

Винахід належить до області контролю електричного опору рідини і може бути використано для визначення домішок та включень у високоомних (неполярних та полярних) рідинах по змінам активної складової повного опору рідини.

Рідини легко забруднюються та важко очищаються. Тому на практиці застосовують технічно чисті рідини, які містять у собі у заданих межах домішки, як ті, що потрапляють зовні, так і ті, що створюються внаслідок процесу старіння. Технічні рідини характеризуються іонною та моліонною електропровідністю. Іонна електропровідність обумовлена дисоціацією молекул самої рідини (власна електропровідність) і домішок (домішкова електропровідність). Для неполярних рідин характерна домішкова електропровідність. Полярні відрізняються підвищеною питомою провідністю через наявність обох видів іонної електропровідності. Моліонна електропровідність обумовлена такими носіями, як заряджені колоїдні частинки (моліони) - колоїдна вода, смолисті речовини, мила та інше.

Домішки істотно впливають на електричні характеристики рідини і в першу чергу на її електричний опір. Чим менше домішок, тим вище електричний опір рідини, тому терміном "високоомна рідина", зокрема, "високоомна вода", характеризується висока ступінь очистки. Так, спеціальною фізичною та хімічною очистками можна довести питомий електричний опір неполярних рідин до 10^{16} - 10^{18} Ом·м, а полярних рідин (води) до 10^{14} - 10^{16} Ом·м.

Для вимірювання електричного опору рідини використовують трьох- та чотирьох- електродні датчики та високочутливі вимірювальні схеми з підсилювачами, які мають високий вхідний опір (см. Андреев В.С., Попечителев Б.П. Лабораторные приборы для исследования жидких сред - Л.: Машиностроение, 1981, - С.76-80).

Але застосування багато електродних датчиків, в яких перехідний опір та поляризації електродів компенсуються системою потенційного вимірювання, не вирішує проблеми підвищення точності пристроїв для вимірювання великих опорів.

При змінному струмі промислової частоти (50Гц) поляризація електродів не виключається, але помітно знижується порівняно з поляризацією при вимірюванні на постійному струмі. Підвищення частоти струму значно послаблює поляризацію електродів.

Відомий пристрій для вимірювання електричного опору рідини (см. Грилехес М.С., Филановский Б.К. Контактная кондуктометрия: Теория и практика метода. - Л.: Химия, 1980. - С.136-139), який містить в собі мостову вимірювальну схему, електродний датчик, який включено в одно з пліч мостової схеми, магазин резисторів, який включено в сусіднє плече мостової схеми, генератор підвищеної частоти, підключений до діагоналі живлення мостової схеми, підсилювач та індикатор, підключені до другої діагоналі мостової схеми.

Підвищена частота (1000Гц) живлення мостової схеми з датчиком послаблює поляризацію електродів датчика, але при цьому все більшу роль починають виконувати ємності та індуктивні складові повного опору датчика. При контролі високоомних рідин шунтуюча дія ємності значно скривлює результат вимірювання активного опору рідини. В наслідок цього виникає протиріччя між зниженням інтенсивності поляризаційних процесів за рахунок підвищення частоти живлення вимірювальної схеми та зниженням ємнісних струмів за допомогою зменшення частоти напруги живлення. В теперішній час це протиріччя не знайшло задовільне рішення, що стимулює пошук нових технічних рішень.

Відомий також пристрій для вимірювання електричного опору рідини по деклараційному патенту України №23298 А, кл. C01N27/04, 1996, Бюл.4, 1998, що містить коаксіальний проточний датчик, складений із внутрішнього та зовнішнього металевих циліндричних електродів, закріплених в датчику ізоляційними шайбами, генератор низької частоти, автоматичний перемикач, керуючий вхід якого з'єднано з виходом генератора низької частоти, і послідовно з'єднані підсилювач низької частоти, фазочутливий випрямляч, фільтр нижніх частот та вихідний вимірювач напруги, при цьому керуючий вхід фазочутливого випрямляча також підключено до виходу генератора низької частоти.

