидкостей. После обработки результатов эксперимента был произведен теоретический расчет с применением формулы Нильсена для композиционных диэлектрических материалов. Результаты расчета сопоставлены с данными эксперимента. В процессе сравнительного анализа отмечено качественное соответствие расчетных и экспериментальных значений диэлектрической проницаемости. Однако экспериментальные и расчетные значения электропроводности существенно различаются. Измеренная электропроводность наномасла оказалась в несколько раз ниже электропроводности исходного масла, в особенности при использовании наночастиц оксида кремния. Обнаруженное расхождение между расчетами и экспериментом объясняется адсорбцией ионов на поверхности частиц и уменьшением тем самым концентрации ионов в жидкости.*

Ключевые слова: *трансформаторное масло, наножидкости, ионы, адсорбция, электропроводность, наночастицы.*

Введение

Изучение влияния включений частиц на электропроводность жидких диэлектриков по-прежнему является актуальной проблемой для электроэнергетики. Значимость возможного влияния присутствия частиц была показана еще в 1970 г. К.У. Смитом и Дж.Х. Калдервудом [1]. При этом особое внимание следует уделить наночастицам, поскольку их фильтрация в ходе исследования [1] привела к наиболее заметному изменению электропроводности. Более поздние работы в этой области также подтверждают возможность существенного влияния наночастиц на электропроводность [2–6].

* *Сергей Миронович Коробейников, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой.*

В.Е. Шевченко, студент.

Александр Викторович Ридель, кандидат технических наук, доцент.

Людмила Павловна Горева, кандидат технических наук, доцент.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-7910198.

Существующие исследования в области изучения электропроводности наножидкостей включают описание широкого спектра образцов с различными жидкостями-основаниями и различными наночастицами [7–9]. Однако результаты аналогичных работ зачастую противоречат друг другу. На наш взгляд, это связано с учетом множества различных факторов, таких как вид используемых частиц, жидкостей или использование поверхностно-активных веществ для стабилизации наножидкости [10–12].

В качестве основы для приготовления наножидкостей особое внимание было уделено таким жидкостям, как вода, этиленгликоль и смеси этих жидкостей в различных концентрациях [13–18]. Общие выводы из рассмотренных работ – в большинстве случаев добавление наночастиц переводит слабопроводящую жидкость в проводящую, значительно увеличивая электропроводность. Кроме того, отмечено значительное влияние вязкости жидкости, концентрации ионов и наличия двойного электрического слоя на изменение электропроводности жидкости.

В рассмотренных статьях было предложено множество корреляционных уравнений для оценки изменения электропроводности на основе экспериментальных данных. Тем не менее в каждой работе предложенные выражения значительно отличались друг от друга, представляя собой линейную зависимость [19, 20], квадратичную и кубическую зависимости [21–23], а также логарифмическую зависимость [24]. В связи с этим на основе этих работ достаточно сложно выработать единую методику оценки электропроводности, особенно учитывая, что рассмотренные в них наножидкости были приготовлены на основе воды или этиленгликоля, а не рассматриваемого нами трансформаторного масла.

Основным же направлением существующих исследований наножидкостей, приготовленных на основе трансформаторного масла, является изучение изменения электрической прочности, причем электропроводность не всегда контролировалась [25–27]. В связи с этим было решено провести измерения электропроводности наножидкостей, приготовленных нами на основе чистого трансформаторного масла. Целью данного исследования является оценка и описание влияния наночастиц на электропроводность и диэлектрическую проницаемость жидкого диэлектрика с использованием теоретических и экспериментальных данных. При проведении эксперимента было решено также рассмотреть возможное влияние как диэлектрических, так и проводящих частиц на свойства наномасла, в качестве которых выбраны часто используемые наночастицы цинка и оксида кремния.

Расчет характеристик композиционного диэлектрического материала

Наиболее правдоподобное описание диэлектрической проницаемости масла с добавлением наночастиц может быть получено с использованием формулы Нильсена, которая ранее была применена для оценки характеристик трансформаторного масла с добавлением керамических микрочастиц [28]. В исследовании [28] было показано полное совпадение данных измерений и расчета с применением формулы Нильсена при значениях объемной доли частиц менее 50 %. В этом случае выражение для расчета диэлектрической проницаемости наножидкостей будет следующим:

$$\varepsilon = \varepsilon_{oil} \frac{1 + A \cdot B \cdot V_k}{1 - A \cdot \psi \cdot V_k}, \quad (1)$$

где ε_{oil} – диэлектрическая проницаемость чистого масла; A – коэффициент, характеризующий форму частиц; V_k – объемная доля частиц в масле.

