

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО РЕФЛЕКС-РАДАРНОГО УРОВНЕМЕРА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЯЭУ

В.И. Мельников, В.В. Иванов, И.А. Тепляшин, М.А. Тимонин

*Нижегородский государственный технический университет
603600, г. Н.Новгород, ул. Минина, 24, НГТУ им. Р.Е. Алексева*

Р

Рассмотрена конструкция микроволнового рефлекс-радарного уровнемера теплоносителя ЯЭУ. Преимуществами рефлекс-радарного принципа измерения являются отсутствие влияния на точность измерения уровня присутствия пузырей, конденсации и кипения теплоносителя, изменения его давления, температуры и плотности, относительно простая конструкция измерительного преобразователя.

В рассматриваемом уровнемере в качестве преобразователя (измерительного зонда) используется СВЧ-волновод, изготовленный в виде коаксиальной линии. Зонд состоит из стальной трубы с наружным диаметром 20 мм и центрального электрода, расположен вертикально и погружен в контролируемый теплоноситель. Волновое сопротивление зонда 50 Ом. Представлена электрическая схема прибора. Приведены осциллограммы принимаемых сигналов и основные соотношения, поясняющие работу уровнемера. Исследованы сигналы коаксиального измерительного зонда в жидкости с переменной диэлектрической проницаемостью. Приведены результаты экспериментального исследования работы уровнемера в водяном теплоносителе при высоких параметрах: давлении до 10 МПа и температуре до 310°C. Показано, что прибор устойчиво функционирует в данных условиях. Уровнемер практически не нуждается в коррекции показаний при изменении теплофизических свойств теплоносителя. Прибор предназначен для применения в системах контроля и управления ЯЭУ, а также в установках по переработке отработанного ядерного топлива.

Ключевые слова: микроволновый рефлекс-радарный уровнемер, водяной теплоноситель высоких параметров, 310°C, 10 МПа, ЯЭУ, энергетическое оборудование.

ВВЕДЕНИЕ

Измерение уровня теплоносителя в ядерной энергетической установке (ЯЭУ) является сложной технической задачей. Уровнемер должен длительно и надежно работать в экстремальных условиях эксплуатации – при высоком давлении, температуре и уровне радиации, характерных для ядерного энергетического оборудования.

Несмотря на сложность задачи в атомной энергетике используется весьма ограниченное число приборов, в частности, применяются приборы контроля уровня теплоносителя, основанные на гидростатическом принципе. Перспективны ультразвуковые уровнемеры, в которых используются для проводки акустических сигналов

© В.И. Мельников, В.В. Иванов, И.А. Тепляшин, М.А. Тимонин, 2018

во внутренние объемы контуров стальные волноводы. Кроме того, получают развитие термоэлектрические и кондуктометрические уровнемеры. Отметим, что проблема измерения уровня технологических сред является актуальной и в других отраслях атомной промышленности, что подтверждается значительным разнообразием созданных методов и технических средств уровнеметрии.

К важнейшим задачам, которые должны быть решены при разработке уровнемеров, относятся надежность прибора, снижение (исключение) влияния различных мешающих факторов на результаты измерений, долговечность и стойкость в средах с переменными и экстремальными физическими параметрами.

В последние годы значительное развитие получили уровнемеры, основанные на локации контролируемой среды микроволновыми импульсами. Их появление связано, в первую очередь, с развитием СВЧ-техники и появлением сравнительно дешевой быстродействующей микроэлектроники, что позволило миниатюризировать системы обработки информации, настройки и диагностики уровнемеров. Эти наиболее совершенные и сложные приборы контроля уровня получили распространение только в начале двухтысячных годов.

Рефлекс-радарные уровнемеры основаны на методе импульсной рефлектометрии с временным разрешением (TDR), применяемым при тестировании повреждений в линиях связи [1 – 4].

Их основными преимуществами являются простота технической реализации первичного датчика, обеспечивающая его высокую долговременную устойчивость при воздействии среды с высокими температурой и давлением, а также то, что фактически измеряемой величиной является временной интервал – время пробега электрического импульса до границы раздела газ-жидкость и обратно, которое может измеряться с высокой точностью и почти не зависит от различных технологических параметров теплоносителя (температуры, давления, концентрации паров и т.п.).

