

Экспериментальное исследование токов проводимости в тонких пленках трансформаторного масла

Ю.А. Митькин, Э.Л. Начатой
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: mua@vetf.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время актуальными являются вопросы повышения эффективности диагностики технического состояния маслonaполненного электрооборудования. В связи с этим интерес исследователей вызывают методы оценки содержания примесей в трансформаторном масле по токам его проводимости. Подобные методики, пригодные для эксплуатации, на данный момент отсутствуют, кроме того, имеются трудности в интерпретации полученных результатов в связи со сложностью физических процессов. В связи с этим возникает необходимость в дополнительном изучении явлений электропроводности масла в тонких пленках с учетом влияния химических и механических примесей, характерных для эксплуатационного масла.

Материалы и методы: Проводится экспериментальное исследование процессов электропроводности в тонких пленках трансформаторного масла в однородном электрическом поле при воздействии прямоугольных импульсов напряжения большой длительности с последующей сменой их полярности.

Результаты: Получены экспериментальные временные зависимости токов проводимости тонких пленок технически чистого трансформаторного масла, масла с добавлением химических примесей NaCl и йод, а также при наличии последовательно установленной твердой диэлектрической пленки. Показано, что временные зависимости тока через трансформаторное масло имеют сложный вид и определяются количеством и видом примесей. Исследованы прямоугольные импульсы напряжения со сменой полярности.

Выводы: Применение прямоугольных импульсов напряжения со сменой полярности позволяет выявить влияние примесей на токи проводимости в тонких пленках. Для практической реализации этого эффекта необходима установка в ячейку тонких барьеров из твердого диэлектрика, позволяющих наблюдать процессы электропроводности масла при повышенных значениях напряженности электрического поля.

Ключевые слова: токи проводимости, трансформаторное масло, тонкие пленки, примеси, диагностика изоляции электрооборудования, прямоугольные импульсы, твердые барьеры.

Experimental study of conduction currents in thin films of transformer oil

Yu.A. Mit'kin, E.L. Nachatoy
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: mua@vetf.ispu.ru

Abstract

Background: Increasing the efficiency of oil-filled electrical equipment performance diagnostics is an urgent task nowadays. Therefore, researchers' interest lies in the methods of assessing impurity content in transformer oil by its conduction currents. However, there are currently no usable methods of this type and it is rather difficult to interpret the obtained results due to the complexity of physical processes. Therefore, further research is necessary on phenomena of oil electrical conductivity in thin films, with the influence of chemical and mechanical impurities, typically found in working oil, taken into consideration.

Materials and methods: The paper represents an experimental study of electrical conductivity processes in transformer oil thin films in uniform electric field under the influence of continuous voltage square pulses with further polarity changing.

Results: The authors have obtained experimental time dependences of conduction currents in thin films of pure transformer oil, oil with NaCl and iodine chemical contaminants, and with a serially installed solid dielectric film. It has been shown that time dependences of current in transformer oil have a complex form and depend on the quantity and type of contaminants. The authors have also investigated voltage square pulses with changing polarity.

Conclusions: Using voltage square pulses with changing polarity makes it possible to detect the contaminants influence on conduction currents in thin films. These effects can be achieved practically by installing thin solid dielectric barriers in the experimental cell, which enables oil electrical conductivity processes to be observed at high values of electric field strength.

Key words: conduction currents, transformer oil, thin films, contaminants, diagnostics of electrical equipment insulation, square pulses, solid barriers.

Введение. В настоящее время актуальными являются вопросы повышения эффективности диагностики технического состояния маслонаполненного электрооборудования. В связи с этим интерес исследователей вызывают методы оценки содержания примесей в трансформаторном масле по токам его проводимости [1]. Подобные методики, пригодные для эксплуатации, на данный момент отсутствуют [2].

Современный взгляд на процессы электропроводности жидких диэлектриков отражен в работах [1, 3]. Отмечается сложность указанных процессов и их принципиальное отличие от явлений электропроводности в газах и твердых диэлектриках. Для жидкостей выделяют ионную, катафоретическую и электронную проводимости. Отдельно рассматривают процессы в слабых (до 10 кВ/см) и сильных (свыше 100 кВ/см) полях [1].

