

УДК 621.317.7

Р.А. Андросюк, аспір.

Ю.Л. Денісюк, інж.

Житомирський інженерно-технологічний інститут

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ПРЯМОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ РОЗЧИНІВ

(Представлено д.т.н. В.П. Мапоїловим)

Запропоновано метод прямого перетворення застосувати для вимірювання концентрації розчинів.

Визначення змісту та концентрації речовини широко використовується для контролю багатьох технологічних процесів. При цьому існує велика різноманітність методів, що використовуються для цієї мети. На використанні ефекту прошикнення електромагнітного поля у розчин та, як наслідок, виникнення затухання (поява активного та реактивного внесеного опору), за рахунок поляризації середовища та виникнення вихрових струмів, засновані різноманітні високочастотні безконтактні методи. Серед них пайбільше поширення отримали резонансні та мостові, що мають свої недоліки [5]. Наприклад, резонансні методи мають:

1. Малу чутливість в області резонансу.
2. Вузкий робочий діапазон внаслідок того, що останній знаходиться на схилі резонансної характеристики, ширина якої тим вужче, чим вище добротність.
3. Нелінійність перетворення, внаслідок чого для обробки результатів необхідно використовувати апроксимуючі функції перетворення, що значно ускладнює задачу.

Мостові методи отримали широке визнання завдяки високій точності вимірювань, однак вони є достатньо громіздкими та складними.

Всіх цих недоліків позбавлений метод прямого перетворення, який має високу точність, широкий діапазон вимірювань та просту реалізацію. Зупинимося стисло на фізичних принципах, що покладені в основу методу.

Як відомо, про концентрацію речовини судять з таких залежностей:

$$Y = f_1(C_p); \quad G_p = f_2(C_p); \quad B_p = f_3(C_p), \quad (1)$$

де  $Y$  – повна провідність первинного вимірювального перетворювача (ПВП);

$G_p$  – активна провідність ПВП;

$B_p$  – реактивна провідність ПВП;

$C_p$  – концентрація розчину, %.

При цьому залежності  $G_p$  та  $B_p$  для електролітів (у нашому випадку NaCl) мають вигляд (рис. 1):

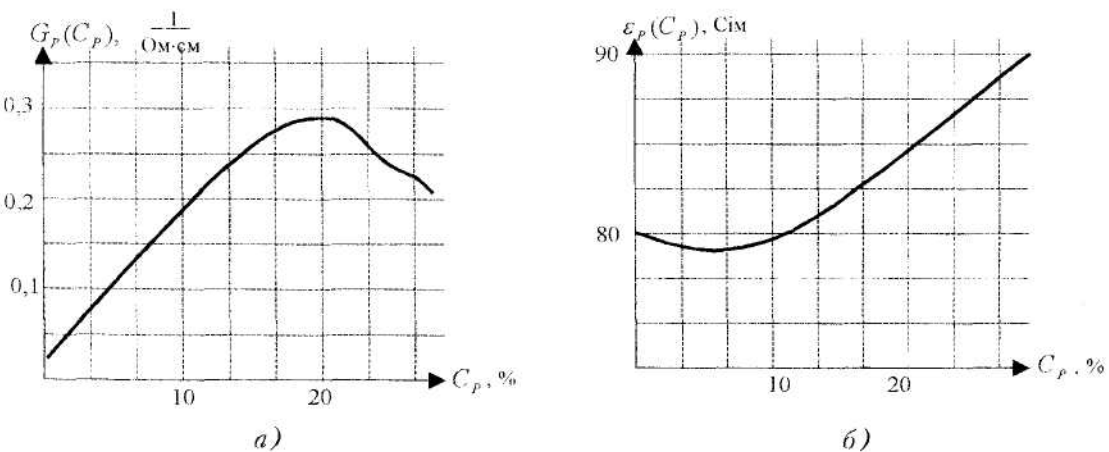


Рис. 1. Залежність активної (а) та реактивної (б) складових комплексного опору електролітичних рідин від концентрації

Як видно з графіків, при малих концентраціях лінійну залежність має  $C_p(C_p)$ , а в області великих –  $\varepsilon_p(C_p)$ . Тому, краще всього, судити про концентрацію, використовуючи комбінований метод, вимірюючи зі зростанням концентрації спочатку активну, а потім реактивну складові ПВП. Завдяки методу прямого перетворення можна відокремити активну та реактивну складові опору ПВП.

Вимірювання показали, що для малих концентрацій електролітів (до 0.1 моль/л) діелектрична проникливість розчинів змінюється за нелінійним законом, але з подальшим зростанням концентрації вона має лінійну залежність.

