

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И БИМЕДИЦИНСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.371.391.2

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ В ПЕРВОМ КОНТУРЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

В. П. Корячко, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой САПР РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-0272-673X, koryachko.v.p@rsreu.ru

С. С. Румянцев, начальник отдела обеспечения ГОЗ АО «Моринсис-Агат-КИП», Рязань, Россия;
orcid.org/0009-0006-6102-3902, R0806rus@yandex.ru

Л. В. Аронов, к.т.н., доцент кафедры РУС РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-9010-3836, LVArionov@yandex.ru

В настоящей статье предложен метод косвенного измерения температуры воды, на основе чувствительного элемента импульсного рефлектометрического уровнемера, в резервуарах первого контура ядерной энергетической установки в диапазоне температур 275...625K при колебаниях давления в интервале 0,1–25МПа. Получена градуировочная кривая температуры, на основе усреднения и аппроксимации полиномом второй степени результатов экспериментальных измерений со среднеквадратичной ошибкой 1,35 %, при этом относительная погрешность измерения температуры предложенным методом составляет не менее 3,95 %. Выведено выражение для определения результирующей относительной погрешности измерения и рекомендации по её уменьшению.

Ключевые слова: рефлектометрический уровнемер, импульсный рефлектометр, математическая модель, ядерная энергетическая установка, компьютерная модель, измерение температур

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-87-121-127

Введение

Исправное функционирование ядерной энергетической установки (ЯЭУ) зависит от множества факторов, и температура является важнейшим параметром, от которого зависит безопасная и эффективная работа. Снижение температуры приводит к падению мощности, а повышение может повлечь за собой аварийную ситуацию, вследствие чрезмерного разгона реактора, и привести к серьёзному экономическому и экологическому ущербу. Поэтому для обеспечения штатного безаварийного режима работы реакторной установки необходимо точное измерение температуры теплоносителя (воды) первого контура ЯЭУ [1].

Измерение температуры в ядерных энергетических установках сопряжено с рядом технологических сложностей. Термодатчики подвергаются воздействию экстремальных условий: температуры, давления, вибрации, высокого уровня ионизирующей радиации. Кроме того, замена вышедшего из строя датчика может быть технически невозможна. Это влечёт за собой предъявления особых требований по надёжности конструкции, материалам и техническим решениям, которые связаны с тем, что датчики располагаются внутри реактора [1].

Наибольшее распространение для измерения температур в реакторе получили термоэлектрические термометры, при этом их материалы должны удовлетворять ряду требований. Прежде всего, они должны иметь радиационную стойкость, обладать малым сечением поглощения нейтронов и активацией при облучении. Как правило, используются высокотемпе-

ратурные молибден-рениевые или вольфрам-рениевые термопары [2]. При этом используются разные термопары, так как затруднительно закрыть одним термоэлектрическим преобразователем весь эксплуатационный диапазон температур до 350° С.

Возможным дополнением к решению задачи измерения температуры может быть использование импульсных рефлектометрических уровнемеров. Скорость распространения зондирующего импульса в данном устройстве обратно пропорциональна относительной диэлектрической проницаемости, которая для воды (теплоносителя) также изменяется в зависимости от температуры и давления [3]. Чувствительные элементы импульсных рефлектометрических уровнемеров изготавливаются из нержавеющей стали или титана, что обеспечивает их механическую прочность, износостойкость и надёжность эксплуатации [4].

Цель работы

Разработка метода измерения температуры воды первого контура ядерной энергетической установки методом импульсной рефлектометрии и оценка погрешности измерения.

Физический принцип и погрешность метода измерения

Измерение температуры потребует незначительной модификации существующего импульсного рефлектометрического уровнемера, предназначенного для измерения уровня воды в компенсаторах объёма и иных резервуарах первого контура ЯЭУ. Чувствительный элемент данного устройства представляет собой жесткую фазостабильную коаксиальную линию передачи с внутренним проводником диаметром 6 мм и внешним, диаметром 21 мм [4].

Изменение температуры сопровождается изменением относительной диэлектрической проницаемости воды ε , при этом скорость v_u распространения зондирующего импульса равна [5]

$$v_u = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}}, \quad (1)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в свободном пространстве.