Крім того, відомий пристрій містить генератор регулюємої випробувальної частоти, послідовно з'єднаний широкополосний перетворювач "струм-напруга" та синхронний детектор, керуючий вхід якого з'єднаний з внутрішнім електродом коаксіального датчика, його зовнішній електрод з'єднано з входом перетворювача "струм-напруга", а вихід синхронного датчика з'єднаний з входом підсилювача низької частоти.

Завдяки синхронному детектору, який включено вказаним способом, вимірюється тільки активна складова повного опору коаксіального датчика в широкому діапазоні частот. Проте збільшенням опору рідини, яка протікає крізь коаксіальний датчик між зовнішнім та внутрішнім електродами, активна складова струму зменшується, що призводить до зменшення напруги на сигнальному вході синхронного детектора і кінець кінцем до зниження чутливості та точності вимірювання великих значень активного опору. При контролі активного опору високоомних рідин вхідний струм перетворювача "струм-напруга" стає одного порядку з власними шумами перетворювача, що не дозволяє достовірно визначати невеликі концентрації домішок або включень в рідину, яка контролюється. Крім того, вихідний сигнал синхронного детектора обернено пропорційно опору датчика, так як фактично вимірюється струм датчика. Тому шкала вихідного вимірювача напруги, яка градуирована в одиницях електричного опору, є нелінійною, що збільшує похибку вимірювання опору рідини.

В основу винаходу покладена задача створення такого пристрою для вимірювання електричного опору рідини, в якому завдяки введенню нових елементів та зв'язків є можливим одержання напруги, пропорційної активному опору при великих його значеннях незалежно від величини вхідного опору підсилювача та інших елементів вимірювальної схеми, що дозволило б розширити діапазон та підвищити точність вимірювання електричного опору високоомних рідин.

Поставлена задача вирішується тим, що в пристрій для вимірювання електричного опору рідини, який містить коаксіальний проточний датчик, складений з внутрішнього та зовнішнього металевих циліндричних електродів, закріплених у датчику ізоляційними шайбами, генератор низької частоти, автоматичний перемикач, керуючий вхід якого з'єднано з виходом генератора низької частоти, і послідовно з'єднані підсилювач низької частоти, фазочутливий випрямляч, фільтр нижніх частот та вихідний вимірювач напруги,

при цьому керуючий вхід фазочутливого випрямляча також підключено до виходу генератора низької частоти, згідно з винаходом в нього введено диференційний розщеплювач напруги на першому і другому операційних підсилювачах, інвертор на третьому операційному підсилювачі, суматор на четвертому операційному підсилювачі, полосовий підсилювач, квадратичний перетворювач та малоінерційний фільтр нижніх частот, при цьому входи диференційного розщеплювача напруги з'єднані з внутрішнім та зовнішнім електродами коаксіального проточного датчика, один з виходів диференційного розщеплювача напруги з'єднано з одним входом суматора, другий вихід з'єднано з входом інвертора, вхід та вихід котрого з'єднано з входами автоматичного перемикача, вихід якого з'єднаний з другим входом суматора, до виходу якого підключені послідовно з'єднані полосовий підсилювач, квадратичний перетворювач та малоінерційний фільтр нижніх частот, вихід якого через блок температурної компенсації з'єднаний з входом підсилювача низької частоти.

Поставлена задача вирішується також тим, що блок температурної компенсації включає терморезистор, розміщений на зовнішньому електроді коаксіального датчика, розподільний конденсатор та п'ятий операційний підсилювач, інвертуючий вхід якого через терморезистор та розподільний конденсатор з'єднано з входом блоку, вихід операційного підсилювача з'єднано з виходом блоку і через змінний резистор зі своїм інвертуючим входом, а його неінвертуючий вхід через постійний резистор заземлено.