Электропроводность жидких диэлектриков в значительной степени определяется наличием механических и химических примесей [3, 4]. Так, в [5] отмечается, что добавление йода изменяет механизм инжекции свободных зарядов в жидкий диэлектрик, что приводит к изменению его электрической прочности [4].

В [6] отмечается характерный максимум на ампер-временной характеристике жидкого диэлектрика при смене полярности воздействующего напряжения, причем этот эффект связывается с возможным накоплением и последующим рассасыванием объемного заряда в приэлектродных областях. Аналогичные результаты получены в [1] при наблюдении за формой тока через тонкие пленки жидкого диэлектрика в комбинированной бумажно-масляной изоляции (эффект Гартона).

Интерес к исследованию электропроводности тонких пленок жидких диэлектриков обусловлен также тем, что в них влияние электрогидродинамических течений [7] на электропроводность значительно снижается, поэтому в тонких пленках более четко проявляются особенности влияния примесей на формирование процессов электропроводности.

Вместе с тем в [1, 6] отмечаются затруднения в интерпретации результатов исследований электропроводности в тонких пленках, что во многом обусловлено ограниченным числом экспериментальных данных, особенно при воздействии знакопеременных импульсов в широком диапазоне их длительности. Такое положение сдерживает разработку методики оценки содержания примесей в жидком диэлектрике на основе анализа токов проводимости.

Ниже предлагается исследование процессов электропроводности в тонких пленках трансформаторного масла в однородном электрическом поле при длительном воздействии напряжения с последующей сменой его поляр-

ности (прямоугольный импульс). С учетом этого выполнены экспериментальные исследования токов проводимости промежутков, заполненных средами: технически чистым трансформаторным маслом; технически чистым трансформаторным маслом и последовательно установленной с ним твердой диэлектрической пленкой; технически чистым трансформаторным маслом с добавлением химических примесей NaCl, йод.

Экспериментальная установка и методика эксперимента. Для проведения исследования была создана экспериментальная установка (рис. 1), состоящая из блока формирования импульсов (БФИ), который создает прямоугольные импульсы напряжения (рис. 2) амплитудой до 400 В с возможностью резкой смены полярности.

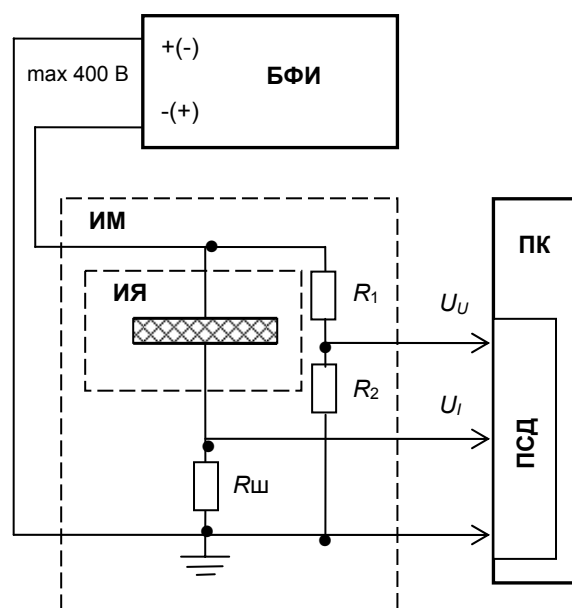


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

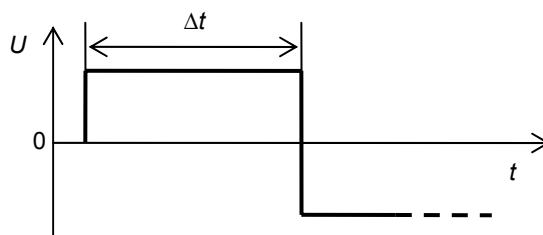


Рис. 2. Импульс напряжения, подаваемый на испытательную ячейку

Длительность формируемых БФИ импульсов может изменяться в широких пределах. Время переключения БФИ составляет менее 2 мс. В устройстве применены твердотельные реле, что позволило добиться высокой стабильности работы и отсутствия шумов типа «дребезг», свойственных механическим коммутаторам. Импульсы напряжения с БФИ подаются на испытательный модуль (ИМ), со-

