

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО РЕФЛЕКС-РАДАРНОГО УРОВНЕМЕРА ЖИДКОСТИ

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

Рассмотрена конструкция микроволнового рефлекс-радарного уровнемера жидкости. Приведены результаты экспериментальных исследований прибора в средах, имеющих различную диэлектрическую проницаемость. Показано, что при измерении уровня жидкости с низкой диэлектрической проницаемостью (нефтепродуктов) следует учитывать уменьшение амплитуды отраженного сигнала и, соответственно, отношения полезный сигнал - шум. Предложенная схема обработки сигналов обеспечивает устойчивую работу прибора в средах с относительной диэлектрической проницаемостью выше 2,0. Прибор может применяться для контроля уровня любых технологических жидкостей в различных отраслях промышленности.

Ключевые слова: микроволновые импульсы, рефлекс-радарный уровнемер, относительная диэлектрическая проницаемость, нефтепродукты.

Введение

Проблема измерения уровня технологических сред в емкостях является актуальной, что подтверждается значительным разнообразием методов и технических средств уровнеметрии, используемых в промышленности. 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. К наиболее совершенным и сложным приборам, получившим распространение только в начале двухтысячных годов, относятся уровнемеры, основанные на локации контролируемой среды микроволновыми импульсами. Их появление связано, в первую очередь, с развитием СВЧ техники и появлением сравнительно дешевой быстродействующей микроэлектроники, позволившее миниатюризировать систему обработки информации, настройки и диагностики уровнемеров.

Волноводные радарные уровнемеры основаны на методе импульсной рефлектометрии с временным разрешением (TDR), который применяется при тестировании повреждений в кабелях связи [1,2]. В этом методе используются импульсы электромагнитной энергии, передаваемые по волноводу (зонду),

частично погруженному в контролируемую среду. 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 обеспечивает точное измерение уровня жидкости. Чем больше диэлектрическая проницаемость жидкости, тем сильнее будет это отражение. Если контролируемая среда вода, то происходит практически полное отражение. Электромагнитная волна перемещается со скоростью близкой к скорости света и на ее распространение не оказывают существенного влияния изменение давления и температуры, форма емкости. Наличие пены, пара и другие факторы среды также практически не влияют на измерение уровня. Главной проблемой при использовании этого метода является необходимость точного измерения весьма коротких временных интервалов (от единиц наносекунд).

Отметим, что все разработки рефлекс-радарных уровнемеров, представленные в технической и патентной литературе и рекламных источниках, являются продуктами иностранных компаний, найти отечественные наработки нам не удалось [3,4]. Поэтому стоимость таких приборов на российском рынке значительна и может достигать нескольких тысяч долларов.

В настоящей работе представлены результаты исследований, направленные на создание и тестирование отечественного микроволнового рефлекс-радарного уровнемера.

Конструктивная схема уровнемера

Уровеньмер состоит из измерительного зонда, выполненного в виде коаксиальной или двухпроводной линии, линии задержки и вторичного электронного блока. Нами был использован коаксиальный зонд с волновым сопротивлением 50 Ом. В качестве линии задержки – коаксиальный кабель длиной 1,5м и волновым сопротивлением также 50 Ом. Всего было изготовлено два зонда идентичной конструкции: длиной 700мм и 1500мм.

Корпуса зондов изготовлены из трубы диаметром 20x2мм. В качестве центрального электрода использован стержень диаметром 7мм. Уплотнение и электрическая изоляция центрального электрода в верхней части зондов выполнены при помощи узла на основе теплостойкой керамики. Для крепления и герметизации зондов в сосуде применен штуцер с резьбовым соединением 3/4 дюйма.

Корпус зонда и центральный электрод закорочены внизу на свободном конце, образуя короткозамкнутую линию. Дистанционирование центрального электрода осуществлено фторопластовыми поддерживающими элементами.

Структурная схема прибора и сигналы на входе в компаратор при различном уровне воды показаны на рис.1.

