

УДК 681.518.2

МЕТОДИЧНА ПОХИБКА РАДАРНИХ РІВНЕМІРІВ ПРИ ВИМІРЮВАННІ РІВНЯ СТРУМОПРОВІДНИХ РІДИН

Д.т.н. В. Д. Сахацький¹, д.т.н. М.В. Замірець²

1. Харківський національний автомобільно-дорожній університет

2. Державне підприємство Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування, м.Харків

В статті за допомогою методу еквівалентного дзеркального відбиття знайдено методичну похибку при вимірюванні рівня різноманітних струмопровідних рідин у резервуарах радарним методом.

В статье с помощью метода эквивалентных зеркальных изображений определена методическая погрешность при измерении уровня различных токопроводящих жидкостей в резервуарах радарным методом.

In the article by means of method of equivalent mirror images a methodical error is certain at measuring of level of different current-carrying liquids in reservoirs a radar method.

Ключові слова: струмопровідна рідина, рівень рідини, методична похибка, радар, час затримки, відбиття, випромінювання.

Постановка проблеми

Вимірювання рівня рідини як технологічного параметру відіграє важливу роль у багатьох технологічних процесах у різноманітних галузях промисловості. Цій параметр використовується для керування виробничим процесом, для визначення у резервуарах маси рідини та інш. Вимірювання рівня відбувається як у відкритих, так і в закритих резервуарах, що знаходяться під тиском [1]. У промисловості застосовується багато методів контролю рівня рідини: буйковий, візуальний, гідростатичний, поплавковий, електричний, радіохвильовий, магнітострикційний, ультразвуковий та інш. [1].

Перспективним методом вимірювання рівня рідини є радіохвильовий метод, різновидом якого є радарний метод. Радарні рівнеміри мають широкий діапазон вимірювання (до 50 м), малу похибку вимірювання (до $\pm 0,15\%$). Результат вимірювання не залежить від виду матеріалу, тиску, температури. Радарні рівнеміри можуть працювати в агресивному середовищі [1].

Завдяки цьому радарні рівнеміри широко застосовуються на практиці. Робочий частотний діапазон радарних рівнемірів лежить від одиниць до декілька десятків ГГц.

Разом з тим існуючі радарні методи визначення рівня рідини не враховують деякі особливості відбиття радіохвиль від струмопровідних середовищ, що викликає появу методичної похибки виміру рівня рідини для таких середовищ.

Тому підвищення достовірності вимірювання рівня струмопровідних рідин радарним методом є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У зв'язку з тим, що радарні методи мають багатофункціональне призначення, то розробкою радарних вимірювальних систем різноманітного

призначення займаються відомі фірми провідних світових держав.

Наприклад, радарний датчик Rosemount серії 5600, дозволяє вимірювати рівень таких середовищ, як нафтопродукти, суспензії, розчинники, водні розчини, цемент, молоко дисперсні порошкові матеріали [2].

Фірма Honeywell виробляє радар типу 976 Smart Radar, котрий працює в діапазоні 50-30000 мм та має похибку вимірювання ± 3 мм.

Фірма Endress+Hauser (Швейцарія) виробляє радар типу Levelflex MF MP45, котрий вимірює під тиском до 400 бар рівень рідини в діапазоні 50- 35000 мм, з похибкою ± 3 мм.

Робота радарних рівнемірів ґрунтується на явищі відбиття електромагнітних хвиль від кордону розділу середовищ, що розрізняються електричними і магнітними властивостями. [3, 4]. Вони використовують метод вимірювання часу проходження радіосигналом подвійної відстані від випромінювача до поверхні рідини.

Знаючи час проходження та висоту резервуару, визначається рівень рідини за формулою:

$$L = H - 0,5c_g t,$$

де L – рівень рідини;

H – висота резервуару;

t – час, проходження радіосигналу подвійної відстані від антени рівнеміра до поверхні рідини;

c_g – швидкість світла у середовищі над поверхнею рідини.