стоящий из испытательной ячейки (ИЯ) и цепей измерения. Испытательная ячейка состоит из двух плоских электродов, поверхность которых механически обработана для достижения минимальной неровности. Электроды снабжены набором дистанцирующих распорок, задающих межэлектродное расстояние. Система помещается в прозрачную кювету с исследуемым жидким диэлектриком. Отметим, что для всех опытов характерные размеры электродов ($100 \times 100 \text{ мм}^2$) значительно больше расстояния между ними, следовательно, электрическое поле в межэлектродном пространстве можно считать однородным. К измерительным цепям ИМ относятся делитель напряжения R_1-R_2 и токоизмерительное сопротивление $R_{\text{ш}}$, предназначенные соответственно для измерения напряжения на ячейке и протекающего через нее тока. Вторичные напряжения с измерительных цепей (U_U, U_I) регистрируются программно-аппаратным комплексом, состоящим из персонального компьютера (ПК), снабженного платой сбора данных (ПСД) и специализированным программным обеспечением. Комплекс позволяет длительное время проводить регистрацию и сохранение в файл получаемых данных с периодом дискретизации до 10 мкс. Анализ и обработка сохраненных данных происходят в системе MathCad.

Методика эксперимента заключается в следующем. Межэлектродное пространство испытательной ячейки заполняется исследуемым трансформаторным маслом, устанавливается требуемая толщина масляной пленки h путем изменения расстояния между электродами. Далее на ячейку подается импульс напряжения заданной амплитуды и длительности Δt (рис. 2). При этом происходит непрерывная регистрация временных зависимостей напряжения на ячейке и тока через нее.

Исследуемое технически чистое трансформаторное масло было взято из эксплуатации и пригодно для использования в силовых трансформаторах 110 кВ. Отметим, что все проведенные эксперименты были проведены при температуре окружающего воздуха 20°C и влажности 60 %, при этом масло хранилось в герметично закрытой таре и имело температуру окружающей среды.

Выбор толщины масляной пленки и напряженности электрического поля для эксперимента. В [1] отмечается, что при напряженностях электрического поля до 10 кВ/см электропроводность жидких диэлектриков подчиняется закону Ома, что соответствует области слабых полей. При больших напряженностях наблюдаются нелинейные токовые эффекты, усложняющие анализ явлений. Поэтому было принято решение проводить эксперименты при напряженностях, близких к области слабых полей.

В первых сериях опытов, проведенных с технически чистым трансформаторным маслом, была выбрана толщина масляной пленки 0,15 мм и амплитуда напряжения 200 В, что соответствовало максимальной напряженности $E_{\text{MAX}} = 13,3 \text{ кВ/см}$. Однако при таких условиях происходили интенсивные микропробои масляной пленки, что было заметно по частым импульсам тока значительной амплитуды на ампер-секундной характеристике процесса. При этом в испытательной ячейке отмечалось потрескивание. Хотя напряженность 13,3 кВ/см меньше пробивной, но, по всей видимости, при малом межэлектродном расстоянии ее достаточно для формирования мостиков из частиц примесей или эмульгированной воды [8]. Кроме того, в [9] отмечается высокая чувствительность электрической прочности тонких пленок к наличию примесей. Поэтому далее принято решение увеличить толщину масляной пленки до 0,35 мм, при которой интенсивность микропробоев снижается до приемлемого уровня.

Исследование технически чистого трансформаторного масла. Была проведена серия экспериментов по исследованию токов проводимости в технически чистом трансформаторном масле при толщине пленки 0,35 мм и максимальной напряженности 5,7 кВ/см. Временные зависимости напряжения на ячейке и тока через нее для типичного опыта представлены на рис. 3.

На графике можно видеть короткие импульсы тока значительной амплитуды, возникающие в момент смены полярности напряжения. Эти импульсы соответствуют процессам быстрой поляризации, происходящим в испытательной ячейке, и не представляют интереса в контексте данного исследования.