Підключення диференційного розщеплювача напруги до внутрішнього та зовнішнього електродів коаксіального проточного датчика дозволяє розділити шумову напругу на дві корельовані шумові напруги, одна з яких періодично інвертується за допомогою автоматичного перемикача, керуемого напругою генератора низької частоти. Підсумовування однієї з розщеплених напруг датчика з другою розщепленою напругою, яка періодично інвертується, дозволяє дві корельовані шумові напруги перетворити в одну модульовану по амплітуді шумову напругу. Квадратичне перетворення шумової модульованої напруги та наступне її усереднення забезпечує виділення із неї змінної напруги низької частоти перемикачів, амплітуда якої пропорційна квадрату шумової напруги коаксіального датчика. Додаткове підсилення низькочастотної напруги операційним підсилювачем з негативним зворотним зв'язком, в ланцюг якої включено терморезистор, який знаходиться у тепловому контакті з корпусом коаксіального датчика, виключає вплив нестабільності температури рідини на квадрат шумової напруги. Наступне масштабне підсилення цієї напруги та її синхронне детектування дає постійну напругу, пропорційну тільки активному опору рідини, яка протікає крізь коаксіальний проточний датчик.

На кресленні подана функціональна схема пристрою для вимірювання електричного опору рідини.

Пристрій містить коаксіальний проточний датчик 1 з металевими внутрішнім електродом 2 і зовнішнім електродом 3 та ізоляційними шайбами 4 і 5, диференційний розщеплювач напруги 6 на першому і другому операційних підсилювачах 7 і 8, інвертор на третьому операційному підсилювачі 9, автоматичний перемикач 10, генератор 11 низької частоти, суматор 12 на четвертому операційному підсилювачі, полосовий підсилювач 13, квадратичний перетворювач 14, малоінерційний фільтр 15 нижніх частот, блок 16 температурної компенсації, підсилювач 17 низької частоти, фазочутливий випрямляч 18, фільтр 19 нижніх частот та вихідний вимірювач напруги 20.

Блок температурної компенсації 16 включає розподільний конденсатор 21, терморезистор 22, п'ятий операційний підсилювач 23, постійний 24 і змінний 25 резистори. Позицією 26 позначена рідина, яка досліджується в коаксіальному датчику 1.

В коаксіальному датчику 1 внутрішній 2 і зовнішній 3 металеві електроди, ізольовані друг від друга шайбами 4 і 5 та з'єднані з входами диференційного розщеплювача напруги 6, який виконай на операційних підсилювачах 7 і 8. До одного виходу диференційного розщеплювача підключено інвертор на операційному підсилювачі 9, вхід та вихід якого з'єднані з входами автоматичного перемикача 10, керуючим входом підключено до генератору 11 низької частоти. Вихід автоматичного перемикача з'єднано з одним входом суматора на операційному підсилювачі 12, другий вхід якого безпосередньо з'єднаний з другим виходом диференційного розщеплювача напруги 8. До виходу суматора підключені послідовно з'єднані полосовий підсилювач 13, квадратичний перетворювач 14, мало інерційний фільтр 15 нижніх частот і блок 16 температурної компенсації. До виходу блоку температурної компенсації підключені послідовно з'єднані підсилювач 17 низької частоти, фазочутливий випрямляч 18, фільтр 19 нижніх частот та вихідний вимірювач напруги 20. Керуючий вхід фазочутливого випрямляча 18 підключено також до генератора 11 низької частоти.

В блоці 16 температурної компенсації терморезистор 22 розміщений на зовнішньому електроді 3 коаксіального датчика 14 і знаходиться в тепловому контакті з рідиною 26, яка досліджується. Вихід малоінерційного фільтру 15 нижніх частот крізь розподільний конденсатор 21 і терморезистор 22 з'єднано з інвертуючим входом операційного підсилювача 23. Вихід цього підсилювача з'єднано з входом підсилювача 17 низької частоти і зі своїм інвертуючим входом через змінний резистор 25. Неінвертуючий вхід операційного підсилювача 23 заземлено крізь постійний резистор 24.

Пристрій для вимірювання електричного опору рідини діє наступним чином.