Если установить в заполненной водой части чувствительного элемента импульсного рефлектометрического уровнемера две реперных метки с фиксированным расстоянием L_M между ними, то по рефлектограмме возможно определить временную задержку τ_M , что позволяет с учётом формулы (1) вычислить относительную диэлектрическую проницаемость воды:

$$\varepsilon = \left(2 \cdot \tau_M \cdot \frac{c}{L_M} \right)^2. \quad (2)$$

Причем время здесь удвоенное, так как расстояние между соответствующими пиками эхосигнала соответствует прохождению волны в обе стороны.

Относительную погрешность измерения δ_ε относительной диэлектрической проницаемости в данном случае вычисляют с использованием формулы [6]:

$$\delta_\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial \tau_M} \Delta \tau_M \right)^2 + \left(\frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial L_M} \Delta L_M \right)^2}, \quad (3)$$

где $\Delta \tau_M$ – абсолютная погрешность измерения временной задержки τ_M , с; ΔL_M – абсолютная погрешность измерения расстояния L_M между двумя реперными метками, м.

Если принять L_M за постоянную величину и пренебречь точностью установки реперных меток, формулу (2) можно представить в виде многочлена:

$$\varepsilon = K \cdot \tau_M^2, \quad (4)$$

где коэффициент $K = \left(2 \cdot \frac{c}{L_M} \right)^2$.

Логарифмируя формулу (4) получим выражение:

$$\ln \varepsilon = \ln K + 2 \cdot \ln \tau_M. \quad (5)$$

Производная от выражения (5) равна:

$$\frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial \tau_M} = 2 \cdot \frac{1}{\tau_M},$$

тогда формула (3) преобразуется к виду:

$$\delta_\varepsilon = \sqrt{\left(2 \cdot \frac{1}{\tau_M} \Delta \tau_M\right)^2} = 2 \cdot \delta_{\tau_M}, \quad (6)$$

где δ_{τ_M} – относительная погрешность измерения временной задержки.

Таким образом, справедливо утверждать, что основной задачей в процессе измерения является достижение максимальной точности измерения временной задержки прохождения сигнала между двумя реперными метками в чувствительном элементе импульсного рефлектометрического уровнемера.

Аппроксимация эмпирической зависимости температуры от ε

Первый контур ядерной энергетической установки характеризуется диапазоном давления, насыщенного пара от 0,1 до 25 МПа и температурой теплоносителя до 350° С. Относительная диэлектрическая проницаемость также изменяется при вариации этих параметров (рисунок 1).

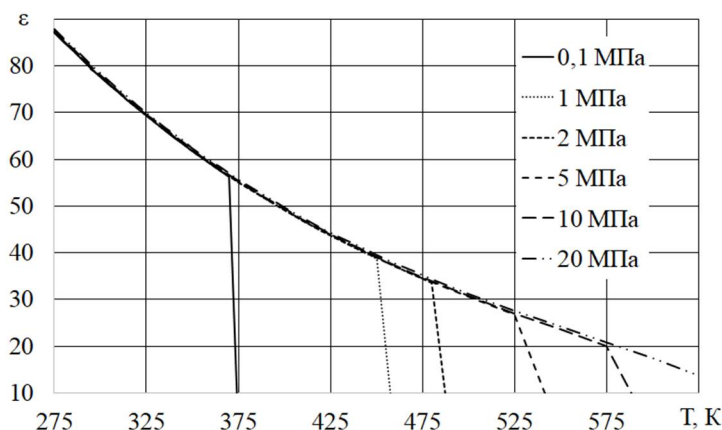


Рисунок 1 – Зависимость относительной диэлектрической проницаемости воды от температуры и давления

Figure 1 – Relative dielectric permittivity dependence from water temperature and pressure

Из представленных зависимостей видно, что увеличение температуры приводит к уменьшению относительной диэлектрической проницаемости, при этом изменение давления видимого влияния не оказывает. Средняя ошибка усреднённой кривой температуры, зависящая от истинного давления, составляет 2,6 %, таким образом, если аппроксимировать эту эмпирическую зависимость какой-либо функцией, можно получить аналитическое выражение градировочной кривой температуры, как функции относительной диэлектрической проницаемости ε .