Главным компонентом рефлекс-радарного уровнемера является измерительный зонд, представляющий собой СВЧ-волновод, расположенный вертикально и частично погруженный в контролируемую среду. Используются волноводы в виде коаксиальной или двухпроводной линии [5, 6].

В верхней части зонда электронная схема генерирует короткие электромагнитные импульсы, которые по волноводу со скоростью, близкой к скорости света, распространяются вниз. При достижении импульсом поверхности жидкости, имеющей более высокую диэлектрическую проницаемость, чем у воздуха, в котором он распространялся перед этим, импульс отражается. Быстродействующая схема определяет время распространения импульса от момента посылки до приема и вычисляет уровень жидкости. Чем больше диэлектрическая проницаемость жидкости, тем сильнее будет это отражение. Важно, что на распространение электромагнитного импульса не оказывают существенного влияния изменения давления и температуры, наличие пены, пара и другие факторы среды [7 – 9].

Отметим, что все разработки рефлекс-радарных уровнемеров, представленные в технической и патентной литературе и рекламных источниках, являются продуктами иностранных компаний [10 – 14]. Отечественные приборы отсутствуют, поэтому стоимость таких приборов на российском рынке значительна и достигает нескольких тысяч долларов.

В работе рассмотрены результаты исследований, направленные на создание и тестирование отечественного микроволнового рефлекс-радарного уровнемера водяного теплоносителя для применения в ядерной энергетике.

Главными проблемами при разработке конструкции прибора являются выбор метода точного измерения весьма коротких временных интервалов (от единиц нано-

секунд) и создание теплостойкого, выдерживающего высокое давление узла герметизации для проводки электромагнитного микроволнового сигнала внутрь оборудования первого и второго контуров.

КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА УРОВНЕМЕРА

Уровнемер состоит из измерительного зонда, выполненного в виде коаксиальной линии, линии задержки и вторичного электронного блока. Нами была разработана конструкция прибора с коаксиальным зондом длиной 0,7 м и волновым сопротивлением 50 Ом. В качестве линии задержки применен коаксиальный кабель длиной 1,5 м (рис. 1).



Рис. 1. Измерительный зонд

Зонд изготовлен из трубы диаметром 20×2 мм. В качестве центрального электрода использован стержень диаметром 7 мм. Уплотнение и электрическая изоляция центрального электрода в верхней части зондов выполнены при помощи узла на основе теплостойкой керамики. Для крепления и герметизации зонда в емкости применен штуцер с резьбовым соединением 3/4 дюйма. Корпус зонда внизу на свободном конце электрически соединен с центральным электродом, образуя короткозамкнутую линию. Дистанционирование центрального электрода осуществлено элементами подвески, изготовленными из талькохлоритовых втулок.

Структурная схема прибора и сигналы на входе в компаратор при различном уровне воды показаны на рис. 2.

Электронный блок включает в себя генератор прямоугольных импульсов, подключенный через согласующий резистор 50 Ом и линию задержки к зонду, стробируемый компаратор, на второй вход которого подается напряжение от датчика уровня, преобразователь «длительность импульса - амплитуда», аналого-цифровой преобразователь и преобразователь «амплитуда - ток».

В выходном каскаде генератора используется транзистор с граничной частотой 7 ГГц, компаратор имеет характерное время срабатывания 2,7 нс, функции остальной части схемы выполняет микропроцессор серии PIC.

Работает прибор следующим образом. Отрицательный фронт импульса амплитудой U_0 с выхода генератора через резистор и линию задержки поступает на вход зонда, где генерирует микроволновую электромагнитную волну в пространстве между корпусом и центральным электродом. Эта волна распространяется по зонду вниз до точки замыкания центрального электрода с корпусом и отражается обратно. В результате на выходе линии задержки формируется прямоугольный импульс, представляющий собой суперпозицию посланной и принятой волн.

Прямоугольная форма импульса объясняется тем, что отраженный импульс возвращается в противофазе посланному, в результате чего происходит их взаимная компенсация с задержкой, равной времени пробега сигнала по линии задержки и зонду до линии раздела фаз и обратно. Затем принятый импульс поступает на вход быстродействующего компаратора, на другой вход которого подается напряжение

с выхода датчика уровня. Наносекундный импульс с выхода компаратора при помощи преобразователя «длительность импульса - амплитуда» преобразуется в уровень напряжения, пропорциональный длительности входного импульса, который затем при помощи АЦП преобразуется в цифровой код. Далее схема вырабатывает выходной токовый сигнал на заданной нагрузке, пропорциональный получаемому цифровому коду (уровню).