В рідині, яка досліджується і протікає крізь коаксіальний датчик 1, як і в будь-якому фізичному середовищі з активними електричними втратами, неминуче виникають електричні флуктуації носіїв електричних зарядів (іонів, електронів, молекул), створюючих тепловий шум. Середній квадрат шумової напруги згідно рівнянню Найквіста зв'язано з електричним опором і температурою середі співвідношенням:

$$\overline{U}_{ш}^2 = 4k\Delta f |Z_x| T_x, \quad (1)$$

де $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - стала Больцмана;

Δf - полоса частот, у якій здійснюється вимірювання шумової напруги;

$|Z_x|=R_x$ - дійсна складова повного опору рідини;

T_x - термодинамічна температура рідини по шкалі Кельвіна.

Шумова напруга з електродів 2 і 3 датчика поступає на диференційний розщеплювач 6, який виконай на двох операційних підсилювачах 7 і 8 і має відносно землі (корпуса) симетричні входи. Вихідні лінійні напруги диференційного розщеплювача є протифазними по відношенню до вхідної симетричної напруги. Якщо вхідну

шумову напругу $U_{шх}(t)$ подавати у комплексному вигляді $U_{шх}$, то протифазні напруги з урахуванням власних шумів вимірювальної схеми подамо як комплексні сумарні напруги:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{шх} + \dot{U}_{ш1}, \quad (2)$$

$$\dot{U}_2 = -\dot{U}_{шх} + \dot{U}_{ш2}, \quad (3)$$

де $\dot{U}_{ш1}$ і $\dot{U}_{ш2}$ - власні шуми каналів вимірювальної схеми, які приведені до входів диференційного розщеплювача 6.

Одна з вихідних напруг \dot{U}_1 розщеплювача інвертується за допомогою операційного підсилювача 9, виконаного по схемі інвертора напруги. Вихідна напруга інвертора

$$\dot{U}_3 = -\dot{U}_1 = -\dot{U}_{шх} - \dot{U}_{ш1}, \quad (4)$$

Вхідна напруга інвертора \dot{U}_1 та його вихідна напруга \dot{U}_3 надходять на входи автоматичного перемикача 10, який керується змінною напругою низької частоти F генератора 11. Пакети шумових напруг \dot{U}_1 і \dot{U}_3 тривалістю Δt в полуперіод комутації ($\Delta t = 1/2F$) надходять на один вхід суматора 12, виконаного також на операційному підсилювачі. На другий вхід цього суматора безперервно надходить шумова напруга \dot{U}_2 з виходу операційного підсилювача 8 диференційного розщеплювача 6.

Внаслідок підсумовування напруг \dot{U}_1 і \dot{U}_2 при одному положенні автоматичного перемикача 10 утворюється сумарна шумова напруга типу

$$\dot{U}_4 = k(\dot{U}_{ш1} + \dot{U}_{ш2}), \quad (5)$$

а при підсумовуванні напруг \dot{U}_2 і \dot{U}_3 при іншому положенні перемикача шумова напруга

$$\dot{U}_5 = k_1(-2\dot{U}_{шх} + \dot{U}_{ш2} - \dot{U}_{ш1}), \quad (6)$$

де k_1 - масштабний коефіцієнт суматора 12.

Пакети сумарних напруг (5) і (6) почергово підсилюються полосовим підсилювачем 13, полосу частот Δf якого обирають із умови виділення теплових шумів із спільної шумової напруги, в якій присутні, зокрема, низькочастотні шуми, не викликані тепловими флуктуаціями зарядів у рідині. Підсилені напруги за допомогою квадратичного перетворювача 14 почергово зводяться у квадрат:

$$\dot{U}_6 = S[k_1 k_2 (\dot{U}_{ш1} + \dot{U}_{ш2})]^2, \quad (7)$$

$$\dot{U}_7 = S[k_1 k_2 (-2\dot{U}_{шх} + \dot{U}_{ш2} - \dot{U}_{ш1})]^2, \quad (8)$$

де k_2 - коефіцієнт підсилення полосового підсилювача 13;

S - крутизна квадратичного перетворювача 14.