Зависимость, показанная на рисунке 1, имеет явно нелинейный характер, однако перегибы в ней отсутствуют, поэтому целесообразно аппроксимировать её полиномом второй степени:

$$T = a + b\varepsilon + c\varepsilon^2. \quad (7)$$

Для нахождения коэффициентов a , b и c необходимо согласовать аппроксимированную кривую с усреднённой экспериментальной зависимостью в трёх точках, решив систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_1 & \varepsilon_1^2 \\ 1 & \varepsilon_2 & \varepsilon_2^2 \\ 1 & \varepsilon_3 & \varepsilon_3^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

При этом первая точка выбрана в начале $T_1 = 275K$, $\varepsilon_1 = 87,4167$. Третья точка соответствует окончанию усреднённой зависимости $T_3 = 625K$, $\varepsilon_3 = 13,62$. Промежуточная точка (T_2, ε_2) выбирается исходя из критерия минимума средней квадратичной ошибки:

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T - \hat{T})^2}, \quad (9)$$

где $\hat{T}$ – значение температуры измеренное экспериментально, К; N – число измерений.

Зависимость средней квадратичной ошибки (MSE) калибровочной кривой температуры от выбора промежуточной точки согласования (T_2, ε_2) показана на рисунке 2.

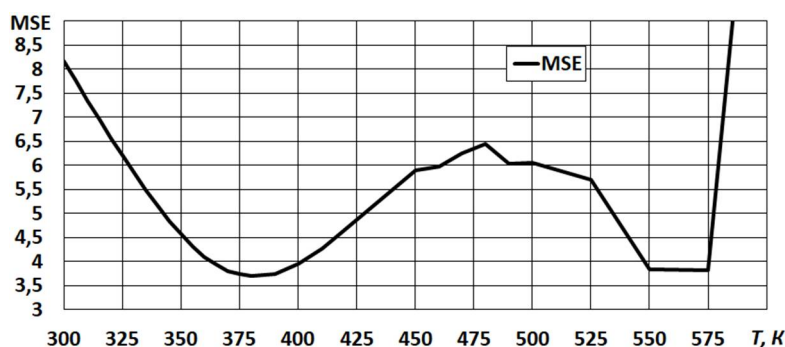


Рисунок 2 – Зависимость средней квадратичной ошибки калибровочной кривой температуры от выбора точки согласования T2

Figure 2 – Mean square error of temperature calibration curve dependence from the choice of matching point T2

Анализ графика показывает, что наименьшая среднеквадратичная ошибка определения температуры по калибровочной кривой равная $MSE = 3,7K$ достигается при промежуточной точке $(T_2, \varepsilon_2) = (380; 54,056)$. При этом относительная погрешность измерения температуры составит не более 1,35 %. В этом случае выражение (7), с учётом коэффициентов a , b и c , найденных из уравнения (8), принимает вид:

$$T = 736,5704 - 8,729\varepsilon + 0,0395\varepsilon^2. \quad (10)$$

Аппроксимированная (10) и усредненная экспериментальная зависимости температуры от относительной диэлектрической проницаемости приведены на рисунке 3.

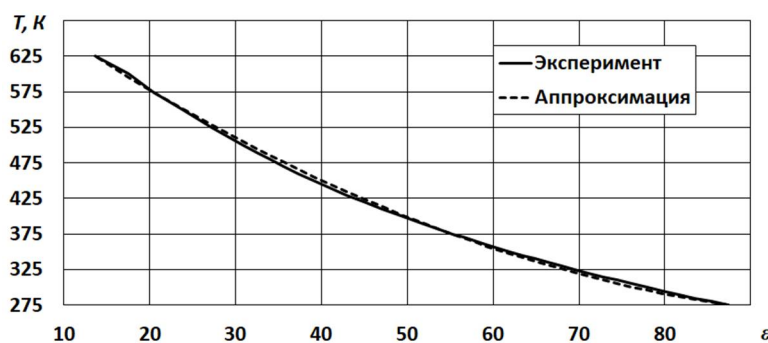


Рисунок 3 – Экспериментальная и аппроксимированная зависимости температуры от относительной диэлектрической проницаемости

Figure 3 – Experimental and approximated dependence of temperature on relative dielectric permittivity