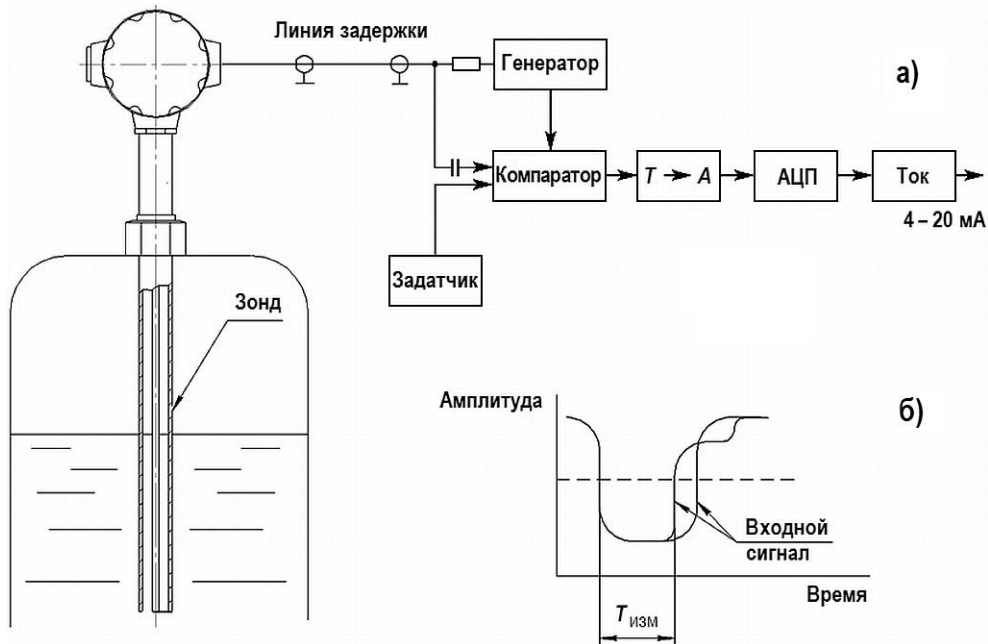


Рис. 2. Структурная схема прибора (а) и сигналы на входе в компаратор (б)

СИГНАЛЫ ЗОНДА И ТЕСТИРОВАНИЕ УРОВНЕМЕРА

Амплитуда импульса на выходе зонда (в точке присоединения компаратора) вдвое меньше амплитуды импульса, генерируемого генератором. Она определяется соотношением

$$U = U_0 Z_0 / (Z_0 + R_0), \quad (1)$$

где U_0 – амплитуда импульса на выходе генератора (около 3,6 В); Z_0 – волновое сопротивление линии задержки (50 Ом); R_0 – сопротивление согласующего резистора (50 Ом).

При погружении зонда в воду часть энергии электромагнитной волны отражается от границы воздух-жидкость, другая часть энергии волны проходит дальше до короткозамкнутого конца зонда, также отражается и возвращается обратно [15].

Отраженная от границы воздух-жидкость волна приходит с опережением (относительно незаполненного водой зонда). Волна, отраженная от кончика зонда, напротив, возвращается с запаздыванием. Величина запаздывания объясняется снижением скорости волны вследствие заполнения внутреннего объема зонда диэлектриком (контролируемой жидкостью).

Амплитуда волны, отраженной от границы воздух-жидкость, определяется коэффициентом отражения, который равен [16]

$$K = (\sqrt{\varepsilon} - 1) / (\sqrt{\varepsilon} + 1), \quad (2)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость жидкости.

В диапазоне температур 20 – 350°C относительная диэлектрическая проницае-

мость водяного теплоносителя меняется примерно от 80 до 15 [17], при этом коэффициент отражения изменяется незначительно – от 0,8 до 0,59.

В водяном теплоносителе большая часть энергии электромагнитной волны отражается от границы воздух-вода, не достигая кончика зонда, что хорошо видно на осциллограмме (рис. 3). При этом задержка сигнала, отраженного от кончика зонда (T_3), довольно значительна из-за высокого значения диэлектрической проницаемости воды.