Використання методу прямого перетворення для вимірювання концентрації електролітичних рідин дозволяє порівняно простими схемотехнічними засобами з високою точністю розв'язати задачу, що ставиться. Сутність методу полягає у прямому перетворенні кожної складової комплексного опору у постійну напругу, що подається потім на вимірювальний пристрій. Використання операційних підсилювачів (ОП) дозволяє значно зменшити багатьох зі складових систематичної похибки приладу. Структурна схема приладу зображена на рис. 2.

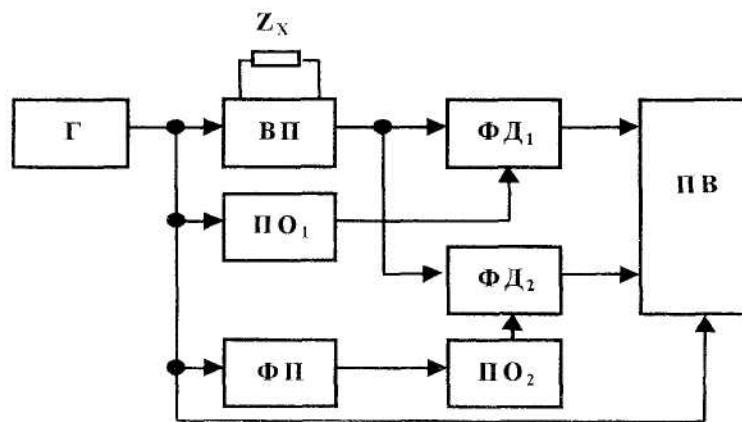


Рис. 2. Структурна схема приладу

Синусоїдальний сигнал з генератора (Г) поступає на вхідний перетворювач (ВП), підсилювач-обмежувач (ПО<sub>1</sub>), фазовертач (ФП) та пристрій вимірювання (ПВ). Вихідна напруга з ВП подається на входи фазочутливих детекторів ФД<sub>1</sub> та ФД<sub>2</sub>. Опорний сигнал на ФД<sub>1</sub> поступає з виходу ПО<sub>1</sub>. Сигнал з генератора Г, пройшовши ФП та ПО<sub>2</sub>, поступає в якості опорного на ФД<sub>2</sub>. Фазовертач ФП зсуває фазу опорного сигналу на 90°. Таким чином, на виході ФД<sub>1</sub> маємо сигнал, пропорційний активній складовій вимірювального параметра, на виході ФД<sub>2</sub> – сигнал, пропорційний реактивній складовій. Оцінка обох складових одночасно в приладі дозволяє автоматизувати процес та підвищити точність вимірювання.

Для прямого перетворення кожної складової комплексного опору у пропорційну напругу служить ВП, що виконаний на ОП та зразкових резисторах. Схема ВП зображена на рис. 3.

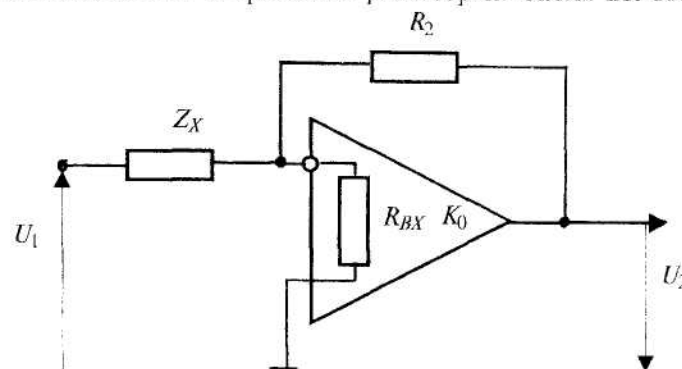


Рис. 3. Схема вхідного перетворювача

Як відомо, для ОП з кінцевим власним коефіцієнтом підсилення  $K_0$  та  $R_{BX}$  [1] маємо:

$$K_{HP} = - \frac{R_2 / Z_X}{1 + \frac{1}{K_0} \left( \frac{R_2}{Z_X} + \frac{R_2}{R_{BX}} + 1 \right)}, \quad (2)$$

де  $K_{HP}$  – коефіцієнт перетворення,

$K_0$  – власний коефіцієнт підсилення ОП;

$R_{BX}$  – вхідний опір ОП.