Коэффициент B зависит от диэлектрической проницаемости частиц и рассчитывается следующим образом:

$$B = \frac{\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{oil}} - 1}{\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{oil}} + A}, \quad (2)$$

где ε_p – диэлектрическая проницаемость частиц.

Коэффициент ψ зависит от максимально возможной объемной доли частиц и был рассчитан в соответствии с выражением

$$\psi = 1 + \frac{1 - P_m}{P_m^2} \cdot V_k, \quad (3)$$

где P_m – максимально возможная объемная доля частиц.

Эти соображения также применимы для расчета электропроводности композиционных материалов. В этом случае (1) и (2) преобразуются следующим образом:

$$\sigma = \sigma_{oil} \frac{1 + A \cdot B \cdot V_k}{1 - B \cdot \psi \cdot V_k}, \quad (4)$$

$$B = \frac{\frac{\sigma_p}{\sigma_{oil}} - 1}{\frac{\sigma_p}{\sigma_{oil}} + A}, \quad (5)$$

где σ_{oil} – электропроводность чистого масла; σ_p – электрическая проводимость частиц.

В расчетах принимается, что частицы SiO_2 являются идеальным диэлектриком, а частицы Zn – идеальным проводником с соответствующими значениями диэлектрической проницаемости и электропроводности. Форму частиц считали сферической ($A=1,5$), а максимально возможную объемную долю твердой фазы принимали равной 0,74.

Электропроводность различных типов и марок трансформаторного масла может значительно отличаться друг от друга. Чтобы убедиться в точности результатов расчетов, было решено провести экспериментальные измерения электропроводности как для подготовленных наножидкостей, так и для чистого масла.

Результаты эксперимента

В качестве основы для наножидкости использовалось чистое трансформаторное масло ГК, в которое были добавлены или диэлектрические наночастицы диоксида кремния диаметром 20 нанометров, или проводящие наночастицы цинка диаметром 100 нанометров.

Свежее масло марки ГК не подвергалось дополнительной обработке после приобретения, как и наночастицы цинка и диоксида кремния. Единственный момент, который следует подчеркнуть, заключается в том, что эти вещества хранились в закрытых емкостях до смешивания.

Цель эксперимента состояла в том, чтобы зафиксировать изменения электрических характеристик масла после добавления нанопорошков и дальнейшие изменения этих параметров при увеличении концентрации частиц примерно на порядок величины.

Взвешивание частиц для приготовления смеси проводилось на химических весах с точностью до четвертого знака. Необходимый объем масла отмерялся в специальной мерной колбе. После замеров масло с добавленными частицами отправлялось на диспергирование для равномерного распределения частиц по всему объему масла.

Диспергирование осуществлялось в два этапа. Первый этап включал обработку ультразвуком с помощью ультразвукового устройства П10. Мощность устройства составляет 1200 Вт при рабочей частоте 22 килогерца. Обработка одного образца осуществлялась в течение 30 минут.

Вторая стадия приготовления наножидкости проводилась с помощью диспергатора КА Т25 со скоростью вращения 23000 оборотов в минуту. Перемешивание происходило в три подхода по 10 минут для каждого образца. Интервал между подходами составлял 10 минут. После завершения процесса диспергирования приготовленные наножидкости направлялись для проведения измерений.

Измерения проходили в соответствии со стандартом ИЕС для определения диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь и удельного электрического сопротивления [29].

В качестве измерительного прибора использовался тестер трансформаторного масла BAUR DTL C. Инструментальная погрешность измерения составляет 0,5 %. Измерения проводились при температуре масла, равной 90 °С, и напряжении, равном 500 вольтам. Достоверность данных, полученных в ходе измерения, была обеспечена двумя измерениями для каждого образца наножидкости.

Результаты измерений диэлектрической проницаемости и удельного электрического сопротивления для чистого масла и наножидкостей представлены в таблице.