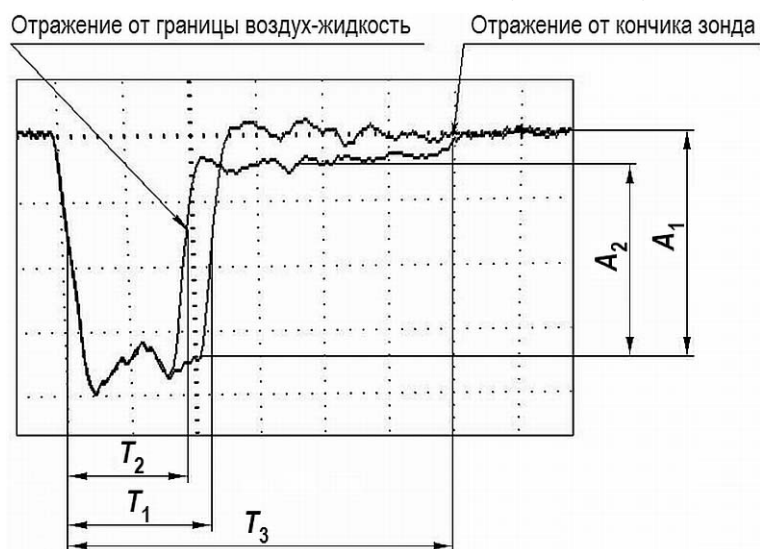


Рис. 3. Совмещенные осциллограммы сигналов на выходе зонда на воздухе и полностью погруженном в воду при нормальных условиях (цена деления по вертикали – 0,5 В/клет., по горизонтали – 10 нс/клет.): T_1 – длительность импульса на воздухе; T_2 – длительность импульса, отраженного от границы воздух-вода; T_3 – длительность импульса, отраженного от кончика зонда в воде; A_1 – амплитуда импульса посылки; A_2 – амплитуда импульса, отраженного от границы воздух-вода

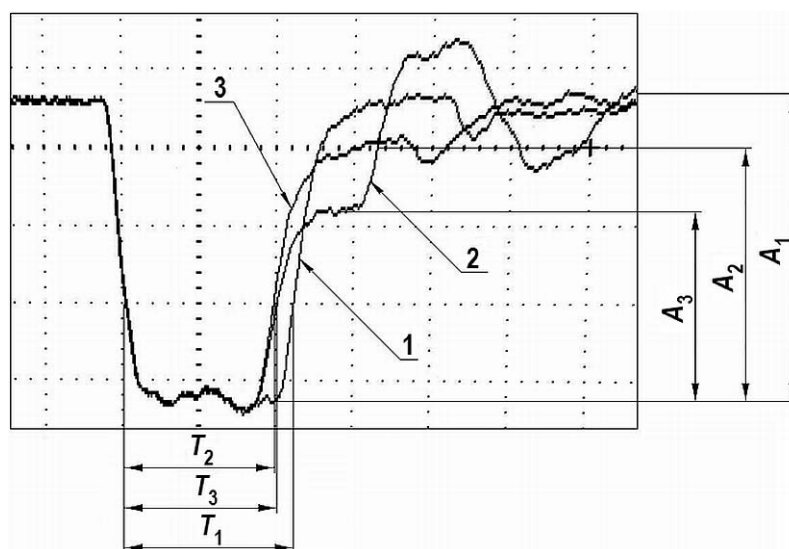


Рис. 4. Совмещенные осциллограммы сигналов на выходе зонда при нормальных условиях на воздухе (1), в ацетоне (2) и воде(3), глубина погружения зонда в жидкость 390 мм (цена деления по вертикали – 0,5 В/клет., по горизонтали – 10 нс/клет.). T_1 – длительность импульса на воздухе; T_2 – длительность импульса, отраженного от границы воздух-ацетон; T_3 – длительность импульса, отраженного от границы воздух-вода; A_1 – амплитуда импульса посылки; A_2 – амплитуда импульса, отраженного от границы воздух-ацетон; A_3 – амплитуда импульса, отраженного от границы воздух-вода

Уровень жидкости определяется из соотношения

$$H = C (T_1 - T_2)/2, \quad (3)$$

где C – скорость распространения электромагнитной волны в верхней, заполненной воздухом, части зонда.