Скористувавшись (1), отримаємо вираз для відносної похибки вимірювання:

$$\gamma = \frac{\Delta K_{HP}}{K_{HP}};$$

$$\gamma = 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{K_0} \left( \frac{R_2}{Z_X} + \frac{R_2}{R_{BX}} + 1 \right)}. \quad (3)$$

Задаючи похибку, що нас задовольняє,  $\gamma = 0,1 \%$  та розв'язавши рівняння (2) відносно  $K_0$  (враховуючи, що  $R_{BX}/R_2 = 10^4$ , тобто  $R_{BX} \gg R_2$  та  $R_2 \approx Z_X$ ), отримаємо:

$$K_0 \geq 1000 \left( \frac{R_2}{Z_X} + \frac{R_2}{R_{BX}} + 1 \right) = 2000. \quad (4)$$

Таким чином, власний коефіцієнт підсилення ОП (з розімкнутим ланцюгом зворотного зв'язку) на частоті перетворення має відповідати умові:

$$K_0 \geq 2000. \quad (5)$$

Похибка вимірювань, як бачимо, якщо  $K_0$  та  $R_{BX}$  є достатньо великими (що здійснюється вибором відповідної елементної бази), залежить від стабільності амплітуди та частоти напруги генератора  $U_1$ , а також від стабільності зразкового резистора  $R_2$  [2].

Розширити діапазон вимірювання, підвищити крутизпу перетворення ВП можна, якщо виконати його за диференційною схемою (ще одна перевага ОП). При цьому ВП буде реагувати на  $\Delta Z_X$  відносно зразкового  $Z_0$ . При рівності  $Z_X = Z_0$  сигнал на виході ВП буде дорівнювати нулю. Схема диференційного ВП зображена на рис. 4.

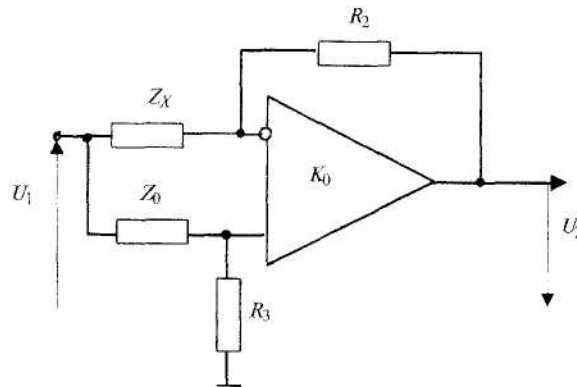


Рис. 4. Диференційний ВП

Коефіцієнт передачі по інвертуючому входу  $K_1$  такий:

$$K_1 = - \frac{R_2}{Z_X}. \quad (6)$$

Коефіцієнт передачі по неінвертуючому входу  $K_2$  дорівнює:

$$K_2 = \left( 1 + \frac{R_2}{Z_X} \right) \frac{R_3}{Z_0 + R_3}. \quad (7)$$

Умовою балансу ( $U_2 = 0$ ) є:

$$K_1 = -K_2 \tag{8}$$

Підставивши отримаємо:

$$\left(1 + \frac{R_2}{Z_X}\right) \frac{R_3}{Z_0 + R_3} = \frac{R_2}{Z_X} \tag{9}$$

Після нескладних перетворень отримаємо:

$$\frac{Z_X}{R_2} = \frac{Z_0}{R_3} \tag{10}$$

Якщо  $R_2 = R_3$ , то  $Z_X = Z_0$ .

В якості  $Z_0$  можна використовувати еквівалентну ємність та активну провідність датчика з дистильованою водою, тобто датчика з “нульовою” концентрацією речовини.

Застосування в ПВ АЦП двотактного інтегрування (рис. 5) дозволяє ввести температурну компенсацію, тобто знизити залежність  $\epsilon_X$  та  $G_X$  від температури. Розглянемо роботу ПВ детальніше.