Пакети квадратованих напруг (7) і (8) усереднюються малоінерційним фільтром 15 нижніх частот, частота зрізу якого обирається меншою за частоту комутації F . При оцінюванні усереднених значень квадратованих напруг слід урахувати, що власні шуми підсилювачів вимірювальної схеми між собою не

корельовані ($\overline{\dot{U}_{ш1} \dot{U}_{ш2}} = 0$). Аналогічно шумова напруга датчика не корельовано з шумами підсилювачів

вимірювальної схеми ($\overline{\dot{U}_{шх} \dot{U}_{ш2}} = 0$). Тому вихідні напруги фільтра 15 нижніх частот будуть мати вигляд:

$$\bar{U}_6 = S k_1^2 k_2^2 (\bar{U}_{ш1}^2 + \bar{U}_{ш2}^2), \quad (9)$$

$$\bar{U}_7 = S k_1^2 k_2^2 (4\bar{U}_{шх}^2 + \bar{U}_{ш1}^2 + \bar{U}_{ш2}^2), \quad (10)$$

З послідовності пакетів напруг (9) і (10) розподільним конденсатором 21 блоку 16 температурної компенсації виділяється змінна складова напруги низької частоти F :

$$U_8(t) = ((\bar{U}_6 - \bar{U}_7)/2) \text{signsin} 2\pi F t, \quad (11)$$

де $\text{signsin} 2\pi F t$ - функція, відображаюча прямокутну форму огинаючої послідовності пакетів напруг (9) і (10).

Підставляючи у вираз (11) значення напруг (9) і (10), одержуємо

$$U_8(t) = 2S k_1^2 k_2^2 \bar{U}_{шх}^2 \text{signsin} 2\pi F t \quad (12)$$

Змінна напруга $U_8(t)$ підсилюється підсилювачем 17 низької частоти і випрямляється фазочутливим випрямлячем 18, який керується безпосередньо напругою генератора 11 низької частоти. Випрямлена напруга згладжується фільтром 19 нижніх частот, яка, беручи до уваги вираз (1), приймає вигляд

$$U_9 = 8S k_1^2 k_2^2 k_3 k \Delta f T_x R_x, \quad (13)$$

де k_3 - коефіцієнт підсилення підсилювача 17 низької частоти.

Випрямлена напруга U_9 вимірюється вихідним вимірювачем напруги 20. З виразу (13) бачимо, що вимірювальна напруга прямо пропорційна активному опору рідини, яка протікає крізь датчик 1. Це досягнуто завдяки вимірюванню теплових шумів датчика, які зростають із збільшенням активного опору R_x , що дозволяє аналізувати високоомні рідини.

Проте у вираз (13) входить і температура рідини T_x , яку важко стабілізувати, якщо датчик виконан проточним. Для зменшення впливу несталості температури використовується блок 16 температурної компенсації, який включає терморезистор 22, підключений на інвертуючому вході операційного підсилювача 23. Сам підсилювач охоплений негативним зворотним зв'язком через змінний резистор 25.

Вихідна напруга операційного підсилювача 23 з негативним зворотним зв'язком визначається виразом

$$U_{10}(t) = (R_2/R_1)U_8(t), \quad (14)$$

де R_1 - опір терморезистора 22;

R_2 - опір змінного резистора 25.

Температуру рідини можна розглядати як деяку сталу номінальну температуру T_n , яка задається технологічним регламентом, і змінну частину ΔT , обумовлену впливаючими факторами:

$$T_x = T_n \pm \Delta T = T_n (1 \pm \Delta T / T_n). \quad (15)$$

Опір R_1 терморезистора з урахуванням виразу (15) можна подати таким чином:

$$R_1 = R_0 [1 + \beta T_n (1 \pm \Delta T / T_n)], \quad (16)$$

де R_0 - опір терморезистора при температурі 0°C ;

β - температурний коефіцієнт опору (ТКО).

