

## Применение современных компьютерных технологий для решения задач оценки функционального состояния силовых масляных трансформаторов

*А.Н. Бакланов, В.С. Чередниченко, М.В. Мусин, А.А. Ткалич, Е.А. Рудик,  
О.Д. Бондарев*

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени  
М.И. Платова, Новочеркасск*

**Аннотация:** Для долговременной эксплуатации силового масляного трансформатора необходимо соблюдение всех регламентируемых проверок его технического состояния, прописанных в инструкции. Текущий регламент предусматривает ежедневный профилактический осмотр и техническое обследование не реже одного раза в неделю. Как известно, нагрев силового трансформатора в процессе его работы обусловлен наличием активных потерь в обмотках и сердечнике. При большой мощности трансформаторов имеют место внушительные тепловые потери. Для предотвращения перегрева трансформатора и нарушения изоляции обмоток катушек используются масляные системы охлаждения. При ухудшении качества трансформаторного масла увеличиваются активные потери и снижается коэффициент полезного действия силового устройства, что негативно сказывается на процессе преобразования электрической энергии. Исходя из этого, можно сделать вывод, что качество масла напрямую влияет на долговечность силового трансформатора. Таким образом, наиболее важными функциональными элементами, с точки зрения контроля, являются трансформаторное масло и катушка силового устройства. Исходя из всего вышесказанного, актуальной проблемой технического контроля трансформаторов электрических подстанций является разработка методов и устройств экспресс-контроля функционального состояния силовых масляных трансформаторов, позволяющих оперативно получать диагностическую информацию, достаточную для своевременного принятия решения о необходимости проведения внепланового ремонта или обслуживания.

**Ключевые слова:** силовой трансформатор; трансформаторное масло; импеданс; диагностика; функциональное состояние; тангенс угла диэлектрических потерь; схема замещения; MathCad.

### Введение

При передаче электроэнергии на большие расстояния необходимо минимизировать её потери. Для таких целей в электрических подстанциях устанавливают силовой масляный трансформатор. Современные масляные трансформаторы отличаются высокой надежностью и стойкостью к перепадам температурных режимов, при их своевременном обслуживании.

---

Для предотвращения перегрева трансформатора и нарушения изоляции обмоток катушек используются масляные системы охлаждения. При ухудшении качества трансформаторного масла увеличиваются активные потери и снижается коэффициент полезного действия силового устройства, что негативно сказывается на процессе преобразования электрической энергии. Исходя из этого, можно сделать вывод, что качество масла напрямую влияет на долговечность силового трансформатора. Таким образом, наиболее важными функциональными элементами, с точки зрения контроля и диагностики, являются трансформаторное масло [1, 2] и катушка силового устройства [3, 4].

Проанализировав существующие подходы к диагностике и контролю силовых масляных трансформаторов и др., можно сделать вывод, что используемые в настоящее время подходы базируются на виброакустическом [5, 6], частотном [7] и энергетическом анализе [8-10]. При необходимости оценки состояния охлаждающего масла в силовых трансформаторах используют химические методы анализа [11]. Таким образом стоит отметить, что для диагностики и контроля электротехнических систем электрических подстанций не используют комплексный анализ многих физических процессов (механические, тепловые, энергетические, магнитные, электрические) и построение схем замещения, а также существующие подходы не позволяют прогнозировать состояние электротехнических систем, что позволило бы повысить эффективность функционирования и надежность электрических подстанций в целом. Также был проведен анализ методов прогнозирующего анализа (интеллектуальный нейросетевой анализ, метод двухпараметрического экспоненциального сглаживания, метод Заде-Рагазинни, метод Бокса-Дженикса, метод экспоненциального сглаживания, метод сплайн аппроксимации) [12] и их применимости к прогнозированию

состояния высоковольтных электромагнитных выключателей и силовых масляных трансформаторов.

Таким образом, необходима разработка эффективного метода оценки функционального состояния силовых масляных трансформаторов по результатам диагностики трансформаторного масла.

### Результаты исследования и их обсуждение

Моделирование вычислительного блока метода оценки функционального состояния силовых масляных трансформаторов по результатам диагностики трансформаторного масла будет произведено с помощью графической среды разработки *LabView*.

*LabView* (англ. *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) – это среда разработки и платформа для выполнения программ, созданных на графическом языке программирования «G» [13].

Реализуем формулу для расчета диэлектрической проницаемости. На рисунке 1 представлена лицевая часть программы, блок-диаграмма же представлена на рисунке 2.

