

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут інформаційних технологій

Кафедра метрології та інформаційно-вимірювальних технологій

Гобрей Василь Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 621.317

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Тема: Розроблення установки для контролю вологості нафти
(назва роботи)

Метрологія та інформаційно-вимірювана техніка
(назва освітньої програми)

~~152 метрологія та інформаційно-вимірювана техніка~~
(шифр і назва спеціальності)

В.І. Гобрей

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Боднар Роман Тарасович , к.т.н., доцент

(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ІВТ

Проф. _____ **О. Є. Середюк**
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та
прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та
прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

м. Івано-Франківськ – 2024 рік

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

ІНСТИТУТ інформаційних технологій

КАФЕДРА інформаційно-вимірювальних технологій ____

Освітній рівень магістр _____

Спеціальність 152 метрологія та інформаційно-вимірювана техніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТ ____

О. Є. Середюк

« ____ » _____ 2023 року

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

__ Гобрей Василь Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення установки для контролю вологості нафти

Керівник роботи Боднар Роман Тарасович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від "15" 12. 2023 року № 734/7

2. Термін подання студентом роботи "19" 01. 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: Сорт нафти 1: $\epsilon_1 = 81$; $\epsilon_2 = 2.0$; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;
 $\rho = 810$ кг/м³; $\rho_v = 1000$ кг/м³; $\sigma_1 = 30 \cdot 10^{-6}$ См·м; $f = 10$ кГц; $a = 0,015$; $b = 0,73$.

Сорт 2: $\epsilon_1 = 81$; $\epsilon_2 = 2.6$; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; $\rho = 850$ кг/м³; $\rho_v = 1000$ кг/м³; $\sigma_1 = 30 \cdot 10^{-6}$ См·м; $f = 10$ кГц; $a = 0,020$; $b = 0,95$.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Аналіз об'єкту контролю, існуючих методів і приладів контролю необхідних параметрів. Теоретичне обґрунтування методу контролю. Розробка методики контролю. Розробка конструкції установки. Метрологічний аналіз розробки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Теорія методу (А3); Функціональна структурна схема установки (А3); Схема електрична принципова (А3); Загальна конструкція. Складальне креслення установки (А3); Складальне креслення блока (А3); Метрологічне забезпечення установки. (А3)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 11.12.2023 р. _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд методів і засобів контролю	11.12.23 – 15.12.23	
2.	Теоретичне обґрунтування методу контролю	16.12.23 – 22.12.23	
3.	Розробка конструкції установки	16.12.23 – 23.12.23	
4	Розробка методики контролю	24.12.23 – 27.12.23	
5	Метрологічний аналіз	2.01.23– 09.01.24	
6.	Оформлення роботи.	10.01.24– 19.01.24	

Студент _____ Гобрей В.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Боднар Р. Т. .

АНОТАЦІЯ

Тема: "Розроблення установки для контролю вологості нафти."

містить 95 сторінок, 16 рисунків, 4 таблиць, 7 аркушів креслень.

Мета роботи : "Розроблення та проектування приладу для вимірювання вологості нафти."

Робота містить аналіз методів і обґрунтування вибраного методу дослідження, розроблено електричну принципову схему та конструкторську документацію спроектованого приладу, проведено розрахунок електронних вузлів приладу, розроблено методику проведення контролю; проведено метрологічний аналіз розробленого приладу.

НАФТА, ВОДА, ВОЛОГІСТЬ, ДІЕЛЬКОМЕТРИЧНИЙ МЕТОД,
ПЕРЕТВОРЮВАЧ, МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ БЛОК.

ABSTRACT

Theme: "Development of an installation for oil moisture control."

Contains 95 pages, 16 figures, 4 tables, 7 sheets of drawings.

The purpose of the work: "Development and design of a device for measuring the moisture content of oil."

The work contains an analysis of the methods and justification of the selected research method, an electrical schematic diagram and design documentation of the designed device was developed, a calculation of the electronic components of the device was carried out, a control methodology was developed; metrological analysis of the developed device was carried out.

PETROLEUM, WATER, HUMIDITY, DIELECTRIC METHOD,
TRANSFORMER, MICROCHIP BLOCK.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Огляд методів вимірювання нафти.....	11
1.1 Абсолютні методи визначення вологості	11
1.2 Хімічні методи визначення вологості	12
1.3 Фізичні методи визначення вологості	14
1.3.1 Діелькометричний метод	15
1.3.2 Кондуктометричний метод	17
1.3.3 Надвисокочастотний метод	21
1.3.4 Метод ядерного магнітного резонансу	26
1.4 Аналіз методів, обґрунтування та постановка задачі на	28
2 Розробка установки для контролю вологості нафти	31
2.1 Теоретичне обґрунтування та вибір методу контролю вологості нафти	31
2.2 Розробка принципової схеми приладу	45
2.3 Розробка первинного перетворювача діелькометричного воломіра нафти	46
2.4 Розробка та розрахунок вузлів проектного приладу	48
2.4.1 Розробка та аналіз електричних блоків схеми	48
2.4.2 Розрахунок блоку живлення	49
2.4.3 Розрахунок генератора синусоїдальних коливань	55
2.4.5 Розрахунок блоку підсилення проектного приладу	59
2.4.6 Розрахунок вимірювального моста	64
2.4.6.1 Розробка блоку цифрової обробки інформації	67
2.4.6.2 Опис алгоритму роботи мікропроцесорного контролера	70
2.4.6.3 Розрахунок електромагнітного екрану блоку цифрової	