Особливістю метода визначення рівня рідини усіх радарних рівнемірів являється те, що поверхню відбиття приймають за поверхню рідини і рівень рідини визначається по визначенні часу розповсюдження сигналу від антени до поверхні рідини. Це цілком вірно для діелектричних середовищ та потребує уточнення для струмопровідних середовищ. Наукові роботи, які були присвячені питанням відбиття радіохвиль від середовищ, що проводять струм, показали, що для таких середовищ існує ефективна поверхня відбиття, яка не співпадає з реальною поверхнею рідини [5]. Тому результат вимірювання такої рідини за допомогою радарів матиме методичну похибку, яка на сьогодні мало вивчена.

Мета роботи

Метою роботи є підвищення достовірності вимірювання та контролю рівня струмопровідних рідин за допомогою вивчення та визначення впливу електричної провідності рідини на методичну похибку вимірювання її рівня.

Основна частина роботи

Для визначення методичної похибки при вимірюванні рівня струмопровідних рідин приймемо до уваги наступне.

Відносна діелектрична проникність середовища, яка має електричну провідність визначається за формулою [6]:

$$\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon_r + j60\sigma\lambda), \quad (1)$$

де ε_0 – абсолютна діелектрична проникність вільного простору, Ф/м;

ε_r – відносна діелектрична проникність рідини;

σ – електропровідність рідини, См/м;

λ – довжина хвилі, м.

Для вирішення задачі, яка поставлена, виберемо три відомі рідини, які добре проводять струм – водень йодид (HI), для якого $\sigma = 10630$ См/м, $\varepsilon_r = 2,9$; азотна кислота (HNO_3), для якої $\sigma = 1,5$ См/м, $\varepsilon_r = 1,77$ та натрій хлорид (NaCl), для якого $\sigma = 3,4$ См/м, $\varepsilon_r = 6,3$ [7].

Середовища, які по властивостям, наближаються до ідеального провідника, задовольняють умові:

$$60\sigma\lambda \gg \varepsilon_r, \quad (2)$$

Знайдемо довжину хвиль, коли обрані рідини можна характеризувати не як діелектрики, а як провідники. Підставивши значення електрофізичних параметрів для кожної рідини за формулою (2), отримаємо: мнима частина діелектричної проникності речовин у тричі перевищує її реальну частину для натрію хлориду (NaCl) при $\lambda > 9$ см, для азотної кислоти (HNO_3) при $\lambda > 5$ см, а для водню йодиду (HI) умова (2) виконується на всій області значень $\lambda > 10^{-4}$ см. Таким чином ці речовини для робочого діапазону частот радарних рівнемірів не є діелектриками, оскільки в них з'являються нові властивості, які пов'язані з явищем поглинання та частотної дисперсії електромагнітного випромінювання.

Визначимо метод розрахунку швидкості розповсюдження радіоімпульсних сигналів в середовищах, які проводять струм.

Особливості розповсюдження імпульсного сигналу в однорідному середовищі з поглинанням та дисперсією може бути досліджено за допомогою аналізу інтеграла Фур'є [8]:

$$E(z,t) = \int_{-\infty}^{+\infty} A_0(\omega) \exp\left\{\frac{\omega}{c} x(\omega) z\right\} \exp\left\{i\left(\omega t - \frac{\omega}{c} n(\omega)\right)\right\} d\omega, \quad (3)$$

де $A_0(\omega)$ – спектр початкового імпульсу;

$n(\omega)$ та $x(\omega)$ – показники заломлення і поглинання середовища.

В роботі [8] досліджувалось розповсюдження імпульсного сигналу з несучою частотою ω_0 , гаусовою огинаючою та частотою максимуму амплітудного спектра $\omega_{\text{макс}}$.