Далее, в след за поляризационными импульсами при каждой смене полярности (рис. 3) наблюдается относительно быстрый рост тока проводимости и последующий медленный его спад до некоторого установившегося значения. Таким образом, ток проходит через определенный максимум. На рис. 4 представлено подробное изображение выделенного участка графика рис. 3. При заданных условиях нарастание тока происходило за 0,5 с, а его спад – за 4–5 с. Учитывая такие временные характеристики, прямоугольный импульс напряжения для исследования данного явления должен иметь период порядка 10 с или частоту 0,1 Гц.

На подобное поведение тока обращает внимание Г.И. Сканава [6] и указывает на неустойчивость явления.

Отметим, что в проведенной серии экспериментов с технически чистым трансформаторным маслом указанный эффект наблюдался всегда, но выражен был в разной степени.

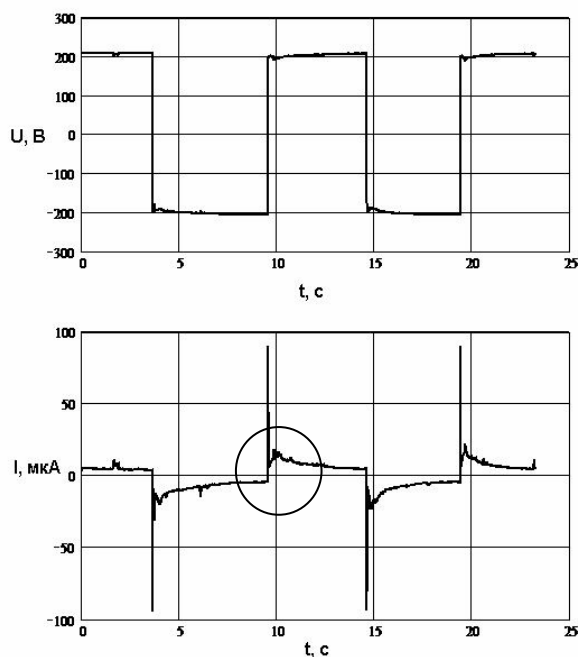


Рис. 3. Зависимости напряжения и тока от времени для технически чистого трансформаторного масла ($E_{\text{MAX}} = 5,7 \text{ кВ/см}$, $h = 0,35 \text{ мм}$)

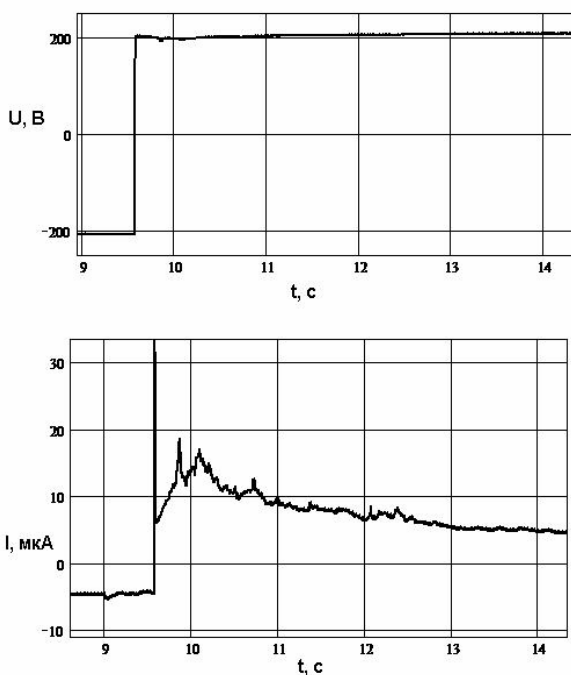


Рис. 4. Подробное изображение выделенного участка графика рис. 3

Исследование технически чистого трансформаторного масла при наличии твердой диэлектрической пленки. Была проведена серия экспериментов по исследованию токов проводимости в технически чистом трансформаторном масле при наличии в межэлектродном пространстве испытательной ячейки барьера из полиэтиленовой пленки. Полиэтилен и трансформаторное масло являются неполярными диэлектриками, имеющими близкие значения относительных диэлектрических

проницаемостей (2,2 и 2,25 соответственно), что обеспечивает однородность электрического поля во всем межэлектродном пространстве ячейки. В экспериментах использовалась полиэтиленовая пленка толщиной 10 мкм.