Полученная аппроксимированная зависимость (10) является градуировочной кривой, позволяющей по измеренной рефлектометрическим методом относительной диэлектрической проницаемости определять температуру воды в первом контуре ЯЭУ. При этом относительная погрешность за счёт усреднения кривых температуры составит 2,6 %, а погрешность, обусловленная аппроксимацией – 1,35 %, таким образом суммарная относительная погрешность измерения температуры может достигать 3,95 %. С учётом погрешности измерения относительной диэлектрической проницаемости (6) можно говорить о результирующей относительной погрешности измерения равной:

$$\delta_T = 2 \cdot \delta_{\tau_M} \cdot 100\% + 3,95\%. \quad (11)$$

Отсюда можно вывести требования к определению точности измерения временного интервала τ_M , так например, для достижения точности измерения равной 10 % необходимо чтобы $\delta_{\tau_M} \leq 3\%$, а если требуемая точность равна 5 %, то $\delta_{\tau_M} \leq 0,52\%$. При этом точность обычной термопары, работающей в нормальных условиях, достигает 4,1 % [7]. Это позволяет говорить о возможности применения предложенного способа использования метода импульсной рефлектометрии, как в качестве основного, так и в качестве альтернативного в рамках дублирующей системы измерения.

Заключение

Предложенный метод измерения температуры воды первого контура ЯЭУ косвенным способом, путём определения относительной диэлектрической проницаемости, обладает рядом достоинств, таких как безинерционность, радиационная стойкость чувствительного элемента, точность измерения, сравнимая с таковой при использовании термопар. Полученная калибровочная кривая охватывает весь диапазон рабочих температур, т.е. нет необходимости устанавливать чувствительный элемент на каждый температурный диапазон. При этом используется чувствительный элемент существующего импульсного рефлектометрического уровнемера, в отличие от радиолокационных уровнемеров [8], где такое совмещение невозможно.

Уменьшение погрешности измерения температуры возможно за счёт повышения порядка аппроксимирующего полинома и увеличения точности измерения временной задержки. Отметим, что можно снизить погрешность, пересчитав градуировочную кривую, если диапазон давлений и температур меньше рассмотренного в статье.

Разработанная методика также может применяться в устройствах, работающих по сходному принципу, в том числе для определения температуры агрессивных жидкостей, однако в этом случае потребуется пересчёт градуировочной кривой.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003).

Библиографический список

1. **Троепольская А.А.** Модернизация системы измерения температуры при испытаниях ядерно-энергетических установок / А.А. Троепольская, М.В. Волкодаев // Теория и практика современной науки. – 2023. № 96. – С. 176–190.
2. **Зайцев П.А.** Средства температурного контроля ядерных энергетических установок / П.А. Зайцев, П.П. Олейников, С.В. Приймак, М.Л. Таубин., Подольск: ООО «Типография САРМА», 2018. – 226 с.
3. **Fernandez .P.A** Formulation for the Static Permittivity of Water and Steam at Temperature from 238 K to 873 K at Pressures up to 1200 MPa, Including Derivatives and Debye-Hukel Coefficients / D.P. Fernandez, A.R.H. Goodwin, E. W. Lemmon et al. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1997. vol. 26. pp. 1125-1166.
4. **Корячко В.П.** Математическая модель рефлектометрического уровнемера для измерения уровня воды в контуре ядерной энергетической установки / В.П. Корячко,

С.С. Румянцев, Л.В. Аронов // Вестник рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. № 84. – С. 157-165. DOI: 10.21667/1995-4565-2023-84-157-165

5. **Боков Л. А.** Электродинамика и распространение радиоволн : учеб. пособие / Л.А. Боков, В.А. Замотринский, А.Е. Мандель. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2013. – 410 с.

6. **Курепин В.В., Баранов И.В.** Обработка экспериментальных данных: метод. указания к лабораторным работам для студентов 1, 2 и 3-го курсов всех спец. / Под ред. В.А. Самолетова. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2003. – 57 с.

7. **Фефелов А.А.** Исследование влияния контакта термопары с поверхностью тонкого образца с низкой теплопроводностью на точность определения температуры / А.А. Фефелов, А.Н. Чувилин // Вестник рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. № 83. С. 120-126. DOI: 10.21667/1995-4565-2023-83-120-126

8. **Баранов И.В.** Влияние шума на точность определения расстояния дальномером с адаптивной частотной модуляцией / И.В. Баранов, В.В. Езерский // Вестник рязанского государственного радиотехнического университета. 2007. № 21. С. 31–36.