Электронный блок включает генератор прямоугольных импульсов, под-

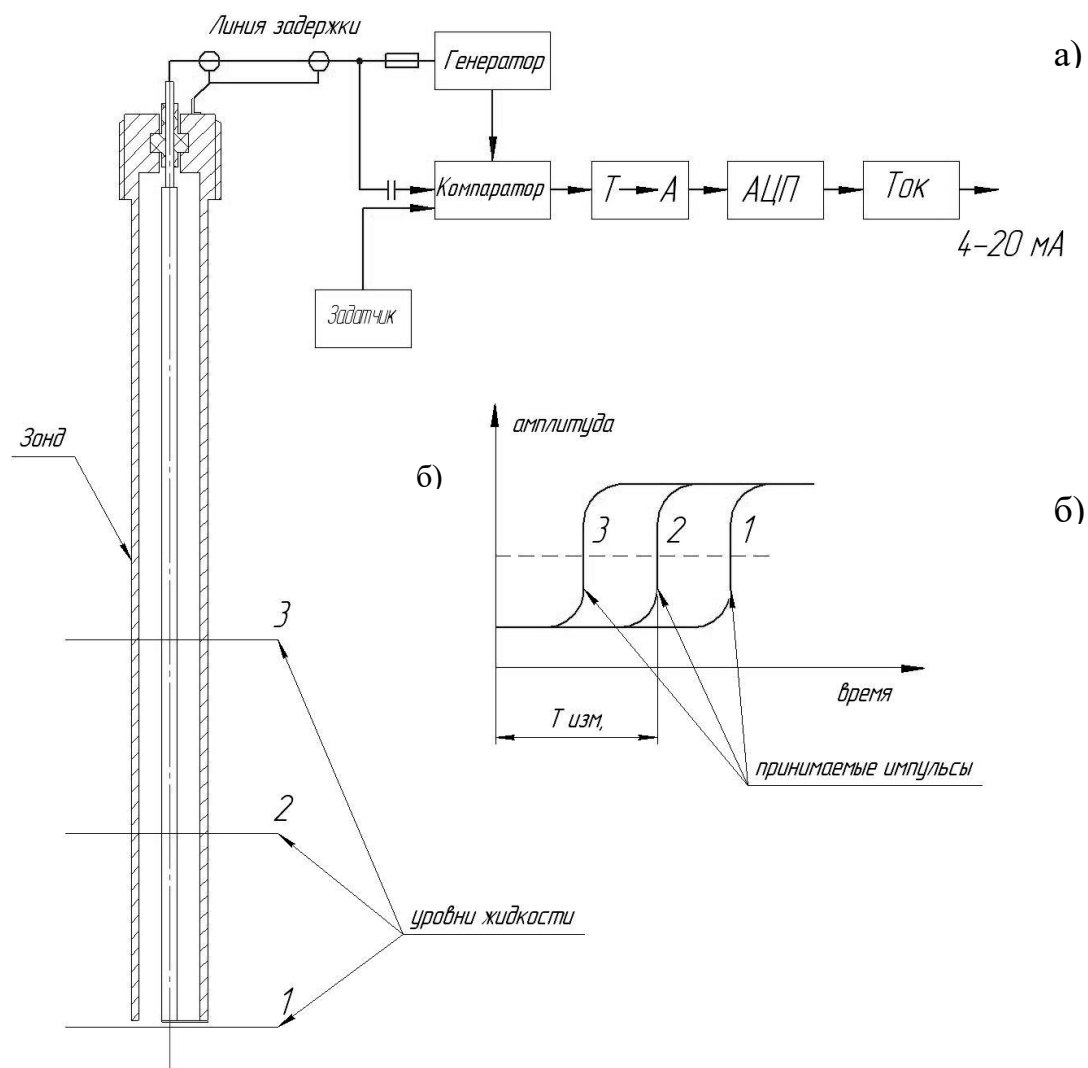


Рис.1. Структурная схема прибора (а) и сигналы на входе в компаратор (б).

ключенный через согласующий резистор 50 Ом и линию задержки к зонду,

стролируемый компаратор, на второй вход которого подается напряжение от датчика уровня, преобразователь «длительность импульса – амплитуда», аналого-цифровой преобразователь и преобразователь амплитуда – ток.

В генераторе был использован выходной каскад на основе транзистора с граничной частотой 7ГГц, остальная часть схемы выполнена на основе микропроцессора 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 центральном 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 подано напряжение 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 сигнал в виде силы тока на заданной нагрузке пропорциональный получаемому цифровому коду.

Сигналы зонда и тестирование прибора

Проанализируем сигналы на выходе зонда в жидкостях со значительно различающейся диэлектрической проницаемостью: в воде ($\epsilon \approx 80$) и бензине ($\epsilon \approx 2$).

Вначале отметим, что 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 3,6В);

Z_0 – волновое сопротивление линии задержки (50 Ом);

R_0 – сопротивление согласующего резистора (50 Ом).