обробки інформації.....	71
2.5 Розробка спроектованого приладу для вимірювання вологості нафти.....	74
3 Метрологічний аналіз діелькометричного вологоміра нафти	75
3.1 Аналіз видів похибок	75
3.2 Метрологічний аналіз похибок пректованого приладу	77
3.3 Розрахунок основної допустимої похибки діелькометричного вологоміра.....	82
3.3.1 Розрахунок похибки генератора синусоїдальних коливань.....	82
3.3.2 Розрахунок похибки діелькоменричного вологоміра	84
3.4 Метрологічне забезпечення процесу вимірювання вологості нафти ..	85
Висновки	88
Список посилань на літературу	89
Додатки	
Бібліографічна довідка	

ВСТУП

Прискорення розвитку народного господарства на основі науково-технічного прогресу, перебудова та вдосконалення господарського механізму, особливо в умовах ринкової економіки, пред'являють підвищені вимоги до економічних вимог управління, тобто, і до кожного спеціаліста-інженера, майбутнього організатора виробництва.

Розділ праці, розвиток промислового виробництва все більш наполегливо вимагали вироблення яких-небудь правил ведення процесу створення готових виробів, підготовки людей, які знають та вміють застосовувати ці правила. Тому поступово відокремилась спеціальна галузь знань, склалася та розвивається наука про організацію та планування виробництва.

Дана наука розробляє шляхи та методи організації планомірної, високопродуктивної роботи, яка забезпечує найбільш ефективно використання технічних, матеріальних трудових та фінансових ресурсів.

В економічному плані виробництво - це процес споживання засобів виробництва та робочої сили. Для того щоб процес виробництва мав можливість здійснюватись, необхідна наявність трьох елементів: засобів праці, предметів праці, та самої праці, носієм якої є робоча сила.

Першою основною умовою здійснення процесу виробництва на підприємстві повинно бути зосередження необхідних засобів виробництва та робочої сили, які споживаються в процесі виробництва, в просторі (виробничі підрозділи). Другою умовою є належна побудова та регулювання самого процесу споживання (виробничий процес). Третя умова - управління виробничими підрозділами та виробничими процесами.

Таким чином, виробництво на підприємстві може бути розбито на три складові: виробничі підрозділи, виробничий процес та керування ним.

У відповідності з цим предметом науки про організацію та планування виробництва є вивчення принципів побудови виробничих підрозділів, ведення процесу виробництва та керування ними.

Різноманітність приладів різних принципів дії та класів точності, широкий кількісний діапазон їх випуску - від малих серій до масового виробництва. Ця особливість обумовлює потребу організації процесів виготовлення деталей високого класу точності, проектування спеціальних операцій зборки (юстировка, балансування, регулювання, градування та ін.). Питання взаємозамінності необхідно вирішувати не так, як в машинобудуванні: поряд із взаємозамінністю по розмірам необхідно враховувати взаємозамінність по різним властивостям - магнітопровідності, електропровідності, пружності та ін.

Відносно малі габаритні розміри приладів, різні умови їх експлуатації, широка номенклатура застосовуваних матеріалів, особливо кольорових та електроізоляційних, причому в порівняно невеликих кількостях, що ускладнює забезпечення ними, приводить до надлишкових запасів. Застосування різних дорогих матеріалів вимагають впровадження різних методів їх обробки та безвідходних технологій, а значить спеціалізованого, часто досить складного обладнання та технологічного оснащення.

Значна трудоемність виготовлення деталей приладів, велика питома вага ручної праці ставлять проблему підвищення продуктивності праці перш за все за рахунок механізації та автоматизації робіт під час обробки деталей та особливо під час зборки приладів. Разом з тим при відносно великій трудоемності виготовлення абсолютні значення часу на виконання окремих операцій та прийомів в умовах приладобудування достатньо невеликі. Це суттєво ускладнює використання високопродуктивних форм організації виробничих процесів - поточний, багатостаночний.

Крім вказаних особливостей приладобудівного виробництва є ряд особливостей, які притаманні галузі приладобудування, що накладають свій відбиток на організацію та планування виробництва.

Продукція галузі використовується для промислового споживання та для цілей культурно-побутового призначення. Галузь випускає велику номенклатуру виробів, що постачаються сотням підприємств-споживачам, що вимагає чіткої організації планування виробництва, матеріально-технічного постачання та збуту.