В соответствии с (1)–(5) были рассчитаны диэлектрическая проницаемость и электропроводность полученных наножидкостей. Удельное электрическое сопротивление определяли из значений электропроводности. Далее был проведен сравнительный анализ результатов расчета с экспериментальными данными. Результаты представлены на рис. 1–4 в виде графиков зависимости диэлектрической проницаемости и удельного электрического сопротивления от объемного содержания частиц для наножидкостей с SiO₂ и Zn соответственно.

Следует отметить, что расчетные значения диэлектрической проницаемости не противоречат экспериментальным данным как для SiO_2 , так и для Zn , в том числе имеет значение тот факт, что диэлектрическая проницаемость масла с частицами Zn оказалась несколько выше по сравнению с диэлектрической проницаемостью наномасла на основе SiO_2 .

Значения диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления для исследуемых образцов масла

Образец	Изменяемые параметры	
	Диэлектрическая проницаемость	Удельное сопротивление, Ом·м
Чистое масло	2.05	$114 \cdot 10^9$
Масло + SiO_2 , 0,001 г / 500 мл	2.05	$126 \cdot 10^9$
Масло + SiO_2 , 0,01 г / 500 мл	2.05	$267 \cdot 10^9$
Масло + SiO_2 , 0,1 г / 500 мл	2.05	$146 \cdot 10^{10}$
Масло + Zn , 0,1 г / 500 мл	2.06	$198 \cdot 10^9$
Масло + Zn , 1 г / 500 мл	2.06	$299 \cdot 10^9$

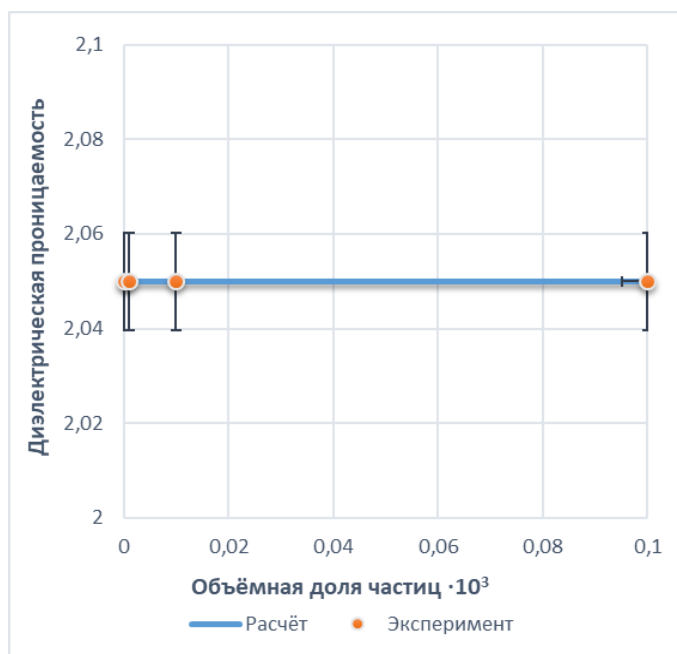


Рис. 1. Зависимость диэлектрической проницаемости наномасла на основе SiO_2 от объемной доли частиц

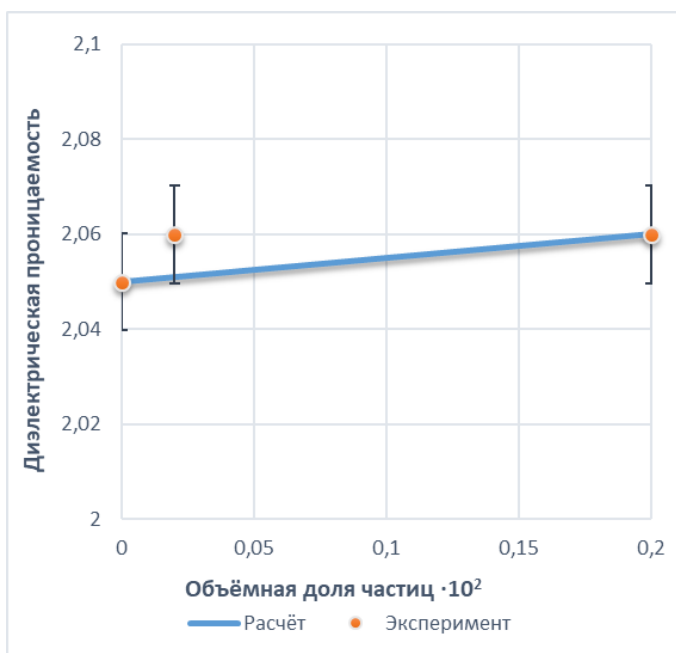


Рис. 2. Зависимость диэлектрической проницаемости наномасла на основе Zn от объёмной доли частиц