В результаті проведених розрахунків отримано наступні результати. Значення швидкості сигналу, яке отримано за допомогою численних розрахунків інтеграла Фур'є, практично співпадають з класичним виразом для групової швидкості:

$$v = c \frac{d\omega}{d\omega n} \Big|_{\omega=\omega_0}, \quad (4)$$

яке вірно для невеликих значень z , коли імпульсний сигнал має мале спотворення.

При великих значеннях z , коли сигнал значно спотворюється, слід говорити про швидкість сигналу, визначаючи її як швидкість розповсюдження максимуму імпульсу.

При розповсюдженні імпульсного сигналу на проміжку z максимум спектральної щільності імпульсу буде приходиться не на ω_0 (як у середовищі без обліку абсорбції), а на $\omega_{\text{макс}}$. Тому і швидкість розповсюдження максимуму огинаючої буде характеризуватися виразом (4) не при ω_0 , а при $\omega_{\text{макс}}$.

В роботі [9] також досліджено поширення височастотного збурення в поглинаючих і активних середовищах. Встановлено, що групову швидкість розповсюдження радіоімпульсу на частоті ω можна виразити у вигляді похідної комплексного хвильового числа наступним чином

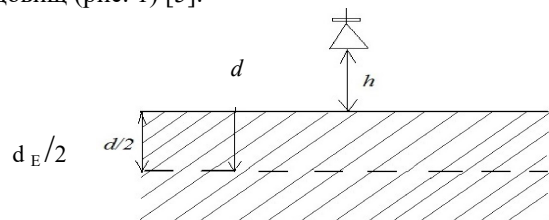
$$V = 1/h'(\omega) \quad (5)$$

Таким чином, при відомому комплексному хвильовому числу $h(\omega)$ та максимальній частоті спектру вимірювального сигналу з урахуванням формули (5) та результатів роботи [8] можна оцінити швидкість розповсюдження сигналів в струмопровідному середовищі без використання інтеграла Фур'є.

Визначимо причину виникнення методичної похибки при вимірюванні рівня струмопровідної рідини.

У більшості вимірювальних систем необхідна інформація зберігається в поточному значенні деякого сигнального параметра (наприклад, амплітуди, частоти, початкової фази, часу відставання та інш.) Для її вилучення спостерігач повинен вимірювати або оцінити відповідний параметр. У нашому випадку цим параметром є час відставання.

Згідно методу еквівалентного дзеркального відбиття середовища з кінцевою провідністю еквівалентно замінюється плоскою поверхнею з ідеальною провідністю, яка опущена на деяку комплексну глибину $d_E/2$ щодо початкової межі розділу середовищ (рис. 1) [5].



— реальна поверхня рідини; --- – положення еквівалентної відбиваючої поверхні; h – відстань від передатчика до поверхні рідини; $d_E/2$ – глибина зсуву відбиваючої поверхні

Рис.1. Схема розташування дійсної та еквівалентної поверхні відбиття

Тобто відстань від приймально-передавальної антени до поверхні, яка відбиває радіоімпульс становить не h , а d . Тому час прийому імпульсу, який відбито, збільшується (затримується) на час проходження імпульсу по двійній відстані $d_E/2$.

Відповідно [5] комплексну глибину $d_E/2$ можна визначити з рівняння

$$d_E = \frac{-j\lambda}{\pi\sqrt{(\varepsilon_r - 1) - j60\sigma\lambda}}, \quad (6)$$

де ε_r – діелектрична проникність;
 σ – проникність рідин, См/м;
 λ – довжина хвилі, м.

Залежність модуля відстані до поверхні, що відбиває ($|d_E/2|$) від довжини хвилі радарного рівнеміра для кожної рідини HI, NaCl та HNO₃ наведено на рис. 2–4.

Отже, за приведеними графіками бачимо, що відстань до поверхні, що відбиває, та дійсною поверхнею рідини збільшується при збільшенні довжини хвилі λ . Тому частоту радарних рівнемірів для контролю струмпровідних рідин треба підвищувати.