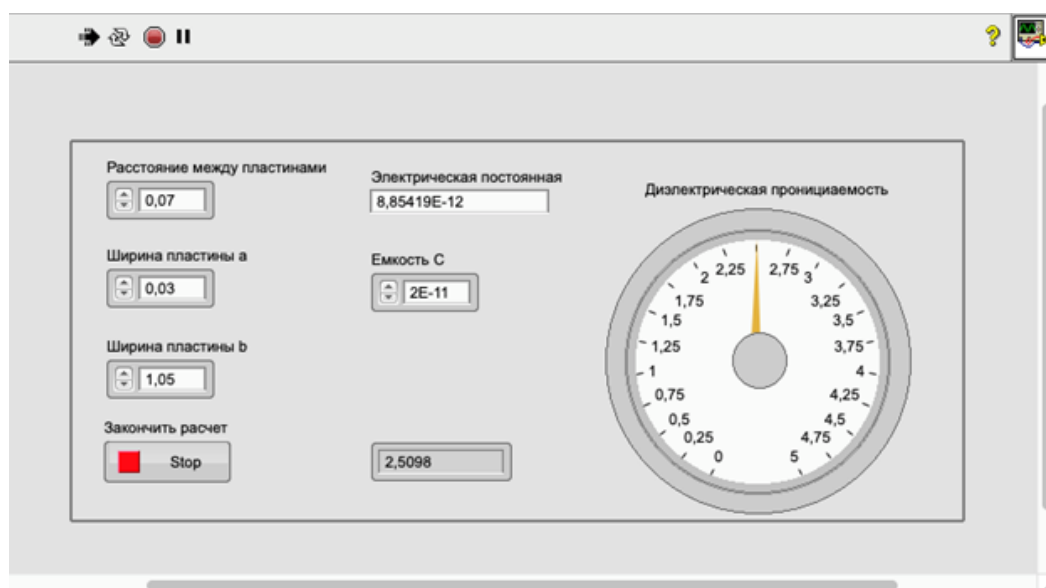


Рис. 1. – Лицевая часть программы.

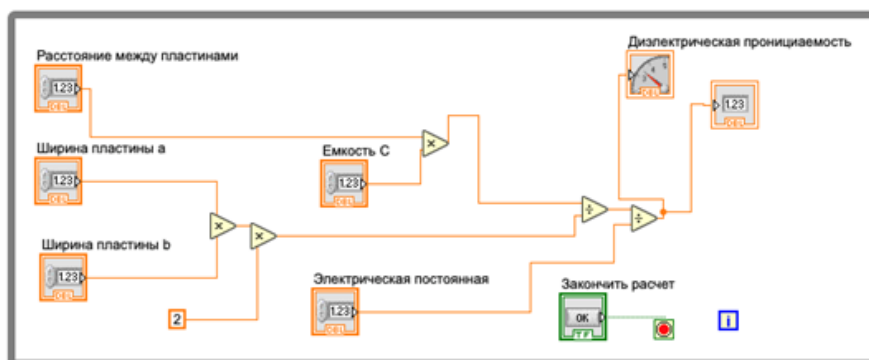


Рис. 2. – Блок диаграмма программы.

Как видно из рисунка 1, при измеренном значении емкости  $C = 20$  пФ, значение диэлектрической проницаемости 2,51 что соответствует табличным значениям.

Рассмотренный способ можно использовать только для экспресс-контроля состояния трансформаторного масла, так как он неприменим для диагностики в процессе эксплуатации.

В качестве более эффективной альтернативы предлагается использовать импедансо-частотные характеристики для оценки состояния силовых масляных трансформаторов, которые в дальнейшем можно использовать для решения уравнений с помощью математических программ, что позволит определить импеданс масла и охарактеризовать его состояние. Импеданс принято моделировать с помощью эквивалентных электрических схем. Которые представляют собой различные комбинации емкостей  $C$  и активных сопротивлений  $R$  (рисунок 3).

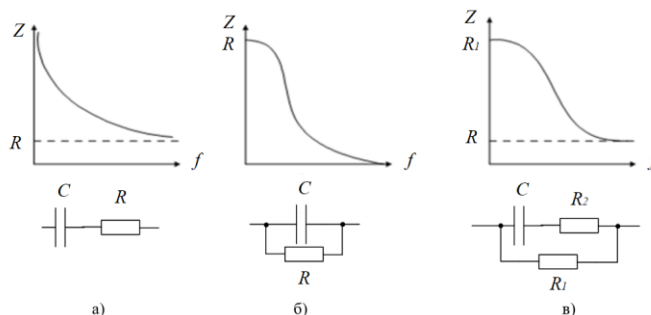


Рис. 3. – Эквивалентные схемы замещения и соответствующие им импедансо-частотные характеристики.