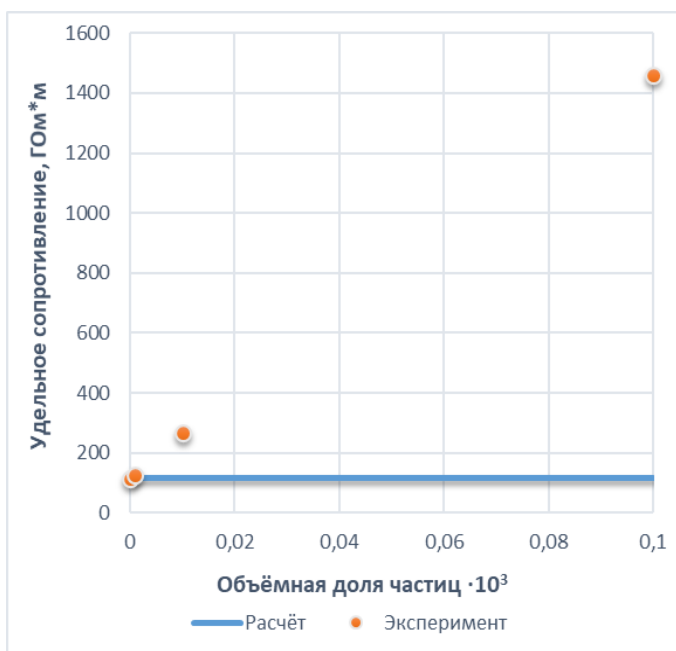


Рис. 3. Зависимость удельного электрического сопротивления наномасла на основе SiO₂ от объёмной доли частиц

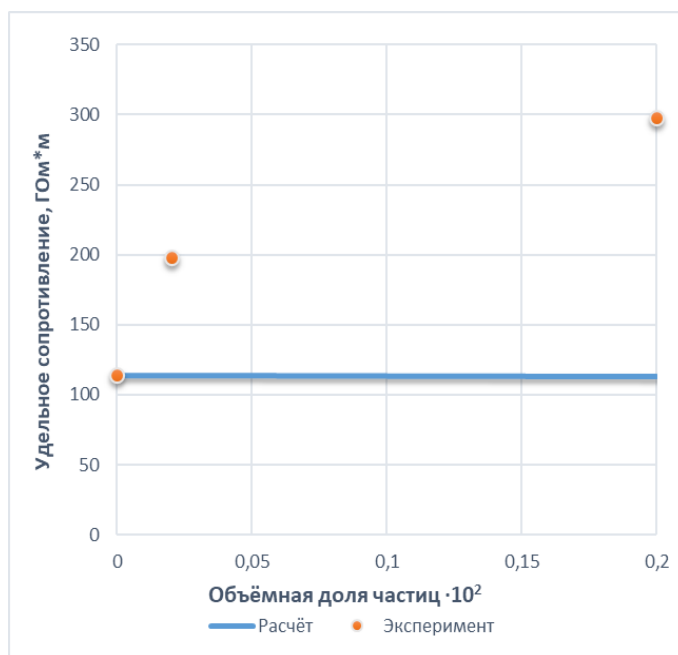


Рис. 4. Зависимость удельного электрического сопротивления наномасла на основе Zn от объемной доли частиц

Более примечательным является изменение удельного сопротивления смесей. Измеренная зависимость удельного сопротивления наномасла от объемной доли включений явно противоречит расчету, в котором зависимость удельного сопротивления от концентрации частиц незначительна.

С чем может быть связано это противоречие? Дело в том, что электропроводность жидких диэлектриков имеет преимущественно ионную природу [30, 31]. В этом случае носителями заряда будут ионы, содержащиеся в жидкости и образующиеся главным образом в результате электролитической диссоциации примесей. Когда наночастицы попадают в масло, запускается процесс адсорбции ионов частицами, в результате чего их поверхность приобретает заряд.