На первом этапе было проведено исследование токов проводимости в самой полиэтиленовой пленке без масла. Результаты такого эксперимента при $E_{\text{MAX}} = 200 \text{ кВ/см}$ в момент смены полярности напряжения приведены на рис. 5.

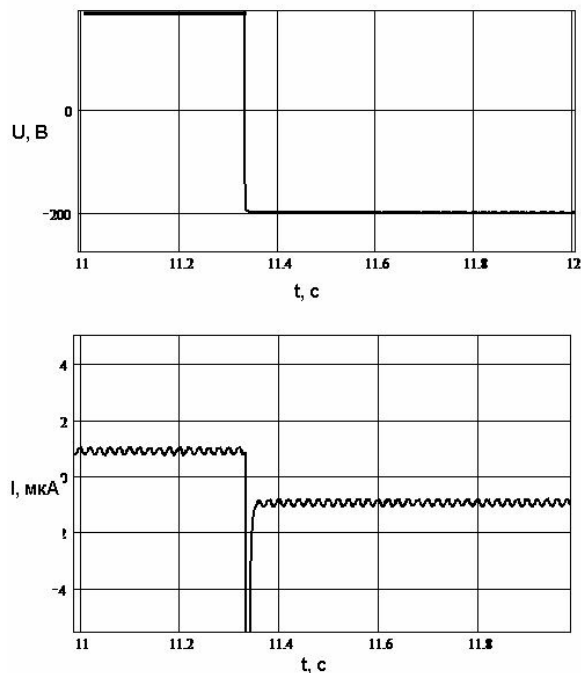


Рис. 5. Зависимости напряжения и тока от времени для полиэтиленовой пленки в момент смены полярности ($E_{\text{MAX}} = 200 \text{ кВ/см}$, $h = 10 \text{ мкм}$)

Анализ графика рис. 5 показывает, что ток после короткого поляризационного импульса сразу переходит к некоторому установившемуся значению.

На втором этапе было проведено исследование токов проводимости масла при наличии полиэтиленовой пленки. При этом толщина комбинированного диэлектрика между электродами ячейки составила порядка 20 мкм, из них 10 мкм – полиэтилен и 10 мкм – масло. Средняя максимальная напряженность поля в межэлектродном пространстве достигла 100 кВ/см, что для жидкого диэлектрика соответствует области сильных полей [1]. Результаты эксперимента в момент смены полярности напряжения представлены на рис. 6.

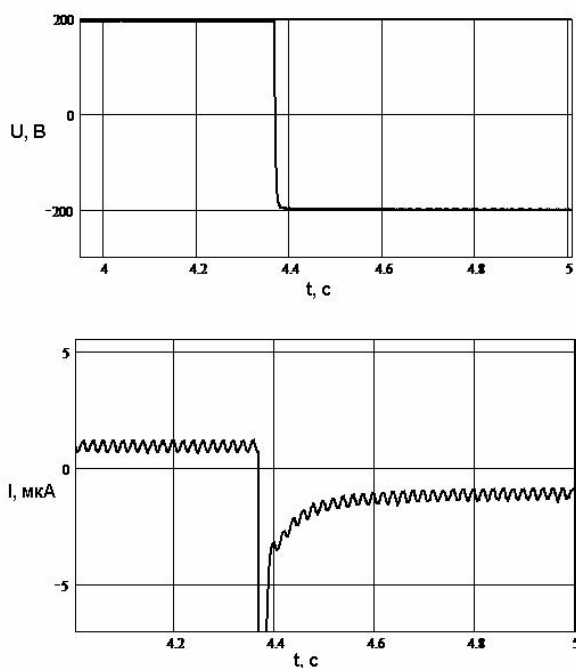


Рис. 6. Зависимости напряжения и тока от времени для технически чистого трансформаторного масла с барьером из полиэтиленовой пленки в момент смены полярности ($E_{\text{MAX}} = 100$ кВ/см; толщина масляной пленки 10 мкм; толщина полиэтиленовой пленки 10 мкм)