Оскільки відстань до поверхні, яка відбиває радіосигнал, оцінюють за часом проходження сигналу від передавача до приймача, то необхідно визначити додатковий час проходження сигналу в товщі рідини, розташованої над еквівалентно-відбиваючою поверхнею. Цей час (вірніше час затримки сигналу) і обумовлює виникнення методичної похибки вимірювання рівня електропровідної рідини.

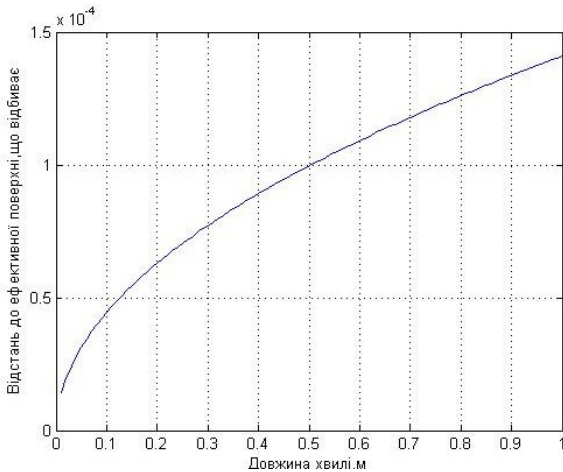


Рис. 2. Абсолютне значення відстані до поверхні, що відбиває для рідини (HI) в залежності від довжини хвилі

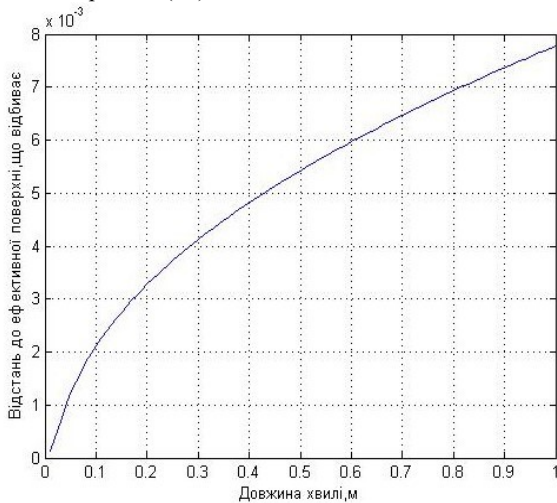


Рис. 3. Абсолютне значення відстані до поверхні, що відбиває для рідини (NaCl) в залежності від довжини хвилі

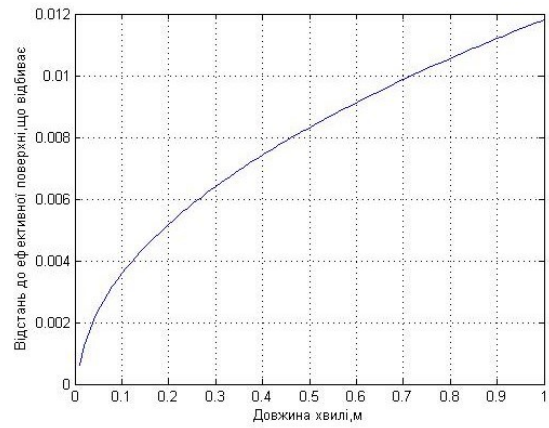


Рис. 4. Абсолютне значення відстані до поверхні, що відбиває для рідини (HNO₃) в залежності від довжини хвилі

Якщо швидкість переміщення максимуму амплітуди радіоімпульсу в товщі рідини дорівнює V_{cp} , то час затримки відбитого від рідини випромінювання дорівнює:

$$\Delta t = \frac{d_E}{V_{cp}}, \quad (7)$$

де d_E – шлях проходження сигналу в рідині у процесі його відбиття.

Оскільки Δt є комплексна величина, то подальше використовується тільки її реальна частина $Re\Delta t$.

Для того, щоб знайти швидкість переміщення максимуму амплітуди радіоімпульсу необхідно скористатися формулою (5) при частоті $\omega = \omega_{max}$.