Скорость волны в зонде зависит от диэлектрической проницаемости жидкости, заполняющей межэлектродное пространство:

$$C_{ж} = C\epsilon^{1/2}. \quad (4)$$

Отсюда следует, что существует второй вариант измерения уровня жидкости по величине задержки импульса, отраженного от кончика зонда T_3 :

$$H = C_{ж} (T_3 - T_1)/2. \quad (5)$$

Но при этом надо учитывать, что на величину T_3 оказывает существенное влияние диэлектрическая проницаемость контролируемой среды ϵ .

На осциллограмме (рис. 4) показаны сигналы зонда на воздухе и погруженного в разные жидкости примерно на половину его длины (жидкости: вода при нормальных условиях $\epsilon = 80$ и ацетон $\epsilon = 21$, имитирующий воду на линии насыщения при температуре приблизительно 310°C).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изготовленный образец уровнемера был испытан в стендовой установке вначале при нормальных условиях путем погружения чувствительного элемента датчика (зонда) в воду. Выходной ток изменялся пропорционально уровню жидкости (рис. 5). Среднеквадратичное отклонение измеренного значения уровня от фактического не превышало 0,25%.

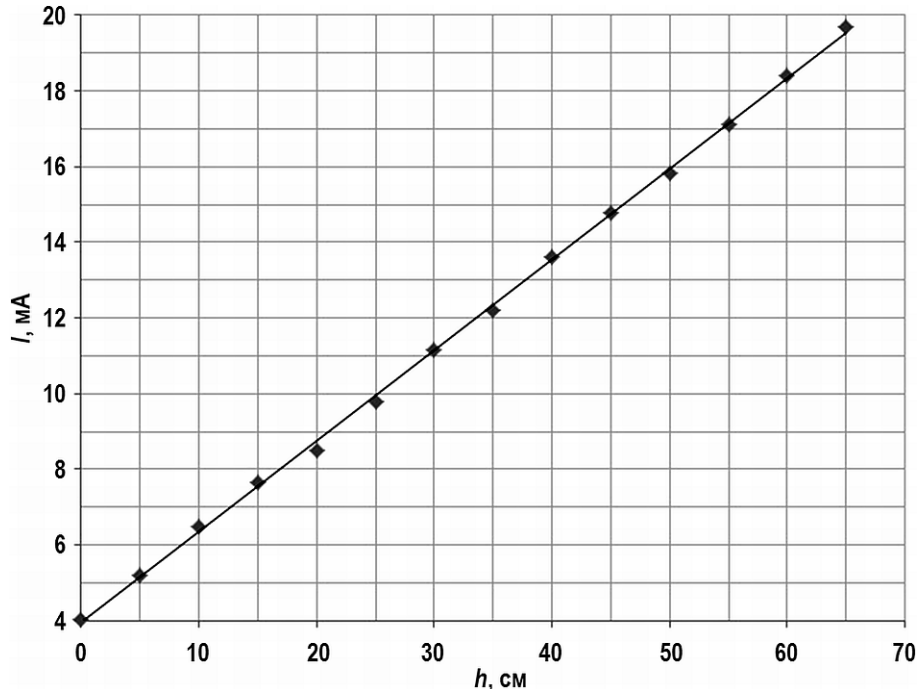


Рис. 5. Калибровочная характеристика уровнемера в воде при нормальных условиях

Опыты при высоких параметрах проводились в теплоносителе на линии насыщения при вариации давлении от 0,1 до 11 МПа. Экспериментальная установка [18] представляла собой прочную герметично закрытую трубу с электрообогревом, в

которую помещался уровнемер. Мощность нагревателя регулировалась при помощи лабораторного автотрансформатора. При этом максимальная температура теплоносителя достигала 310°C.

Перед проведением эксперимента в трубу устанавливался уровнемер, система заполнялась водой до отметки 460 мм от нижнего конца трубы, затем установка герметизировалась. После подготовки измерительной схемы на электрообогреватель подавалось напряжение. Температура в системе плавно повышалась со скоростью около 7°C/мин до температуры около 310°C. При этом давление увеличивалось примерно до 11 МПа. Контролировались температура и давление теплоносителя внутри трубы, а также выходной ток уровнемера.

В процессе разогрева внутри трубы устанавливается равновесие между жидкой и паровой фазами теплоносителя на линии насыщения за счет частичного испарения воды при постоянном объеме. При этом с ростом температуры давление и уровень воды увеличиваются. Нами были определены зависимости изменения уровня воды от температуры на линии насыщения – расчетная и измеренная рефлекс-радарным уровнемером (рис. 6).