В данном случае (рис. 6), в отличие от рис. 5, ток после поляризационного импульса снижается до установившегося значения не сразу, а спустя время порядка 0,3 с. Здесь отметим, что увеличение расстояния между электродами ячейки по сравнению с первым опытом в два раза произвело уменьшение емкости ячейки. Следовательно, наблюдаемый эффект не связан с увеличением длительности поляризационного переходного процесса, а имеет отношение к процессам движения носителей заряда в трансформаторном масле. Такое поведение тока согласуется с представлениями, изложенными в [1] для комбинированной изоляции.

Следует заметить, что синусоидальная составляющая малой амплитуды, заметная на графиках, является следствием воздействия полей промышленной частоты на измерительные цепи экспериментальной установки.

Исследование технически чистого трансформаторного масла, содержащего химические примеси. На первом этапе была проведена серия экспериментов по исследованию токов проводимости в технически чистом трансформаторном масле, содержащем микродозы растворенного NaCl. Добавление хлорида натрия в масло значительно повышает в нем концентрацию свободных носителей зарядов. Исследование такого масла интересно в плане сравнения с технически чистым и проводилось при условиях, аналогичных опыту, показанному на рис. 3: толщина масляной пленки 0,35 мм; максимальная напряженность

5,7 кВ/мм. Результаты типичного эксперимента представлены на рис. 7.

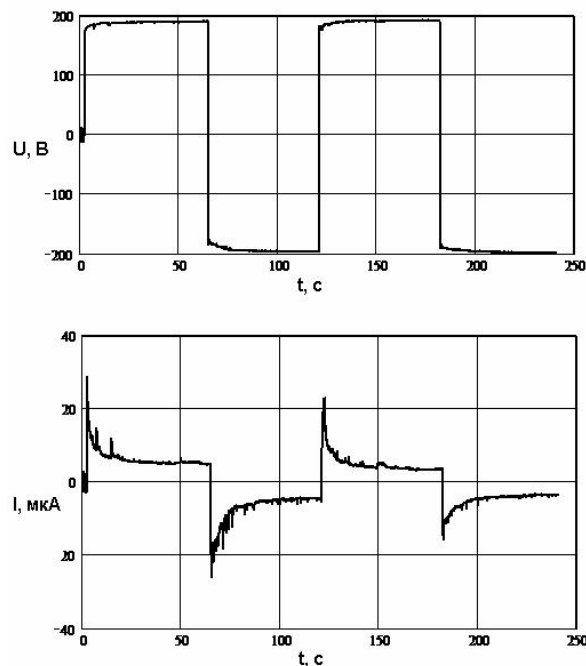


Рис. 7. Зависимости напряжения и тока от времени для технически чистого трансформаторного масла с добавлением NaCl ($E_{\text{MAX}} = 5,7$ кВ/см, $h = 0,35$ мм)

Анализ графика показывает, что ток в момент смены полярности напряжения проходит через поляризационный импульс и начинает медленно снижаться до некоторого установившегося значения. Следует отметить, что, в отличие от эксперимента с технически чистым маслом (рис. 3), в данном случае отсутствует выраженный подъем тока после завершения поляризационных процессов (прохождение максимума), а спад происходит гораздо медленнее (порядка 1 мин). При этом установившиеся значения токов, несмотря на добавленный NaCl, фактически совпадают (5–6 мкА).

На втором этапе была проведена серия экспериментов по исследованию токов проводимости в технически чистом трансформаторном масле, содержащем микродозы йода.

Проведенные предварительные опыты показали, что добавление йода в технически чистое трансформаторное масло приводит к появлению значительных токов проводимости, поэтому эксперименты были проведены при большей толщине масляной пленки (1,5 мм) и меньшей напряженности (1,3 кВ/см). Результаты типичного опыта представлены на рис. 8.