При погружении зонда в жидкость с диэлектрической проницаемостью большей, чем у воздуха, часть энергии электромагнитной волны отражается от границы воздух/жидкость, другая часть энергии волны проходит дальше до короткозамкнутого конца зонда, отражается и возвращается обратно.

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

Амплитуда волны, отраженной от границы воздух/жидкость определяется коэффициентом отражения, который равен

$$K = \frac{\sqrt{\epsilon} - 1}{\sqrt{\epsilon} + 1}, \quad (2)$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость жидкости.

Если эта жидкость вода ($\epsilon \approx 80$), то $K \approx 0,8$, т.е. большая часть энергии электромагнитной волны отражается от границы воздух/вода, не достигая кончика зонда, что хорошо видно на осциллограмме (рис.2). При этом задержка сигнала, отраженного от кончика зонда, довольно значительна из-за высокой величины ϵ воды.

Уровень жидкости определяется простым соотношением:

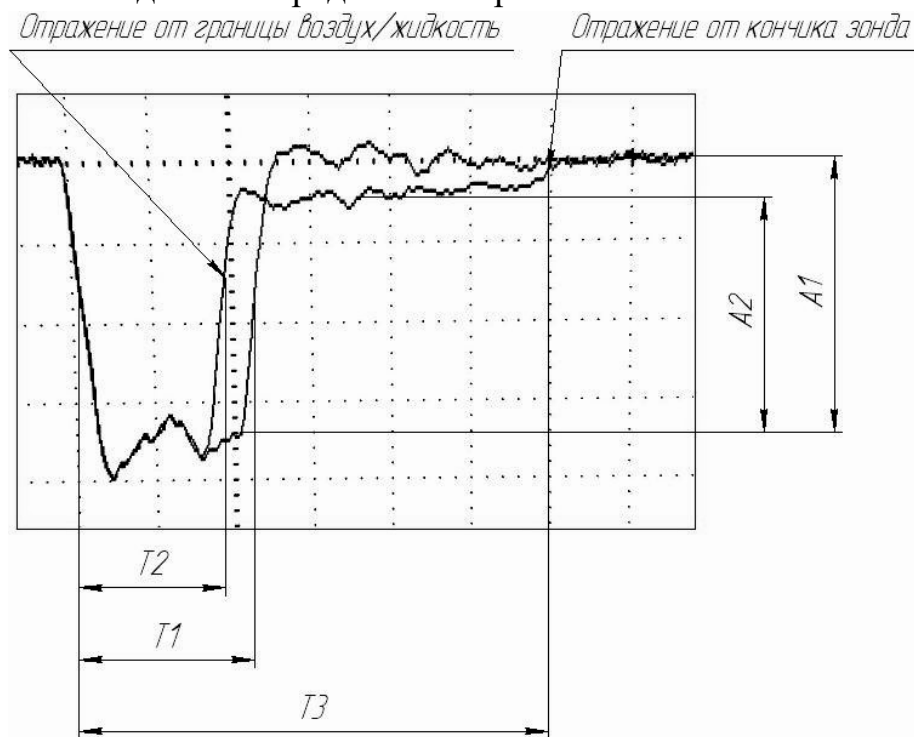


Рис.2. Осциллограммы сигналов на выходе зонда 0,7 м на воздухе и в воде, наложенные друг на друга. (Цена делений: верт. – 0,5 В/клет.; горизонт. – 10 нс/клет.) T1 – длительность импульса на воздухе, T2 – длительность импульса, отраженного от границы воздух/вода, T3 – длительность импульса, отраженного от кончика зонда. A1 – амплитуда импульса посылки, A2 – амплитуда импульса, отраженного от границы воздух/вода.

$$H = C (T1 - T2)/2, \quad (3)$$

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

Скорость волны в зонде, заполненном жидкостью, определяется ее диэлектрической проницаемостью:

$$C_{ж} = C/\sqrt{\epsilon} \quad (4)$$

Отсюда следует, что уровень жидкости также можно определять, измеряя величину T3:

$$H = C_{ж} (T3 - T1)/2 \quad (5)$$

При использовании прибора для контроля уровня нефтепродуктов характер принимаемых сигналов существенно отличается относительно предыдущего случая. Вследствие низкого значения диэлектрической проницаемости от границы раздела воздух/жидкость отражается только небольшая часть энергии импульса. Величина коэффициента отражения волны составляет всего $K \approx 0,17$ (рис.3).