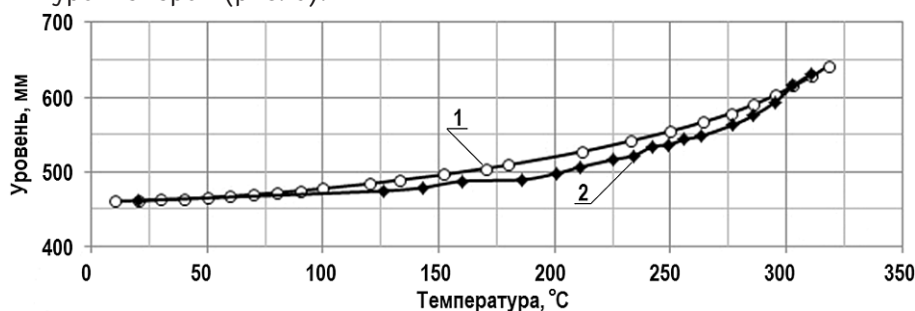


Рис. 6. Изменение уровня теплоносителя в установке от температуры воды на линии насыщения: 1 – расчетная; 2 – измеренная

При высокой температуре наблюдается расхождение измеренного уровня теплоносителя с расчетным примерно на 20 мм (3% от диапазона измерения) в сторону понижения. Анализ показал, что причиной этого может являться уменьшение диэлектрической проницаемости теплоносителя с ростом температуры. При уменьшении значения ϵ для формирования отраженного импульса микроволновой энергии требуется больший слой жидкости, что проявляется в виде кажущегося уменьшения уровня.

Коррекцию показаний уровнемера можно осуществить учетом изменения диэлектрической проницаемости теплоносителя. Как следует из выражения (2)

$$\epsilon = [(1 + K)/(1 - K)]^2, \quad (6)$$

где коэффициент отражения K определяется по форме импульса на выходе зонда.

В частности, при температуре 310°C для водяного теплоносителя $K = A_3/A_1 \approx 0,64$ (см. рис. 4), откуда следует $\epsilon \approx 20$.

Внешний вид микроволнового рефлекс-радарного уровнемера, изготовленного компанией ООО «АИС-НН», показан на рис. 7.

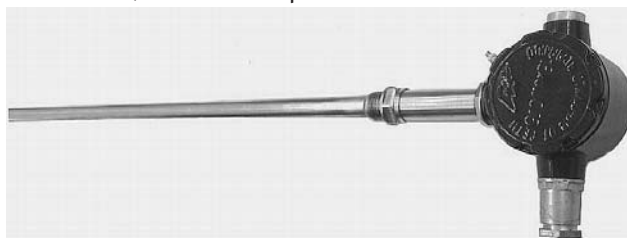


Рис. 7. Микроволновой рефлекс-радарный уровнемер компании ООО «АИС-НН»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты исследований физических процессов в СВЧ-тракте микроволнового рефлекс-радарного уровнемера. Рассмотрена конструкция прибора и проведены его стендовые испытания в среде водяного теплоносителя. Подтверждено, что разработанный уровнемер может применяться для контроля среды при температуре до 310°C и давлении до 11 МПа. Прибор может применяться в различных областях промышленности и народного хозяйства, в частности, для контроля уровня теплоносителя в системах контроля и управления ЯЭУ, а также в установках по переработке отработанного ядерного топлива.