Стоит отметить, что трансформаторное масло описывает схема замещения и характеристика, представленные на рисунке 3 б. Для получения таких характеристик, необходимо реализовать схему подключения данного метода. Схема реализации метода резонансной последовательно-параллельной импедансной спектроскопии показана на рисунке 4.

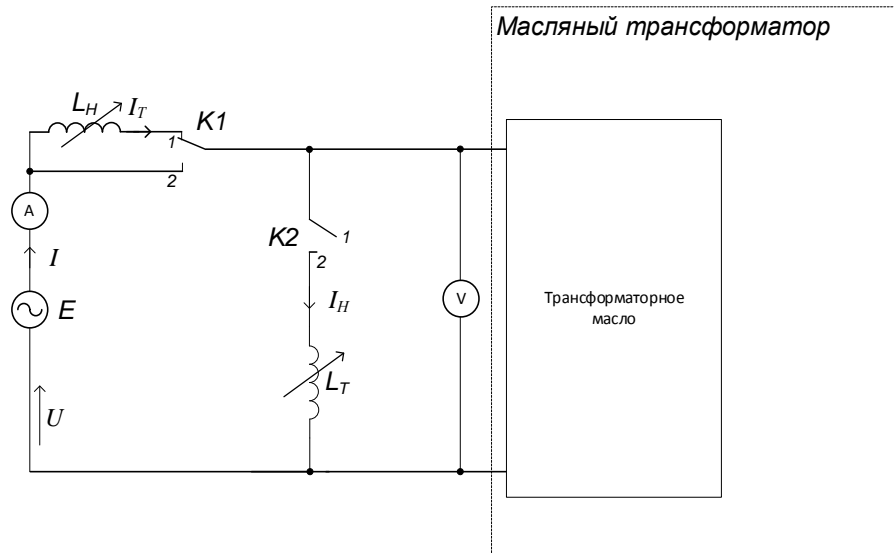


Рис. 4. – Схема реализации метода резонансной последовательно-параллельной импедансной спектроскопии.

Данный метод основан на резонансной последовательно-параллельной идентификации (РППИ) [14], применяемой непосредственно к объекту исследований - трансформаторному маслу и позволяющей получить параметры схемы замещения. В общем виде метод резонансной последовательно-параллельной импедансной спектроскопии заключается в измерении и анализе двух характеристик: импеданса от частоты и угла диэлектрических потерь от частоты. Алгоритм реализации метода резонансной последовательно-параллельной импедансной спектроскопии приведен на рисунке 5.

На первом этапе определяются параметры схемы замещения трансформаторного масла. Для этого применяется два режима - резонанса тока и резонанса напряжения, после чего решается система уравнений.

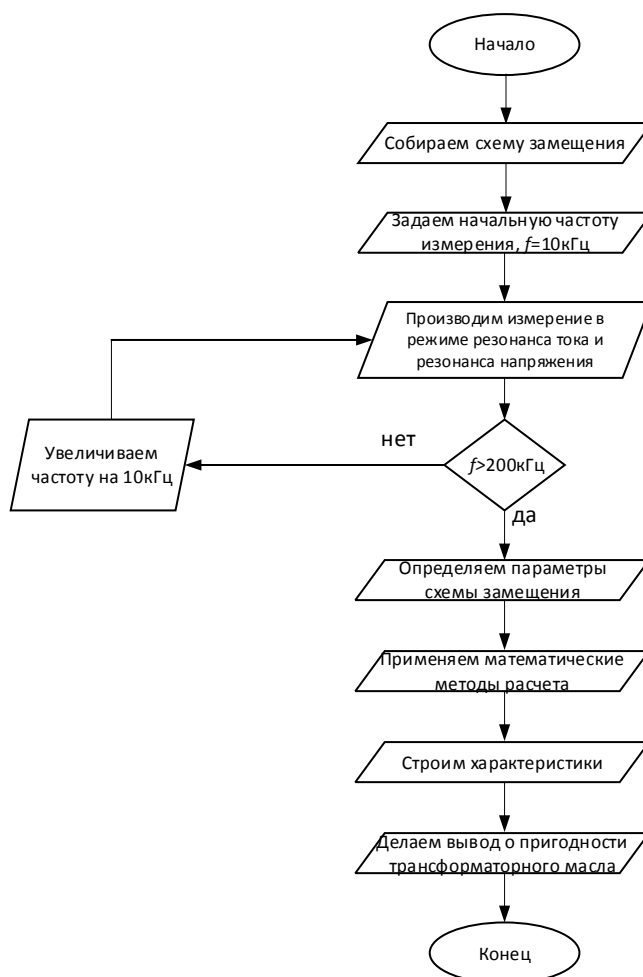


Рис. 5. – Алгоритм реализации метода резонансной последовательно-параллельной импедансной спектроскопии.