Это приводит к тому, что количество носителей заряда непосредственно в жидкости уменьшается и добавленные частицы становятся носителями заряда. Так как частицы в слабых электрических полях обладают значительно меньшей подвижностью по сравнению с ионами, результирующее сопротивление будет значительно выше за счет уменьшения числа ионов в жидкости.

Схожий эффект можно наблюдать в статье [32], где после определенного порога концентрации частиц отмечено снижение электропроводности приготовленной наножидкости, предположительно за счет того, что используемый в качестве частиц оксид алюминия является активным адсорбентом. Авторы связывают это снижение с недостатком в жидкости ионов для компенсации и увеличения подвижности за счет двойного электрического слоя.

Важным замечанием является то, что оксиды являются более активными адсорбентами по сравнению с металлами. Это объясняет более значительное снижение электропроводности наножидкости на основе SiO₂ при меньшей объемной доле в сравнении с наножидкостью на основе Zn.

Следует отметить, что адсорбция частицами ионов одного знака должна приводить к сдвигу ионного равновесия в жидкости. В свою очередь, этот сдвиг равновесия провоцирует дополнительную диссоциацию ионных примесей и образование большего количества ионов обоих знаков. По-видимому, этим же фактором можно объяснить рост электропроводности в ряде работ, в которых основой наножидкости являются слабопроводящие ионогенные жидкости типа воды, этиленгликоля [7, 9].

При высокой концентрации ионогенных примесей увеличение электропроводности в результате образования дополнительных носителей заряда может компенсировать снижение электропроводности и даже привести к ее увеличению по сравнению с чистым диэлектриком. В связи с этим можно сделать вывод, что в очищенном трансформаторном масле, рассматриваемом нами, недостаточно примесей, способных к диссоциации, чтобы компенсировать снижение электропроводности.

Заключение

В статье представлены результаты экспериментального измерения диэлектрической проницаемости и удельного электрического сопротивления наножидкостей, приготовленных на основе трансформаторного масла с добавлением различных концентраций нанопорошков SiO_2 и Zn .

После проведенных измерений была предпринята попытка описать процесс изменения электропроводности и диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков в результате добавления наночастиц. Полученные теоретические результаты анализируются в сравнении с экспериментальными данными.

Анализ выявил, что расчетные значения диэлектрической проницаемости не противоречат экспериментальным данным. Однако выявилось несоответствие теоретического изменения электропроводности по сравнению с экспериментальными данными.

В связи с выявленным противоречием было предложено объяснение, указывающее на возможную причину расхождения и учитывающее большее изменение электропроводности наночастиц в смесях с оксидами кремния, чем с цинком при меньшей объемной доле частиц. Это связано с адсорбцией ионов на поверхности наночастиц, особенно оксида кремния, в результате чего количество ионов в жидкости уменьшается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Mirza J.S., Smith C.W., Calderwood J.H.* Liquid motion and internal pressure in electrically stressed insulating liquids // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1970. V. 3. № 4. P. 580.
2. *Tettey K.E., Yee M.Q., Lee D.* Layer-by-layer assembly of charged particles in nonpolar media // *Langmuir*. 2010. V. 26. № 12. Pp. 9974–9980.
3. *Strubbe F., Beunis F., Neyts K.* Detection of elementary charges on colloidal particles // *Physical review letters*. 2008. V. 100. № 21. P. 218301.
4. *Smith P.G. et al.* Electrophoretic mobility measurement by differential-phase optical coherence tomography // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2007. V. 111. № 6. Pp. 2614–2622.
5. *Smith P.G. et al.* Effect of surface hydrophilicity on charging mechanism of colloids in low-permittivity solvents // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2007. V. 111. № 2. Pp. 840–848.
6. *Kobayashi M. et al.* Aggregation and charging of colloidal silica particles: effect of particle size // *Langmuir*. 2005. V. 21. № 13. Pp. 5761–5769.
7. *Minea A.A.* A review on electrical conductivity of nanoparticle-enhanced fluids // *Nanomaterials*. 2019. V. 9. № 11. P. 1592.