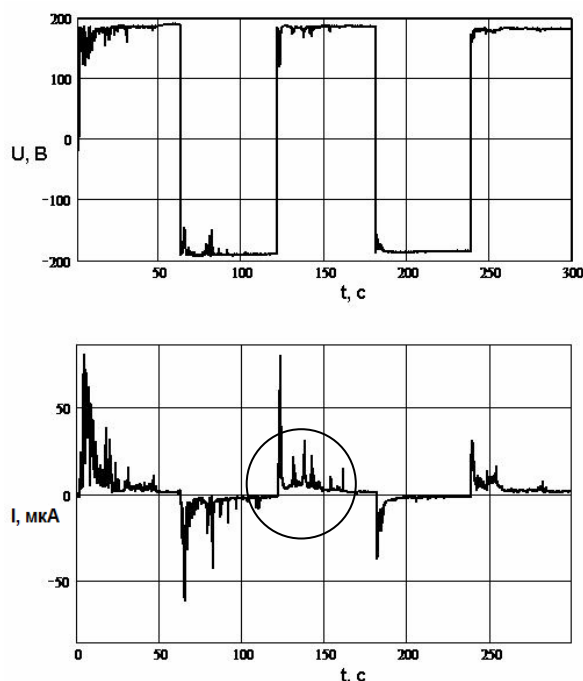


Рис. 8. Зависимости напряжения и тока от времени для технически чистого трансформаторного масла с добавлением йода ($E_{\text{MAX}} = 1,3 \text{ кВ/см}$, $h = 1,5 \text{ мм}$)

Согласно рис. 8, ток в момент смены полярности напряжения проходит через поляризационный импульс, а далее следует серия всплесков значительной амплитуды. По мере затухания всплесков ток приближается к некоторому сравнительно малому установившемуся значению.

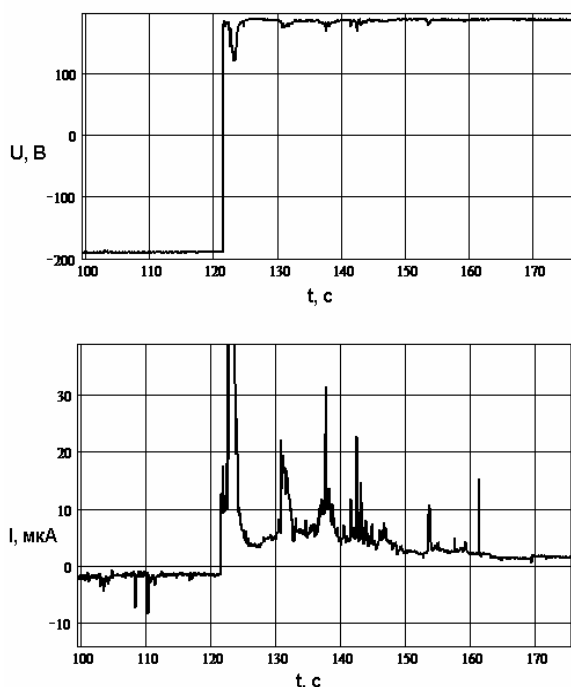


Рис. 9. Подробное изображение выделенного участка графика рис. 8

На рис. 9 представлено подробное изображение выделенного участка графика рис. 8: ток во время серии всплесков проходит через

некоторый максимум. Следовательно, такое поведение тока качественно совпадает с результатами эксперимента для технически чистого трансформаторного масла без присадок (рис. 3).

Отметим, что при заданных условиях для масла, содержащего химические примеси, время между моментом смены полярности напряжения и моментом достижения током установившегося значения составляет около 1 мин. Учитывая такие временные характеристики, прямоугольный импульс напряжения для исследования подобных процессов должен иметь период порядка 120 с или частоту 0,008 Гц.

Заключение

Проведенное исследование процессов электропроводности тонких пленок трансформаторного масла при условии длительного воздействия и резкой смены полярности приложенного напряжения показало, что временные зависимости тока через диэлектрик имеют сложный вид, зависящий от природы примесей.

Показано, что наибольшую информацию о временной зависимости тока проводимости можно получить при воздействии прямоугольных импульсов напряжения с периодом от 10 с (частота 0,1 Гц) для технически чистого масла и от 120 с (частота 0,008 Гц) для масла, содержащего химические ионизирующие примеси.