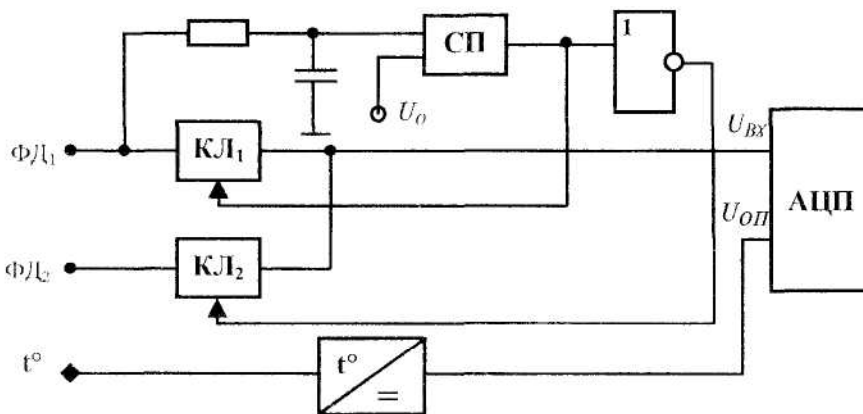


Рис. 5. Структурна схема ВП

Впродовж першого такту інтегрування фіксованої тривалості  $T_1$  відбувається інтегрування вхідної напруги  $U_{ВХ}$  за законом  $U_{ВХ}T_1/RC_1$ , де  $RC$  – постійна часу інтегратора. Впродовж другого такту  $T_2$  відбувається перезарядка інтегратора опорною напругою протилежної полярності  $U_{ОП}$  (рис. 5).

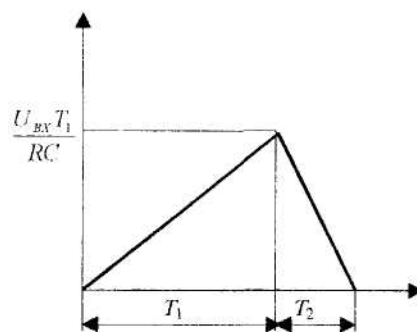


Рис. 6. Принцип двотактного інтегрування

При цьому напруга на виході інтегратора змінюється за законом:

$$U_{ВІХ} = \frac{U_{ВХ}T_1}{RC} - \frac{U_{ОП}T_2}{RC} \tag{11}$$

При досягненні  $U_{ВІХ} = 0$  спрацьовує логічний пристрій у АЦП, який припиняє процес інтегрування. Прирівнявши  $U_{ВІХ} = 0$ , отримаємо:

$$\frac{U_{ВХ} T_1}{RC} = \frac{U_{ОП} T_2}{RC}, \quad (12)$$

звідки

$$T_2 = \frac{U_{ВХ} T_1}{U_{ОП}}. \quad (13)$$

Заповнивши інтервал  $T_2$  рахуючими імпульсами (з відповідним масштабом), отримаємо результат вимірювання вхідної напруги. Як бачимо, він залежить також від  $U_{ОП}$ . Як встановлено експериментально, зростання температури на  $1^\circ\text{C}$  викликає зростання електропровідності на 2,3%. Примусивши  $U_{ОП}$  (за допомогою перетворювача  $t^0/U_x$ )

змінюватись при зміні температури за таким самим законом, можна компенсувати температурну похибку вимірювання. Сигнали з ФД<sub>1</sub> та ФД<sub>2</sub> на вхід АЦП подаються через ключі КЛ<sub>1</sub> та КЛ<sub>2</sub>, що керуються у протифазі схемою порівняння СП. На один вхід СП поступає сигнал з ФД<sub>1</sub> (активна складова  $G_x$ ), на другий – постійна напруга  $U_0$ , що визначає рівень сигналу з ФД<sub>1</sub>, при якому відбувається переключення режиму, тобто підключення до входу АЦП сигналу з ФД<sub>2</sub>. Таким чином, при малих значеннях концентрації АЦП вимірює активну складову  $G_x$ , при досягненні  $G_x$  рівня  $U_0$  відбувається автоматичне переключення ключів, і до входу АЦП підключається сигнал з ФД<sub>2</sub>, тобто вимірюється реактивна складова  $B_x$ . Фільтр нижніх частот, виконаний на елементах RC перетворює пульсуючий сигнал з ФД<sub>1</sub> у постійну напругу.

Використання методу прямого перетворення з диференціальним включенням ОП сумісно з методом двотактного інтегрування, в якому передбачається компенсація температурної похибки, та автоматичний перехід від вимірювання активної провідності до вимірювання реактивної (і навпаки) при вимірюванні концентрації розчинів дозволяють розширити діапазон вимірювань, підвищити точність та спростити процес вимірювання.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Отчет по прибору Ф4320. – Житомир: Електронизмеритель, 1974.
2. Жуков Ю.П., Кулаков М.В. Высокочастотная безэлектродная кондуктометрия. – М.: Энергия, 1968.
3. Сохац Э.Д. Электропроводность как метод определения солености морских вод. – М.: Океан, 1956.
4. Гаврилюк М.А., Соголовский Е.Г. Электронные измерители RLC. – Львов: Вища школа, 1978.
5. Ари Э.И. Автогенераторные измерения. – М.: Энергия, 1976.

Подано 17.12.1999.