Литература

1. Глебович Г.В., Андриянов А.В., Введенский Ю.В., Ковалев И.П., Крылов В.В., Рябинин Ю.А. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов / Под ред. Г.В. Глебовича. – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.
2. Воронцов А.С., Фролов П.А. Импульсные измерения коаксиальных кабелей связи. – М.: Радио и связь, 1985. – 96 с.
3. Тарасов Н.А. Использование метода импульсной рефлектометрии для определения повреждений кабельных линий. Электронный ресурс «СТЭЛЛ»: <http://reis.narod.ru/metod.htm>. Режим доступа – свободный.
4. Jones S.B., Wraith J.M., Or D. Time domain reflectometry measurement principles and application. // Hydrol Process. – 2002. – No. 16. – PP. 141-153.
5. Weiss M., Knochel R. Novel method of measuring impurity levels in liquid tanks. // 1997 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. – 1997. – Vol. 3. – PP. 1651-1654.
6. Cataldo A., Tarricone L., Attivissimo F., Trotta A. A TDR Method for Real-Time Monitoring of Liquids. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2007. – No. 56. – PP. 582-595.
7. Тренкаль Е.И., Лоцилов А.Г. Измерение уровней жидкостей методом импульсной рефлектометрии (обзор). / Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19. – № 4. – С. 67-73.
8. Jun G., Huigin Z., Hongyu Y., Hui Z. Design of guided wave radar level meter based on equivalent time sampling. Proc. of the IEEE Int. Conf. «Communications, Circuit and Systems (ICCAS)». – Chengdu, China, 15-17 Nov., 2013. – Vol. 2. – PP. 139-142.
9. Xiaowen X., Zonghui L., Junkai G., Hongmin G. The principle and simulation of the TDR test. Proc. of the IEEE Int. Conf. «Microwave Techn. and Comp. Electromagnetics». Qingdao, China, 25-28 Aug. 2013. – PP. 47-51.
10. Dozer B.E. Selfcalibrating liquid-level measuring device. Patent US, no. 3398578, 1968.
11. Hook W.R. Apparatus and methods for time domain reflectometry. Patent US, no. 5726578, 1998.
12. Reimelt R., Schroth H. Device for determining and/or monitoring the fill level of a product in a container. Patent DE, no. 1010945, 2002.
13. Gravel J.L., Fandrey M.C. Tank seal for guided wave radar level measurement Patent US, no. 7255002, 2005.
14. Инструкции по установке и эксплуатации уровнемера BM100 фирмы KROHNE. – 37 с. Электронный ресурс: www.ste.ru/krohne/pdf/rus/russ_op_manualBM100.pdf. Режим доступа – свободный.
15. Cataldo A., De Benedetto E., Cannazza G. Broadband Reflectometry for Enhanced Diagnostics and Monitoring Applications. – Springer Science & Business Media, 2011. – 150 p.
16. Nematich C.P. Time domain reflectometry liquid level sensors. // IEEE instrumentation & measurement magazine. – 2001. – Vol. 4. – Iss. 4. – PP. 40-44.
17. Теплоэнергетика и теплотехника. Т.1. Общие вопросы. Раздел 7. Физико-химические свойства и технологии растворов. – С. 298. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 528 с.
18. Мельников В.И., Тепляшин И.А., Иванов В.В. Исследование ультразвукового рефлекс-радарного волноводного уровнемера теплоносителя ЯЭУ// Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2015. – № 4. – С. 26-35.

Поступила в редакцию 15.03.2017 г.

Авторы

Мельников Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор

E-mail: melnikov@nntu.ru, www.aisnn.com

Иванов Вадим Владимирович, кандидат технических наук, доцент

E-mail: ivv@nntu.ru

Тепляшин Иван Алексеевич, аспирант

E-mail: ivantia@mail.ru

Тимонин Михаил Александрович, студент

E-mail: melnikov@nntu.ru

UDC 681.121

DEVELOPMENT AND STUDY OF A MICROWAVE REFLEX-RADAR LEVEL GAUGE OF THE NUCLEAR REACTOR COOLANT

Meľnikov V.I., Ivanov V.V., Teplyashin I.A., Timonin M.A.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

24 Minin str., Nizhny Novgorod, 603600 Russia

ABSTRACT

The article considers the design of a microwave reflex-radar level gauge of the nuclear reactor coolant. The main advantage of the reflex-radar measurement principle is that it does not actually affect the accuracy when measuring the level of bubbles present, the coolant condensation and boiling as well as changes in its pressure, temperature and density. In addition, the design of the measuring transmitter is quite simple.

In this level gauge, a microwave waveguide made as a coaxial line is used as a transducer (measuring probe). The probe consists of a steel pipe with an external diameter of 20 mm and a central electrode; it is located vertically and immersed in a controlled coolant. The probe wave resistance is 50 ohms. The electrical diagram of the device is presented. The oscillograms of the received signals and the basic relationships explaining the level gauge operation are also given. The signals of the coaxial measuring probe have been examined in a liquid with a variable dielectric constant. The results of an experimental study of the level gauge operation in a water coolant at high parameters are given, i.e., at pressures up to 10 MPa and temperatures up to 310 °C. It has been shown that the device maintains its functional stability under these conditions. The level gauge's readings practically do not require correcting when the coolant's thermophysical properties are changed. The device is intended for use in the control and management systems of nuclear power plants as well as in fuel reprocessing plants.