UDC 621.371.391.2

MEASURING WATER TEMPERATURE BY PULSE REFLECTOMETRY METHOD IN PRIMARY LOOP OF NUCLEAR POWER PLANT

V. P. Koryachko, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Head of the Department, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/0000-0003-0272-673X, e-mail: koryachko.v.p@rsreu.ru

S. S. Rumyantsev, Head of the State Defense Defense Department, Morinsis-Agat-KIP JSC, Ryazan, Russia; orcid.org/ 0009-0006-6102-3902, R0806rus@yandex.ru

L. V. Aronov, assistant professor, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/0000-0001-9010-3836, e-mail: LVArronov@yandex.ru

This article proposes a method for indirect measuring water temperature, based on the sensitive element of pulse reflectometric level meter, in primary circuit tanks of a nuclear power plant in the temperature range of 275...625K with pressure fluctuations in the range of 0.1-25MPa. A calibration curve of temperature was obtained based on averaging and approximation by a polynomial of the second degree of the results of experimental measurements with root-mean-square error of 1.35 %, while the relative error of temperature measurement by the proposed method is at least 3.95 %. An expression is derived to determine the resulting relative measurement error and recommendations for its reduction.

Keywords: reflectometric level gauge, pulsed reflectometer, mathematical model, nuclear power plant, computer model, temperature measurement.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-87-121-127

References

1. **Troepol'skaya A.A.** Modernizaciya sistemy izmereniya temperatury pri ispytaniyah yaderno-energeticheskikh ustanovok. A.A. Troepol'skaya, M.V. Volkodaev. *Teoriya i praktika sovremennoj nauki* № 6(96) 2023 – pp. 176 - 190

2. **Zajcev P.A.** *Sredstva temperaturnogo kontrolya yadernyh energeticheskikh ustanovok* .P.A. Zajcev, P.P. Olejnikov, S.V. Prijmak, M.L. Taubin – Podol'sk, 2018 g. – 226 s.

3. **Fernandez D.P.** A Formulation for the Static Permittivity of Water and Steam at Temperature from 238 K to 873 K at Pressures up to 1200 MPa, *Including Derivatives and Debye-Hukel Coefficients* . D.P. Fernandez, A.R.H. Goodwin, E. W. Lemmon et al. J. Phys. Chem. Ref. Data. 1997. vol. 26. pp. 1125-1166

4. **Koryachko V.P.** Matematicheskaya model' reflektometricheskogo urovnemera dlya izmereniya urovnya vody v konture yadernoj energeticheskoy ustanovki. *Vestnik ryazanskogo gosudarstvennogo radio-tekhnicheskogo universiteta*. 2023. no. 84. С. 157-165. (in Russian).

5. **Bokov L.A.** Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln : ucheb. posobie. L.A. Bokov, V.A. Zamotinskij, A.E. Mandel'. – Tomsk : Tomsk. gos. un-t sistem upr. i radioelektroniki, 2013. – 410 s.

6. **Kurepin V.V., Baranov I.V.** *Obrabotka eksperimental'nyh dannyh: Metod. ukazaniya k laboratornym rabotam dlya studentov 1, 2 i 3-go kursov vseh spec.* Pod red. V.A. Samoletova. – SPb.: SPbGUNIPT, 2003 – 57 s.

7. **Fefelov A.A.** Issledovanie vliyaniya kontakta termopary s poverhnost'yu tonkogo ob-razca s nizkoj teploprovodnost'yu na tochnost' opredeleniya temperatury. *Vestnik ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universitet.* 2023. no. 83. С. 120-126. DOI: 10.21667/1995-4565-2023-83-120-126. (in Russian).

8. **Baranov I.V.** Vliyanie shuma na tochnost' opredeleniya rasstoyaniya dal'nomerom s adap-tivnoj chastotnoj modulyaciej. *Vestnik Ryazanskogo gosudar-stvennogo radiotekhnicheskogo universiteta.* 2007. no. 21, pp. 31–36.(in Russian).