Припустимо, що радіосигнал, який зондує, має гаусову огинаючу (рис.5), яка описується функцією [10]

$$F(t) = Ae^{-(\alpha t)^2},$$

де $\alpha = \frac{2\sqrt{\ln n}}{\tau_i}$,

τ_i – тривалість імпульсу на рівні A/n .

При $n = 2^{1/2}$ $\alpha = 1,2 / \tau_i$; при $n = 2$ $\alpha = 1,7 / \tau_i$;

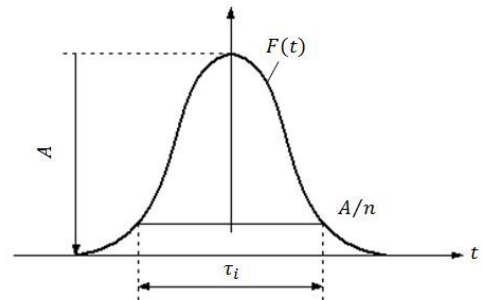


Рис. 5. Зображення огинаючої радіоімпульсу

Спектр радіоімпульсу з такою огинаючою визначається виразом [10]:

$$F(j\omega) = (A/2\alpha)\sqrt{\pi}e^{-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{2\alpha^2}}, \quad (8)$$

де ω_0 – несуча частота.

Візьмемо тривалість імпульсу, яка визначена на рівні 0,707A, $\tau_i = 10$ мкс. Тоді з урахуванням того, що ширина спектру радіосигналу визначається на рівні одної десятої від максимальної амплітуди його спектральної складової, знайдемо, за допомогою наведених формул,

максимальну частоту ω_{\max} амплітудного спектру сигналу. Отримуємо, що для несучої частоти 5 ГГц $f_{\max} = 5,07$ ГГц; для несучої частоти 10 ГГц $f_{\max} = 10,07$ ГГц; для несучої частоти 25 ГГц $f_{\max} = 25,07$ ГГц.

Зазначимо постійну розповсюдження хвилі у рідині як γ та припустимо, що при розповсюдженні хвилі в товщі рідини хвиля повністю поглинається. Тоді рідину можна представити як напівнескінченне середовище. У цьому випадку відповідно [11] постійна розповсюдження для заданої довжини хвилі залежить тільки від діелектричної проникності ϵ_r та електропровідності σ рідини і має вигляд:

$$\gamma = \frac{2\pi\sqrt{\epsilon_r - j60\sigma\lambda}}{\lambda} \quad (9)$$

Похідна по частоті від постійної розповсюдження γ , яка використовується для визначення швидкості розповсюдження радіоімпульсу в рідині, має вигляд:

$$\gamma' = \frac{1}{300} \left[\frac{1(2\omega\epsilon_r - j36000\pi\sigma)}{2\sqrt{\epsilon_r\omega^2 - j36000\pi\omega}} \right], \quad (10)$$

де $\omega = 2\pi f$ – циклічна частота, для якої частота f визначається в мегагерцах.

При знаходженні відстані до поверхні рідини обчислювальна система радару враховує не повний шлях проходження радіосигналу від моменту його випромінювання до моменту його прийому, а тільки половину цього шляху, тоді неврахована товщина шару рідини (методична похибка вимірювання), яка розташована над еквівалентною поверхнею відбиття, визначається наступним чином:

$$h = Re\Delta t \cdot c / 2,$$

де c – швидкість світла.

Таблиця 1.