8. *Huang Z., Wang F., Wang Q., Yao W. et al.* Significantly enhanced electrical performances of eco-friendly dielectric liquids for harsh conditions with fullerene // *Nanomaterials*. 2019. V. 9. № 7. P. 989.
9. *Рудяк В.Я., Минаков А.В., Пряжников М.И.* Электропроводность наножидкостей с металлическими частицами // *Письма в Журнал технической физики*. 2019. Т. 45. № 9. С. 36–39.
10. *Fal J., Mahian O., Żyła G.* Nanofluids in the service of high voltage transformers: breakdown properties of transformer oils with nanoparticles, a review // *Energies*. 2018. V. 11. № 11. С. 2942.
11. *Li J., Liao R., Yang L.* Investigation of natural ester based liquid dielectrics and nanofluids // 2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application. IEEE, 2012. P. 16–21.
12. *Dong M. et al.* Insight into the dielectric response of transformer oil-based nanofluids // *AIP Advances*. 2017. V. 7. № 2.
13. *Akilu S. et al.* Viscosity, electrical and thermal conductivities of ethylene and propylene glycol-based β -SiC nanofluids // *Journal of Molecular Liquids*. 2019. V. 284. Pp. 780–792.
14. *Żyła G. et al.* Nanodiamonds–ethylene glycol nanofluids: experimental investigation of fundamental physical properties // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. V. 121. Pp. 1201–1213.
15. *Bagheli S. et al.* Synthesis and experimental investigation of the electrical conductivity of water based magnetite nanofluids // *Powder Technology*. 2015. V. 274. Pp. 426–430.
16. *Coelho M.F. et al.* Permittivity and electrical conductivity of copper oxide nanofluid (12 nm) in water at different temperatures // *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2019. V. 132. P. 164–173.
17. *Sarojini K.G.K. et al.* Electrical conductivity of ceramic and metallic nanofluids // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2013. V. 417. Pp. 39–46.
18. *Guo Y. et al.* Experimental investigation of thermal and electrical conductivity of silicon oxide nanofluids in ethylene glycol/water mixture // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. V. 117. Pp. 280–286.
19. *Żyła G., Fal J.* Experimental studies on viscosity, thermal and electrical conductivity of aluminum nitride–ethylene glycol (AlN–EG) nanofluids // *Thermochimica acta*. 2016. V. 637. Pp. 11–16.
20. *Ganguly S., Sikdar S., Basu S.* Experimental investigation of the effective electrical conductivity of aluminum oxide nanofluids // *Powder Technology*. 2009. V. 196. № 3. Pp. 326–330.
21. *Fal J. et al.* Electrical conductivity and dielectric properties of ethylene glycol-based nanofluids containing silicon oxide–lignin hybrid particles // *Nanomaterials*. 2019. V. 9. № 7. P. 1008.
22. *Minea A.A.* Electrical and rheological behavior of stabilized Al₂O₃ nanofluids // *Current Nanoscience*. 2013. V. 9. № 1. Pp. 81–88.
23. *Chereches E.I., Minea A.A.* Electrical conductivity of new nanoparticle enhanced fluids: An experimental study // *Nanomaterials*. 2019. V. 9. № 9. P. 1228.
24. *Islam R., Shabani B.* Prediction of electrical conductivity of TiO₂ water and ethylene glycol-based nanofluids for cooling application in low temperature PEM fuel cells // *Energy Procedia*. 2019. V. 160. Pp. 550–557.
25. *Du B. et al.* Preparation and breakdown strength of Fe₃O₄ nanofluid based on transformer oil // 2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application. IEEE, 2012. Pp. 311–313.
26. *Bakrtheen M., Karthik R., Madavan R.* Investigation of critical parameters of insulating mineral oil using semiconductive nanoparticles // 2013 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT). IEEE, 2013. Pp. 294–299.
27. *Rafiq M. et al.* Effect of SiO₂ nanoparticle on insulating breakdown properties of transformer oil // 2016 IEEE international conference on high voltage engineering and application (ICHVE). IEEE, 2016. Pp. 1–4.
28. *Белокуров Е.М. и др.* Исследование диэлектрических сред с повышенной диэлектрической проницаемостью // *Коллоидный журнал*. 2001. Т. 63. № 4. С. 437–444.
29. *Insulating liquids Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor (tan d) and d.c. resistivity, IEC 60247, 2004.*

30. *Felici N.J., Tobazeon R.E.* Charge carrier elimination and production by electro-dialytic polymers in contact with dielectric liquids // *Journal of Electrostatics*. 1981. V. 11. № 2. Pp. 135–161.
31. *Tobazeon R., Filippini J.C., Marteau C.* On the measurement of the conductivity of highly insulating liquids // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 1994. V. 1. № 6. Pp. 1000–1004.
32. *Zawrah M.F. et al.* Stability and electrical conductivity of water-base Al_2O_3 nanofluids for different applications // *HBRC journal*. 2016. V. 12. № 3. Pp. 227–234.