Относительно маленькая амплитуда отраженного от границы

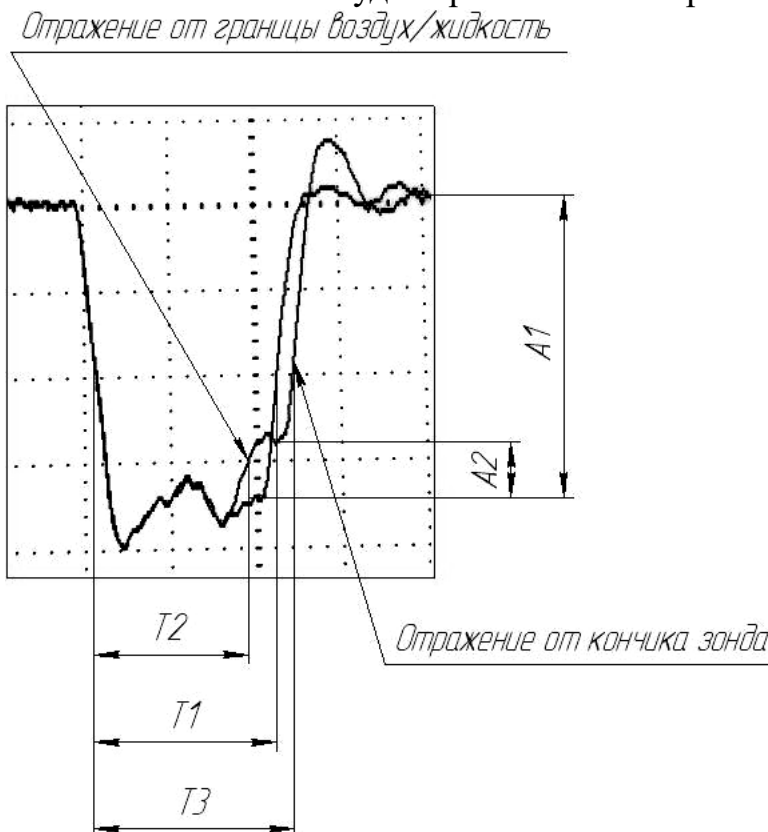


Рис.3. Осциллограммы сигналов на выходе зонда на воздухе и в бензине, наложенные друг на друга. (Цена делений: верт. – 0,5В/клет.; горизонт. – 10нс/клет.)

$T1$ – длительность импульса на воздухе, $T2$ – длительность импульса, отраженного от границы воздух/бензин, $T3$ – длительность импульса, отраженного от кончика зонда. $A1$ – амплитуда импульса посланки, $A2$ – амплитуда импульса, отраженного от границы воздух/бензин.

воздух/бензин сигнала заставляет разработчиков предусмотреть возможность определения уровня среды двумя независимыми способами: по опережению отраженного от поверхности нефтепродукта электромагнитного импульса и по задержке импульса, отраженного от кончика зонда. Первый способ потенциально точнее, поскольку работает независимо от диэлектрической проницаемости среды, но могут возникнуть сложности с выделением полезного сигнала при уменьшении ϵ . Второй – надежнее, но результат измерений

зависит от величины ε , поэтому может понадобиться дополнительная калибровка прибора.

Созданные нами образцы уровнемеров с чувствительными элементами длиной 0,7м и 1,5м были проверены в стендовой установке при нормальных условиях путем плавного погружения чувствительного элемента датчика (зонда) в воду, при этом подтвердилось, что выходной ток изменяется пропорционально глубине погружения его в жидкость (рис.4). Среднеквадратичное отклонение измеренного уровня от ожидаемого значения не превышает 0,25%.