Последовательно установленные с исследуемой пленкой масла тонкие барьеры из твердого диэлектрика значительно снижают токи проводимости, но позволяют более четко выявить характерные явления в токах проводимости масла при повышенных значениях напряженности электрического поля, что важно для случаев весьма тонких пленок масла.

С учетом полученных результатов важно проводить дальнейшее экспериментальное изучение процессов электропроводности в тонких пленках трансформаторного масла в составе комбинированного диэлектрика при различных формах импульсов приложенного напряжения.

Список литературы

1. **Электрофизические** основы техники высоких напряжений: учеб. для вузов / И.М. Бортник, И.П. Верещагин, Ю.Н. Вершинин и др.; под ред. И.П. Верещагина, В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 543 с.
2. **Коган Ф.Л.** Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования. – М.: ОАО «ОРГРЭС», 2001. – 497 с.
3. **Тареев Б.М.** Физика диэлектрических материалов: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 320 с.
4. **Митькин Ю.А.** Электрофизические характеристики жидких диэлектриков, содержащих примеси: учеб. пособие / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2002. – 148 с.
5. **Жакин А.И.** Приэлектродные и переходные процессы в жидких диэлектриках // Успехи физических наук. – 2006. – Т. 176, №3. – С. 289–310.

6. **Сканави Г.И.** Физика диэлектриков (область слабых полей). – М.; Л.: ГИТТЛ, 1949. – 500 с.
7. **Стишков Ю.К., Остапенко А.А.** Электродинамические течения в жидких диэлектриках. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. – 172 с.
8. **Сканави Г.И.** Физика диэлектриков (область сильных полей). – М.: ГИФМЛ, 1958. – 907 с.
9. **Теория диэлектриков** / Н.П. Богородицкий, Ю.М. Волокобинский, А.А. Воробьев и др. – М.; Л.: Энергия, 1965. – 344 с.

References

1. Bortnik, I.M., Vereshchagin, I.P., Vershinin, Yu.N. *Elektrofizicheskie osnovy tekhniki vysokikh napryazheniy* [Electrophysical fundamentals of high-voltage engineering]. Moscow: Energoatomizdat, 1993. 543 p.
2. Kogan, F.L. *Sbornik metodicheskikh posobiy po kontrolyu sostoyaniya elektrooborudovaniya* [Collected study guides on electrical equipment state control]. Moscow: OAO «ORGRES», 2001. 497 p.

3. Tareev, B.M. *Fizika dielektricheskikh materialov* [Dielectric materials physics]. Moscow: Energoatomizdat, 1982. 320 p.
4. Mit'kin, Yu.A. *Elektrofizicheskie kharakteristiki zhidkikh dielektrikov, soderzhashchikh primesi* [Electrophysical characteristics of dielectric liquids containing contaminants]. Ivanovo: IGEU, 2002. 148 p.
5. Zhakin, A.I. *Prieklektrodnye i perekhodnye protsessy v zhidkikh dielektrikakh* [Electrode and transient processes in dielectric liquids]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2006, vol. 176, issue 3, pp. 289–310.
6. Skanavi, G.I. *Fizika dielektrikov (oblast' slabyykh po-ley)* [Physics of dielectrics (low fields)]. Moscow; Leningrad: GITTL, 1949. 500 p.
7. Stishkov, Yu.K., Ostapenko, A.A. *Elektro-dinamicheskie techeniya v zhidkikh dielektrikakh* [Electrodynamic flows in dielectric liquids]. Leningrad: LGU, 1989. 172 p.
8. Skanavi, G.I. *Fizika dielektrikov (oblast' sil'nykh po-ley)* [Physics of dielectrics (high fields)]. Moscow: GIFML, 1958. 907 p.
9. Bogoroditskiy, N.P., Volokobinskiy, Yu.M., Vorob'ev, A.A. *Teoriya dielektrikov* [Theory of dielectrics]. Moscow; Leningrad: Energiya, 1965. 344 p.

Митькин Юрий Алексеевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики,
e-mail: mua@vetf.ispu.ru

Начатой Эдуард Леонидович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики,
e-mail: alphacatt@yandex.ru