Статья поступила в редакцию 16 декабря 2023 г.

MEASUREMENT OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF TRANSFORMER OIL BASED NANOFLUID

S.M. Korobeynikov, V.E. Shevchenko, A.V. Ridel, L.P. Goreva *

Novosibirsk State Technical University
20, Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation

E-mail: korobeynikov@corp.nstu.ru, ridel@corp.nstu.ru, goreva@corp.nstu.ru

Abstract. *In this article, an attempt was made to evaluate the electrical conductivity of a nanofluid based on transformer oil. For this purpose, several nanofluid samples with different concentrations of dielectric silicon dioxide nanoparticles and conductive zinc nanoparticles were prepared. The dielectric permittivity and electrical conductivity of the obtained nanofluids were measured experimentally. After processing the experimental results, a theoretical calculation was made using the Nielsen formula. After the calculation, the results were compared with the experimental data. In the process of comparative analysis, the correspondence of the calculated and experimental values of the dielectric permittivity was noted. There was also a discrepancy between the experimental and calculated values of electrical conductivity. An explanation is proposed for the discovered discrepancy between the calculated and experimental values. Presumably, the main reason for the decrease in electrical conductivity in the experiment is the adsorption of ion particles in the dielectric.*

Keywords: *transformer oil, nanofluids, ions, adsorption, conductivity, nanoparticles.*

REFERENCES

1. *Mirza J.S., Smith C.W., Calderwood J.H.* Liquid motion and internal pressure in electrically stressed insulating liquids // *Journal of Physics D: Applied Physics.* 1970. V. 3. № 4. P. 580.
2. *Tettey K.E., Yee M.Q., Lee D.* Layer-by-layer assembly of charged particles in nonpolar media // *Langmuir.* 2010. V. 26. № 12. Pp. 9974–9980.
3. *Strubbe F., Beunis F., Neyts K.* Detection of elementary charges on colloidal particles // *Physical review letters.* 2008. V. 100. № 21. Pp. 218301.
4. *Smith P.G. et al.* Electrophoretic mobility measurement by differential-phase optical coherence tomography // *The Journal of Physical Chemistry C.* 2007. V. 111. № 6. Pp. 2614–2622.
5. *Smith P.G. et al.* Effect of surface hydrophilicity on charging mechanism of colloids in low-permittivity solvents // *The Journal of Physical Chemistry C.* 2007. V. 111. № 2. Pp. 840–848.
6. *Kobayashi M. et al.* Aggregation and charging of colloidal silica particles: effect of particle size // *Langmuir.* 2005. V. 21. № 13. Pp. 5761–5769.
7. *Minea A.A.* A review on electrical conductivity of nanoparticle-enhanced fluids // *Nanomaterials.* 2019. V. 9. № 11. P. 1592.
8. *Huang Z., Wang F., Wang Q., Yao W. et al.* Significantly enhanced electrical performances of eco-friendly dielectric liquids for harsh conditions with fullerene // *Nanomaterials.* 2019. V. 9. № 7. P. 989.
9. *Rudyak V.Y., Minakov A.V., Pryazhnikov M.I.* Elektroprovodnost' nanozhidkostej s metallicheskimi chasticami [Electrical conductivity of nanofluids with metal particles] // *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki.* 2019. V. 45. № 9. Pp. 36–39. (In Russian)
10. *Fal J., Mahian O., Żyła G.* Nanofluids in the service of high voltage transformers: breakdown properties of transformer oils with nanoparticles, a review // *Energies.* 2018. V. 11. № 11. C. 2942.

* *Sergej M. Korobejnikov (Dr. (Techn.)), Professor.*

V.E. Shevchenko, Student.