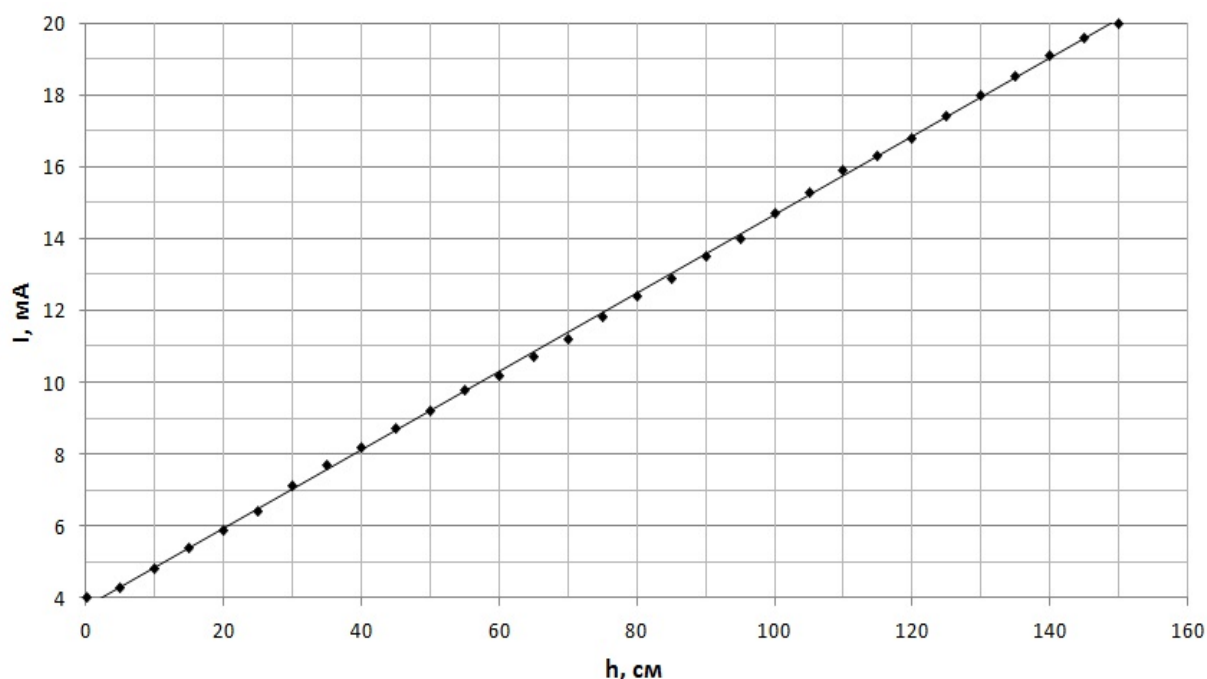


Рис.4. Калибровочная характеристика уровнемера с зондом 1,5 м в воде.

Результаты тестирования прибора с зондом 0,7м в нефтепродукте (бензине) приведены на рис.5. Прибор был настроен на измерение отраженного от поверхности нефтепродукта электромагнитного импульса. Как видим, наблюдается неизмеряемый участок длиной около 12см в нижней части зонда. Это свидетельствует о том, что для формирования отраженного сигнала в ди-

электрической среде с низкой диэлектрической проницаемостью необходим слой жидкости высотой не менее 12см.

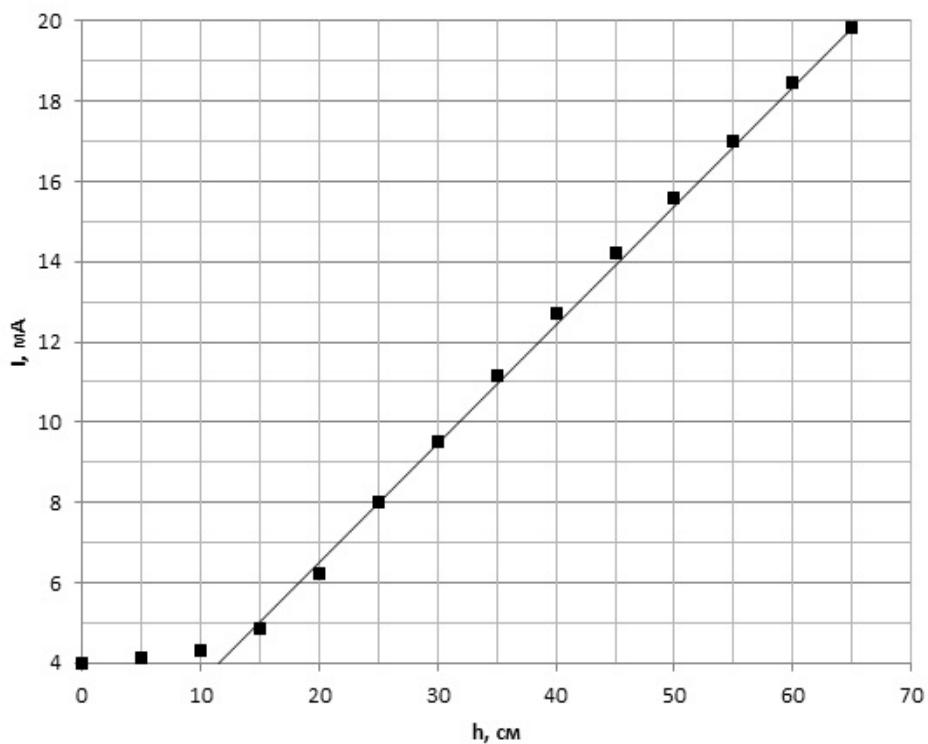


Рис.5. Зависимость выходного тока уровнемера с зондом длиной 0,7м от уровня бензина

Внешний вид микроволнового рефлекс-радарного уровнемера, изготовленного компанией ООО «АИС-НН», показан на рис.6.



