

## Пьезопреобразователь для мониторинга изменений состава жидких технологических сред

Коновалов Р.С.<sup>1,2</sup>, Коновалов С.И.<sup>1\*</sup>, Павлов И.В.<sup>1</sup>, Цаплев В.М.<sup>1</sup>

\*тел.:+7(812)234-37-26, E-mail: [SIKonovalov.eut@gmail.com](mailto:SIKonovalov.eut@gmail.com)

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения, Санкт-Петербург

**Суть обсуждаемой проблемы.** В настоящее время трансформаторы получили широкое применение во многих электроэнергетических системах. Надежность работы систем электроснабжения зачастую зависит от качества используемых трансформаторов. В связи с этим встает вопрос о важности мониторинга рабочего состояния трансформаторов [1, 2]. При этом в силовых трансформаторах контролю прежде всего должно подвергаться состояние минерального масла, которое в них залито [3], поскольку именно от его качества зависит электроизоляция обмоток и качество охлаждения трансформатора. С течением времени под влиянием внешних окружающих факторов ряд физико-химических параметров масла может изменяться (цвет, вязкость, содержание воды). Среди диагностических методов исследования состояния трансформаторного масла можно назвать физико-химический анализ, анализ растворенных газов, оптический анализ, измерение степени полимеризации и др., краткий обзор которых представлен в [3]. Могут применяться также и акустические методы исследования, в основу которых часто закладывается связь параметров акустических волн (скорость распространения, затухание и др.) с параметрами окружающей среды [4, 5]. Данные методы подразумевают исследование смеси вода-масло вне зависимости от размера капель воды. В то же время, особенно на ранних стадиях попадания воды в масло, ее концентрация невелика, число капель воды незначительно и их размеры малы. Знание о начале такого нежелательного процесса является важной диагностической информацией. Установить наличие небольшого количества малых капель воды можно лишь применением акустических методов, подразумевающих использование коротких зондирующих сигналов. При этом в качестве излучателя возможно использование широкополосных пьезоэлектрических преобразователей, например, в виде тонкостенных сферических оболочек, колеблющихся на нулевой моде. Для получения наиболее короткого излучаемого сигнала возможно подключение к преобразователю электрической индуктивно-резистивной цепи [6].

**Цель работы.** Теоретическая проработка возможности излучения в масло коротких зондирующих сигналов с помощью сферического излучателя с подключенной к нему индуктивно-резистивной цепью,

**Полученные результаты.** Исследован импульсный режим работы излучателя описанного вида. Решение осуществлено применением аппарата схем-аналогов пьезоэлектрических преобразователей в сочетании со спектральным методом Фурье. Сигнал, возбуждающий сферический излучатель, принят в виде одного полупериода синусоидального напряжения на частоте  $\omega_0$  ( $\omega_0$  – частота ре-

зонанса). Длительность зондирующего сигнала определялась в соответствии с критерием ( $-20$ ) дБ. На основании расчетного исследования изучены основные характеристики зондирующих сигналов, излучаемых сферой с различной относительной толщиной стенки  $\alpha$ .

Расчет показал, что применение  $RL$ -цепи с корректно рассчитанными параметрами обеспечивает снижение длительности  $\tau_n$  зондирующих импульсов при  $\alpha \geq (0,06-0,07)$ . При меньших значениях  $\alpha$  положительное влияние подключаемой электрической нагрузки на длительность  $\tau_n$  не выявлено.

**Выводы.** Показано, что правильный расчет параметров индуктивно-резистивной электрической цепи позволяет снизить длительность зондирующих импульсов. Для различных значений относительной толщины стенки сферического излучателя (при которых его еще можно считать тонкостенным) определены наилучшие значения параметров, характеризующих излучающую систему. Полученные данные позволили сделать сравнительные оценки основных параметров зондирующих сигналов (длительность и амплитуду) для случая применения корректирующей цепи и ее отсутствия. Полученные данные могут быть использованы при проектировании преобразователя, способного излучать сигналы малой длительности в среду, предназначенную для заполнения ею внутренней полости трансформатора.

#### Литература

1. Arvind, D., Khushdeep, S., Deepak, K. Condition monitoring of power transformer: A review. 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008, pp. 1–6. <https://0.1109/TDC.2008.4517046>
2. Castro, B., Clerice, G., Ramos, C., Andreoli, A., Baptista, F., Campos, F., Ulson, J. Partial Discharge Monitoring in Power Transformers Using Low-Cost Piezoelectric Sensors // Sensors 2016, 16(8), 1266. <https://doi.org/10.3390/s16081266>
3. Daniel R. de Luna, T.T.C. Palitó, Y.A.O. Assagra, R.A.P. Altafim, J.P. Carmo, R.A.C. Altafim, A.A.O. Carneiro and Vicente A. de Sousa, Jr. Ferroelectret-based Hydrophone Employed in Oil Identification—A Machine Learning Approach // Sensors, 2020, 20(10), 2979; <https://doi.org/10.3390/s20102979>
4. McClements, D., Fairley, P. Ultrasonic pulse echo reflectometer // Ultrasonics, 1991, 29, 58 – 62. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(91\)90174-7](https://doi.org/10.1016/0041-624X(91)90174-7)
5. Eggers, F., Kaatze, U. Broad-band ultrasonic measurement techniques for liquids // Measurement Science and Technology, 1996, Vol. 7, pp.1–19. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/7/1/001/pdf>
6. Коновалов С.И., Кузьменко А.Г. Нестационарный режим излучения тонкостенной пьезокерамической сферы с электрической корректирующей цепью // Акустич. журнал, 2010, т.56, №5, с.679-683. [http://www.akzh.ru/pdf/2010\\_5\\_679-683](http://www.akzh.ru/pdf/2010_5_679-683).