Alexander V. Rydel (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Ludmila P. Goreva (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

11. *Li J., Liao R., Yang L.* Investigation of natural ester based liquid dielectrics and nanofluids // 2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application. IEEE, 2012. Pp. 16–21.
12. *Dong M. et al.* Insight into the dielectric response of transformer oil-based nanofluids // AIP Advances. 2017. V. 7. № 2.
13. *Akilu S. et al.* Viscosity, electrical and thermal conductivities of ethylene and propylene glycol-based β -SiC nanofluids // Journal of Molecular Liquids. 2019. V. 284. Pp. 780–792.
14. *Żyła G. et al.* Nanodiamonds–ethylene glycol nanofluids: experimental investigation of fundamental physical properties // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. V. 121. Pp. 1201–1213.
15. *Bagheli S. et al.* Synthesis and experimental investigation of the electrical conductivity of water based magnetite nanofluids // Powder Technology. 2015. V. 274. Pp. 426–430.
16. *Coelho M.F. et al.* Permittivity and electrical conductivity of copper oxide nanofluid (12 nm) in water at different temperatures // The Journal of Chemical Thermodynamics. 2019. V. 132. Pp. 164–173.
17. *Sarojini K.G.K. et al.* Electrical conductivity of ceramic and metallic nanofluids // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2013. V. 417. Pp. 39–46.
18. *Guo Y. et al.* Experimental investigation of thermal and electrical conductivity of silicon oxide nanofluids in ethylene glycol/water mixture // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. V. 117. Pp. 280–286.
19. *Żyła G., Fal J.* Experimental studies on viscosity, thermal and electrical conductivity of aluminum nitride–ethylene glycol (AlN–EG) nanofluids // Thermochimica acta. 2016. V. 637. Pp. 11–16.
20. *Ganguly S., Sikdar S., Basu S.* Experimental investigation of the effective electrical conductivity of aluminum oxide nanofluids // Powder Technology. 2009. V. 196. № 3. Pp. 326–330.
21. *Fal J. et al.* Electrical conductivity and dielectric properties of ethylene glycol-based nanofluids containing silicon oxide–lignin hybrid particles // Nanomaterials. 2019. V. 9. № 7. P. 1008.
22. *Minea A.A.* Electrical and rheological behavior of stabilized Al₂O₃ nanofluids // Current Nanoscience. 2013. V. 9. № 1. Pp. 81–88.
23. *Chereches E.I., Minea A.A.* Electrical conductivity of new nanoparticle enhanced fluids: An experimental study // Nanomaterials. 2019. V. 9. № 9. P. 1228.
24. *Islam R., Shabani B.* Prediction of electrical conductivity of TiO₂ water and ethylene glycol-based nanofluids for cooling application in low temperature PEM fuel cells // Energy Procedia. 2019. V. 160. Pp. 550–557.
25. *Du B. et al.* Preparation and breakdown strength of Fe₃O₄ nanofluid based on transformer oil // 2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application. IEEE, 2012. Pp. 311–313.
26. *Bakrtheen M., Karthik R., Madavan R.* Investigation of critical parameters of insulating mineral oil using semiconductive nanoparticles // 2013 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT). IEEE, 2013. Pp. 294–299.
27. *Rafiq M. et al.* Effect of SiO₂ nanoparticle on insulating breakdown properties of transformer oil // 2016 IEEE international conference on high voltage engineering and application (ICHVE). IEEE, 2016. Pp. 1–4.
28. *Belokurov E.M. et al.* Issledovanie dielektricheskikh sred s povyshennoj dielektricheskoy pronicaemost'yu [Investigation of dielectric media with increased dielectric permittivity] // Kolloidnyj zhurnal. 2001. V. 63. № 4. Pp. 437–444. (In Russian)
29. Insulating liquids Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor (tan d) and d.c. resistivity, IEC 60247, 2004.
30. *Felici N.J., Tobazeon R.E.* Charge carrier elimination and production by electroalytic polymers in contact with dielectric liquids // Journal of Electrostatics. 1981. V. 11. № 2. Pp. 135–161.
31. *Tobazeon R., Filippini J.C., Marteau C.* On the measurement of the conductivity of highly insulating liquids // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1994. V. 1. № 6. Pp. 1000–1004.
32. *Zawrah M.F. et al.* Stability and electrical conductivity of water-base Al₂O₃ nanofluids for different applications // HBRC journal. 2016. V. 12. № 3. Pp. 227–234.