Рис 6. Рефлекс-радарный микроволновый уровнемер типа СЖУ-1-МВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты исследований, позволившие разработать первый отечественный микроволновый рефлекс-радарный уровнемер. Прибор может применяться в различных областях промышленности и народного хозяйства, в частности, для контроля теплоносителя в энергоустановках, в установках химических производств, при нефтедобыче и переработке нефти.

Основные технические характеристики прибора СЖУ-1-МВ

Конструкция прибора совмещенная: датчик и электроника в едином блоке. Погружная часть цельносварная. Электрическая схема сигнализатора размещена во взрывозащищенном герметичном корпусе и содержит перепрограммируемый микропроцессор.

Параметры контролируемой жидкости:

- температура от -196 до +300 °С;
- давление до 6,0 МПа;
- вязкость до 10 Пас;

Напряжение питания 24В постоянного тока;

Потребляемый ток - не более 40мА;

Выходной сигнал: токовый 4 - 20мА;

Степень защиты корпуса - IP67;

Длина зонда – до 6м;

Диапазон температуры окружающего воздуха от - 40 С до + 75 °С;

Серийное производство осуществляется компанией «Акустические Измерительные Системы – НН», www.ais-nn.ru .

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронцов А.С., Фролов П.А. Импульсные измерения коаксиальных кабелей связи.- М.: Радио и связь, 1985, 96с.

2. Тарасов Н.А. Использование метода импульсной рефлектометрии для определения повреждений кабельных линий./Электронный ресурс «СТЭЛЛ».
- <http://reis.narod.ru/metod.htm>. Режим доступа - свободный.

3. Патент США 5726578 A Apparatus and methods for time domain reflectometry. Опубл. 10 марта 1998.

4. Инструкции по установке и эксплуатации уровнемера BM100 фирмы KROHNE, 37стр. www.ste.ru/krohne/pdf/rus/russ_op_manualBM100.pdf

Сведения об авторах:

Мельников Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры "Ядерные реакторы и энергетические установки" Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.

Тел. 8-(831) 432-03-23, моб. 8-902-780-49-92, melnikov@nntu.ru,

www.aisnn.com

Иванов Вадим Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры "Ядерные реакторы и энергетические установки" Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.

Тел. 8-(831) 432-03-23, моб. 8-920-299-88-43, ivv@nntu.ru

Тепляшин Иван Алексеевич, аспирант кафедры "Ядерные реакторы и энергетические установки" Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, моб. 8-904-044-18-94, ivantia@mail.ru

Тимонин Михаил Александрович, студент 4-го курса института ядерной энергетики и технической физики (ИЯЭТФ) Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, моб. 8-930-070-53-79

Development and investigation of microwave reflex-radar level gauge of liquid

V.I. Melnikov, V.V. Ivanov, I.A. Tepljashin, M.A. Timonin

The design of microwave reflex-radar level gauge of liquid both low and high dielectric constant was proposed. That has been shown that the decrease of the amplitude of the reflected signal and accordingly the ratio of useful signal to noise determine for liquid with low dielectric constant (oil) allowance must be made for level control. The proposed scheme signal processing provides stable operation of the device in medium with a relative dielectric constant higher than 2.0. The device can be used for level control of any process liquids in various industries.

Key words: microwave pulses, reflex-radar level gauge, petroleum products.

Mel'nikov Vladimir Ivanovich, professor of department "nuclear reactors and power plants" of State Technical University n.a. R.E. Alekseev, prof., dokt. tekhn. sci., e-mail: melnikov@nntu.nnov.ru, www.aisnn.com;

Ivanov Vadim Vladimirovich, docent of department "nuclear reactors and power plants" of State Technical University n.a. R.E. Alekseev, cand. tekhn. sci., e-mail: ivv@nntu.nnov.ru ;

Tepljashin Ivan Alekseevich, postgraduate of department of "nuclear reactors and power plants" of State Technical University n.a. R.E. Alekseev, e-mail: ivantia@mail.ru ;

Timonin Michael Alexandrovich, student of institute nuclear energy and technical physic of State Technical University n.a. R.E. Alekseev