К измеряемому объекту подключен генератор синусоидального напряжения  $E$ . В первом режиме измерения – резонанс напряжений, ключ  $K1$  и  $K2$  переключены в положение 1, ключ  $K2$  разомкнут. Изменяя индуктивность  $L_H$  добиваемся, чтобы сдвиг фаз  $\varphi$  между током  $i$  и напряжением  $u$  равнялся нулю. В этом режиме измеряются ток  $I=I_H$  и напряжение  $U$ . В следующем режиме измерительного эксперимента – режим резонанса токов, ключ  $K1$  и  $K2$  переключены в положение 2. Изменяя индуктивность  $L_T$  добиваемся чтобы сдвиг фаз  $\varphi$  между током  $i$  и напряжением  $u$  равнялся нулю. В этом режиме измеряются ток  $I=I_T$  и напряжение  $U$ .

Решение полученной системы уравнений дает искомые параметры схемы:  $C1$ ,  $C3$  и  $R1$ ,  $R2$ .

На втором этапе вычисляются импеданс и тангенс угла диэлектрических потерь. Данные действия повторяются на резонансных частотах в диапазоне от 10кГц до 200кГц с шагом 10кГц. Таким образом получаем две характеристики, каждая из которых состоит из 20 точек:

- характеристика зависимость импеданса от частот в диапазоне от 10кГц до 200кГц,
- характеристика тангенс угла диэлектрических потерь в этом же диапазоне.

Импеданс рассчитывается, исходя из полученных параметров схем замещения, по следующей формуле:

$$Z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}.$$

Тангенс угла диэлектрических потерь можно представить следующей формулой:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega CR}.$$

Данный метод является наиболее эффективным и универсальным и позволяет оценить состояние трансформаторного масла независимо от габаритов и типа трансформатора, а также не требует отключения трансформатора от электросети.

### Выводы

Рассмотрены два метода оценки функционального состояния силовых масляных трансформаторов. Первый способ можно использовать только для экспресс-контроля состояния трансформаторного масла, так как он неприменим для диагностики в процессе эксплуатации. Второй подход позволяет получить характеристику зависимости импеданса от частот в

---

диапазоне от 10кГц до 200кГц и характеристику тангенса угла диэлектрических потерь в этом же диапазоне, которые в дальнейшем можно использовать для решения уравнений с помощью программы Mathcad, что позволит определить импеданс масла и охарактеризовать его состояние. Такой подход является наиболее предпочтительным для задач технической диагностики силовых масляных трансформаторов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90120 «Создание научных основ резонансной последовательно-параллельной импедансной спектроскопии силовых масляных трансформаторов для адаптивного прогнозирующего анализа их функционального состояния».*

### Литература

1. Герасимова Л.С., Майорец А.И. Обмотки и изоляция силовых масляных трансформаторов, - М.: Энергия, 1969. 359 с.
2. Макаревич Л.В., Шифрин Л.Н., Алпатов М.Е. Современные тенденции в создании и диагностике силовых трансформаторов больших мощностей // Известия Российской академии наук. Энергетика, № 1, 2008, с 45–69.
3. Попов Г.В. Вопросы диагностики силовых трансформаторов / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2012. – 176 с.
4. Кацман М. Электрические машины: учебник для студ. учреждений сред, проф. образования. 12-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 496 с.
5. Киншт Н.В. Возможности спектральных методов при диагностике силовых трансформаторов // Вологдинские чтения, № 53, 2005, с 13–14.