Опір R_2 змінного резистора установлюють рівним опору терморезистора R_1 , який знаходиться в тепловому контакті з металевою поверхнею датчика 1, а тому і з досліджуваною рідиною 26 з номінальною температурою T_n , тобто

$$R_2 = R_1 = R_0 (1 + \beta T_n). \quad (17)$$

Поточне значення опору терморезистора при змінах температури рідини на $\pm \Delta T$, враховуючи (16) і (17), можна подати у вигляді змін опору R_2 :

$$R_1 = R_2 [1 \pm \beta (R_0 / R_2) \Delta T]. \quad (18)$$

Якщо у вираз для вихідної напруги підсилювача (14) підставити значення з (18), то одержимо напругу

$$U_{10}(t) = U_8(t) / [1 \pm \beta (R_0 / R_2) \Delta T], \quad (19)$$

яка з урахуванням виразу (17) приймає вигляд

$$U_{10}(t) = (U_8(t) / [1 \pm \beta \Delta T / (1 + \beta T_n)]). \quad (20)$$

Підставляючи в (20) значення напруги (12) і враховуючи співвідношення (1) і (15), одержуємо

$$U_{10}(t) = \frac{8 S k_1^2 k_2^2 k \Delta f T_n (1 \pm \Delta T / T_n) R_x}{1 \pm \beta \Delta T / (1 + \beta T_n)} \sin 2 \pi f t \quad (21)$$

Терморезистор 22 обирають з великим ТКО, наприклад, термістори або позістори. Тому можна вважати, що $\beta T_n \gg 1$. Враховуючи це, вираз (21) буде мати вигляд

$$U_{10}(t) = 8 S k_1^2 k_2^2 k \Delta f T_n R_x \text{signs} \sin 2 \pi f t \quad (22)$$

де $T_n = \text{const}$ - номінальна температура рідини.

Після підсилення на низькій частоті підсилювача 17 з коефіцієнтом підсилення k_3 і фазочутливого випрямлення змінної напруги $U_{10}(t)$ аналогічно з виразом (13) остаточно одержимо

$$U_{11} = 8 S k_1^2 k_2^2 k_3 k \Delta f T_n R_x = S_n R_x, \quad (23)$$

де $S_n = 8 S k_1^2 k_2^2 k \Delta f T_n$ - номінальна крутизна перетворення активного опору рідини в сталу напругу [В/Ом].

Шкала вимірювача напруги 20 градується безпосередньо в одиницях електричного опору рідини при її номінальній температурі.

Таким чином, розглянутий пристрій дозволяє вимірювати активний опір високоомних рідин навіть з граничним значенням питомого електричного опору (до 10^{17} - 10^{18} Ом·м) при рівні шумового сигналу датчика, який менший рівня власних шумів підсилювачів вимірювальної схеми при кінцевому значенні їх вхідного опору. При цьому автоматично виключається вплив несталості температури $\pm \Delta T$ досліджуваної рідини, а чутливість (номінальна крутизна перетворення S_n) легко регулюється зміною коефіцієнту підсилення k_3 підсилювача низької частоти 17.

Приклад. Випробувався пристрій для вимірювання електричного опору високоомної очищеної води по запропонованій схемі, в якому диференційний розщеплювач виконан на двох мало шумних операційних підсилювачах струму TLC226A (Texas Instrument). На операційних підсилювачах цієї серії виконані також інвертор та суматор. Автоматичний перемикач зроблено на мікросхемі K561КТЗ, яка керується знакозмінною напругою від симетричного мультівібратора з частотою переключення 125Гц, який зроблено на мікросхемі K263ГФ1, та виконує роль генератора напруги низької частоти прямокутної форми.

Смуговий підсилювач побудований також на вказаних операційних підсилювачах із смугою пропускання від 10кГц до 200кГц, що забезпечує виділення теплового шуму із загального шумового сигналу. В якості термочутливого резистора застосований позистор типу СТ-1А, у якого різко змінюється опір в діапазоні температур 20-100°C відносно початкового 500Ом. Коаксіальний проточний датчик зроблено із латуні, а його геометричні розміри забезпечують хвильовий опір у вказаному діапазоні частот ~600Ом. Діапазон вимірювальних опорів одержано від 10МОм до 1ГОм, відносна похибка вимірювання не вища за $\pm 1,5\%$.