Key words: microwave reflex-radar level gauge, water coolant at high temperatures and pressures (310 °C, 10 MPa), nuclear reactor, power-generating equipment.

REFERENCES

1. Glebovich G.V., Andriyanov A.V., Vvedenckij Y.V., Kovalev I.P., Krylov V.V., Ryabinin Y.A. *Investigation of objects using picosecond pulses*. Moscow. Radio i Svyaz' Publ., 1984, 256 p. (in Russian).
2. Vorontsov A.S., Frolov P.A. *Pulse measurement of coaxial communication cables*. Moscow. Radio i Svyaz' Publ., 1985, 96p. (in Russian).

3. Tarasov N.A. Using the method of pulse reflectometry for determination of damage of cable lines. Available at: <http://reis.narod.ru/metod.htm> (accessed Mar 10 2018) (in Russian).
4. Jones S.B., Wraith J.M., Or D. Time domain reflectometry measurement principles and application. *Hydrol Process*. 2002, no. 16, pp. 141-153.
5. Weiss M., Knochel R. Novel method of measuring impurity levels in liquid tanks. *1997 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. 1997, v. 3, pp. 1651-1654.
6. Cataldo A., Tarricone L., Attivissimo F., Trotta A. A TDR Method for Real-Time Monitoring of Liquids. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2007, no. 56, pp. 582-595.
7. Trenkal E.I., Loschilov A.G. Measurement of liquid levels by pulse reflectometry (review). *Proc. of the Tomsk GUSUR*, 2016, v. 19, no. 4, pp. 67-73 (in Russian).
8. Jun G., Huigin Z., Hongyu Y., Hui Z. Design of guided wave radar level meter based on equivalent time sampling. Proc. of the IEEE Int. Conf. «Communications, Circuit and Systems (ICCCAS)». Chengdu, China, 15-17 Nov., 2013, v. 2, pp. 139-142.
9. Xiaowen X., Zonghui L., Junkai G., Hongmin G. The principle and simulation of the TDR test. Proc. of the IEEE Int. Conf. «Microwave Techn. and Comp. Electromagnetics». Qingdao, China, 25-28 Aug., 2013, pp. 47-51.
10. Dozer B.E. Selfcalibrating liquid-level measuring device. Patent US, no. 3398578, 1968.
11. Hook W.R. Apparatus and methods for time domain reflectometry. Patent US, no. 5726578, 1998.
12. Reimelt R., Schroth H. Device for determining and/or monitoring the fill level of a product in a container. Patent DE, no. 1010945, 2002.
13. Gravel J.L., Fandrey M.C. Tank seal for guided wave radar level measurement Patent US, no. 7255002, 2005.
14. Instructions for installing and operating the BM100 level transmitter company KROHNE, 37 p. Available at: www.ste.ru/krohne/pdf/rus/russ_op_manualBM100.pdf (accessed Mar 10 2018) (in Russian).
15. Cataldo A., De Benedetto E., Cannazza G. *Broadband Reflectometry for Enhanced Diagnostics and Monitoring Applications*. Springer Science & Business Media, 2011, 150 p.
16. Nemarich C.P. Time domain reflectometry liquid level sensors. *IEEE instrumentation & measurement magazine*. 2001, v. 4, iss. 4, pp. 40-44.
17. *Teploenergetika i teplotekhnika*. Vol. 1. General questions. Section 7. Physico-chemical properties and technology solutions, p. 298. Moscow. MEI Publ., 1999, 528 p.
18. Mel'nikov V.I., Ivanov V.V., Teplyashin I.A. The study of ultrasonic waveguide level gage of nuclear reactor coolant on the basic of reflex-radar principle. *Izvestia vysshikh uchebnykh zavedenij. Yadernaya energetika*. 2015, no. 4, pp. 26-35 (in Russian).

Authors

Mel'nikov Vladimir Ivanovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: melnikov@nntu.ru

Ivanov Vadim Vladimirovich, Assistant Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: ivv@nntu.ru

Teplyashin Ivan Alekseevich, PhD Student

E-mail: ivantia@mail.ru

Timonin Mikhail Aleksandrovich, Student

E-mail: melnikov@nntu.ru