6. Степанов В.М., Андреев К.А. Технические решения по диагностике силовых трансформаторов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, № 6-1, 2011, с 74–81.
7. Ермаков Е.Г., Ганул Т.В. Комплексный подход к диагностике силовых трансформаторов // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, № 6, 2015, с. 32–36.
8. Richardson B. "Diagnostics and monitoring of power transformers," IEE Colloquium on Condition Monitoring of Large Machines and Power Transformers (Digest No: 1997/086), London, UK, 1997, pp. 6/1-6/2, doi: 10.1049/ic:19970499.
9. Mackenzie E. A., Crossey J., dePablo A. and Ferguson W., "On-line monitoring and diagnostics for power transformers," 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, San Diego, CA, 2010, pp. 1-5, doi: 10.1109/ELINSL.2010.5549734.
10. Malpure B. D. and Baburao K., "Failure analysis & diagnostics of power transformer using dielectric dissipation factor," 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, 2008, pp. 497-501, doi: 10.1109/CMD.2008.4580334.
11. Саушев А.В., Шерстнев Д.А., Широков Н.В. Анализ методов диагностики аппаратов высокого напряжения // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2017. – Т. 9. – № 5. – С. 1073–1085. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1073-1085.
12. Gutten M., Korenciak D. and Zahoransky R., "Measuring and diagnostic system of transformers," 2018 Cybernetics & Informatics (K&I), Lazy pod Makytou, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/CYBERI.2018.8337563.
13. Лупов С.Ю., Муякшин С.И., Шарков В.В. LabVIEW в примерах и задачах. Учебно-методические материалы по программе повышения

квалификации «Обучение технологиям National Instruments». Нижний Новгород, 2007, 101 с.

14. Tkachenko, G.I., Baklanov, A.N. A method of resonant series-parallel identification *Procedia Engineering*, 2015, pp. 690-694.

### References

1. Gerasimova L.S., Majorecz A.I. *Obmotki i izolyaciya silovy`x maslyany`x transformatorov* [Windings and insulation of power oil transformers]. Moscow: Energiya, 1969. 359 p.

2. Makarevich L.V., Shifrin L.N., Alpatov M.E. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. E`nergetika (Rus)*, № 1, 2008, pp. 45–69.

3. Popov G.V. *Voprosy` diagnostiki silovy`x transformatorov* [Diagnostics of power transformers]. FGBOUVPO «Ivanovskij gosudarstvenny`j e`nergeticheskij universitet imeni V.I. Lenina». Ivanovo, 2012. 176 p.

4. Kaczman M. *E`lektricheskie mashiny` : uchebnik dlya stud. uchrezhdenij sred, prof. obrazovaniya. 12-e izd., ster.* [Electric machines: a textbook for students of institutions of secondary, vocational education. 12th ed.] M.: Izdatel`skij centr «Akademiya», 2013. 496 p.

5. Kinsht N.V. *Vologdinskie chteniya*, № 53. 2005. pp. 13–14.

6. Stepanov V.M., Andreev K.A. *Izvestiya Tul`skogo gosudarstvennogo universiteta. Texnicheskie nauki (Rus)*, № 6-1. 2011. pp. 74–81.

7. Ermakov E.G., Ganul T.V. *E`lektro. E`lektrotexnika, e`lektroe`nergetika, e`lektrotexnicheskaya promy`shlennost` (Rus)*, № 6. 2015. pp. 32–36.

8. Richardson B. "Diagnostics and monitoring of power transformers," *IEE Colloquium on Condition Monitoring of Large Machines and Power Transformers* (Digest No: 1997/086), London, UK, 1997, pp. 6/1-6/2, doi: 10.1049/ic:19970499.

9. Mackenzie E. A., Crossey J., dePablo A. and Ferguson W., "On-line monitoring and diagnostics for power transformers," 2010 IEEE International

Symposium on Electrical Insulation, San Diego, CA, 2010, pp. 1-5, doi: 10.1109/ELINSL.2010.5549734.

10. Malpure B. D. and Baburao K., "Failure analysis & diagnostics of power transformer using dielectric dissipation factor," 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, 2008, pp. 497-501, doi: 10.1109/CMD.2008.4580334.

11. Saushev A.V., Sherstnev D.A., Shirokov N.V. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova, T. 9. № 5. 2017. pp. 1073–1085. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1073-1085.

12. Gutten M., Korenciak D. and Zahoransky R., "Measuring and diagnostic system of transformers," 2018 Cybernetics & Informatics (K&I), Lazy pod Makytou, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/CYBERI.2018.8337563.

13. Lupov S.Yu., Muyakshin S.I., Sharkov V.V. LabVIEW v primerax i zadachax. Uchebno-metodicheskie materialy` po programme pov`sheniya kvalifikacii «Obuchenie texnologiyam National Instruments» [LabVIEW in examples and problems. Teaching materials for the advanced training program "Teaching National Instruments Technologies"]. Nizhnij Novgorod. 2007. 101 p.

14. Tkachenko, G.I., Baklanov, A.N. A method of resonant series-parallel identification Procedia Engineering. 2015. pp. 690-694.