Результати розрахунку часу затримки та неврахованої товщини шару струмопровідної рідини

Рідина	HI		
Частота випромінювання радару, ГГц	5	10	25
Час затримки ReΔt, с	4,16.10-13	4,16.10-13	4,158.10-13
Неврахована товщина шару h, м	0,624.10-4	0,624.10-4	0,624.10-4
Рідина	NaCl		
Частота випромінювання радару, ГГц	5	10	25
Час затримки ReΔt, с	4,5.10-11	4,55.10-11	4,57.10-11
Неврахована товщина шару h, м	0,00675	0,007	0,00710
Рідина	HNO3		
Частота випромінювання радару, ГГц	5	10	25
Час затримки ReΔt, с	2,252.10-11	2,254.10-11	2,255.10-11
Неврахована товщина шару h, м	3,275.10-3	3,280.10-3	3,285.10-3

Так як рівнеміри рівня рідини у своїй більшості працюють у частотному діапазоні від 5 ГГц до 25 ГГц, то визначимо час затримки $Re\Delta t$ та невраховану товщину шару рідини h (похибку вимірювання) для деяких частот цього діапазону. Результати розрахунку по наведеним вище формулам надано в табл.1.

Висновки

Аналіз отриманих результатів дослідження показав, що зі зростанням електропровідності рідини та робочої частоти радару її еквівалентна поверхня відбиття наближається до її дійсної поверхні і методична похибка визначення рівня рідини зменшується.

Швидкість розповсюдження радіосигналу, час його затримки в товщі рідини та відповідно похибка вимірювання залежать від співвідношення між реальною та мнимою частинами комплексної діелектричної проникності рідини.

Для обраних рідин методична похибка не перевищує 7,1мм, що вище похибки високочастотних радарів для виміру рівня діелектричних рідин, яка дорівнює ± 1 мм. Ця похибка є систематичною і тому повинна враховуватись як складова до інших похибок рівнеміра, що забезпечить більшу достовірність результатів вимірювання.

Вплив струмопровідного середовища на перекручення сигналу, який зондує, та визначення можливих похибок вимірювання при цьому є метою подальших розробок.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Назаров В. Є. Аналіз сучасного стану методів і засобів вимірювального контролю рівня рідинних середовищ :навч. посіб. Сєвєродонецьк : НУ ім. В. Даля, 2016. -114 с.
2. Компания Emerson Process Management и Промышленной группы «Метран». Уровнемеры. Москва, 2011. № 16. – С. 206. – URL[Электронный ресурс].Режим доступа :<https://www.emerson.com/documents/automation/уровнемеры-каталог-ru61704.pdf>
3. Жданкин В. К. Приборы для измерения уровня: учеб. пособ. – М.: СТА-ПРЕСС, 2002. -19 с.
4. Фарзани Н. Г. Технологические измерения и приборы :навч. посіб. / за ред. Н. Г. Фарзани., Л. В. Илясова. –М. : Высш. школа, 1989. -456 с.
5. Vanister P. R.The Image Theory Electromagnetic Fields of a Horizontal Electric Dipole in the Presense of a conducting half Spase. RadioScience,1982. Vol.17. № 5. P. 1095-1102
6. Леонтьев В. О. Електротехнічні матеріали :навч. посіб. / за ред. В. О. Леонтьєва, С. В. Бєвза, В. А. Видмиша. Вінниця : ВНТУ, 2013. -122 с.
7. Никольский Б. П. Основные свойства неорганических и органических соединений. Справочник химика.-М.:Химия, 1971.- Т. 2.- С. 1169.
8. Тёрина Г. И. О распространении импульсных сигналов в средах с поглощением и дисперсией / Г.И.Тёрина //Радиотехника и электроника.- 1971. -№ 9.-С. 611- 613.
9. Биргер Е.С.О распространении высокочастотных возмущений в поглощающих и активных средах/Е.С Биргер., Л. А. Вайнштейн //Техническая физика.-1973.- № 11.-с. 2217- 2228
10. Гринберг Е.Г. Спектральный метод анализа воздействия сигналов на нелинейные электрические цепи. Лекции/Е.Г. Гринберг. - Харьков: Из-во АРТА им. Говорова А.А., 1962.-113с
11. Марков Г. Т. Электродинамика и распространение радиоволн /Г. Т. Марков, Б. М. Петров, Г. П. Грудинская. – Москва: Советское радио, 1979. – 376 с