Високі темпи технічного прогресу, великий процент щорічного оновлення продукції приладобудування (в середньому 15%) потребують швидкої перебудови на випуск нових виробів. Це визначає гнучкість та чітку організацію та структуру виробництва, що дозволяє переходити на нові моделі приладів в короткі терміни та з мінімальними затратами.

Для галузі характерна висока питома вага спеціального технологічного обладнання (так званого нестандартного), що приводить до значного впливу коефіцієнту використання цього обладнання на рентабельність роботи підприємства (з усіма витікаючими звідси наслідками).

Мета роботи – розробка приладу для контролю вологості нафти.

Об'єктом дослідження є процес взаємодії електромагнітних коливань з досліджуваною нафтою.

Предметом дослідження є способи контролю вологості досліджуваної нафти.

Метод дослідження – математичне моделювання фізичних процесів взаємодії електромагнітних коливань з діелектриками.

Наукова новизна магістерської робота полягає у використанні залежності діелектричної сталої нафти від вологості для встановлення їхнього вмісту з метою оцінки якості досліджуваних нафтопродуктів.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена установка є досить дешевою, дає досить швидкий контроль вологості досліджуваної нафти.

1 ОГЛЯД МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ НАФТИ

Методи вимірювання вологості нафти і нафтопродуктів можна класифікувати на абсолютні, хімічні і фізичні. Абсолютні та хімічні методи відносять до так званих прямих методів, а фізичні до опосередкованих.

Абсолютні методи дозволяють визначити кількість води шляхом відфільтрації води від основної маси аналізованої речовини. В хімічних методах використовується ефект взаємодії хімічного реагента та води. Фізичні методи засновані на визначенні вмісту води без зміни її стану.

Вище приведені методи вимірювання вологості реалізують прямі або опосередковані методи вимірювання, призначені або для кількісного контролю, або ж для якісного факту наявності води в аналізованій речовині і використовуються в якості лабораторних чи промислових методів вимірювання вологості.

1.1 Абсолютні методи визначення вологості

Дистиляційний метод (метод Діна і Старка) - полягає в відгонці води із суміші нафти чи нафтопродукту, а точніше водонафтової емульсії з наступним дослідженням конденсованої вологи [1]. Метод оснований на відомій властивості деяких бінарних систем мати при постійній температурі мінімальну температуру кипіння. Якщо взяти суміш двох компонентів, то кипіння суміші буде відбуватися при температурі, меншій ніж температури кипіння кожного компонента окремо. Коли один із компонентів википить, тоді температура кипіння буде відповідати температурі кипіння компонента, що залишився. Подібні суміші називають азеотропними.

Метод висушування полягає в повітряно-тепловому висушуванні невеликої спеціально підготовленої наважки матеріалу до досягнення термодинамічної рівноваги з навколишнім середовищем, що умовно вважається рівноціним повному видаленню вологи з продукту. Метод

висушування є найбільш точним і використовується для перевірки інших методів. Вологість зразка продукту визначається по різниці ваги сухої та вологої наважки.

$$U = \frac{\Delta M}{M_0} \quad \text{або} \quad U = \frac{M - M_0}{M_0} \quad (1.1)$$

де U - вміст води; ΔM - маса води; M_0 - маса абсолютно сухого матеріалу; M - маса вологого матеріалу.

Перехід від вмісту води до вологості і назад здійснюється за наступними формулами:

$$U = \frac{W}{1 - W} \quad \text{та} \quad U = \frac{W}{1 + W} \quad (1.2)$$

де W - вологість матеріалу.

Екстракційний метод полягає в тому, що вода виділяється із дослідного зразка водопоглинаючими рідинами (спирт, діоксан) з наступним визначенням характеристик рідкого екстракта, що залежить від його вологовмісту (густина, показник заломлення, температура кипіння або замерзання, тощо). Перевагами екстракційного методу - малий вплив на результати визначення вологості інших фізичних характеристик матеріалу (густини, складу, тощо). Недоліком методу можна вважати - залежність результату від чистоти та дози водопоглинаючої рідини та великий час тривання експерименту.

1.2 Хімічні методи визначення вологості

Колориметричний метод - оснований на визначення зміни кольору хімічної речовини в присутності води або зміні рН водного розчину, результаті чого забарвлюється індикатор. В якості хімічних речовин зазвичай використовують різні комплексні солі і їх суміші, наприклад сірчанокислу сіль трьохвалентного заліза та ін.

Волюметричний метод - оснований на зміні об'єму газу, що виділяється при взаємодії води в нафтопродуктах з хімічними реагентами (гідридами, карбідами та ін.), найкращим з яких є гідрид кальцію [1].

Вміст води (%) визначається за формулою:

$$G_B = 100 \cdot KV_0 / G_H \quad (1.3)$$

де K - кількість води, що відповідає 1 м^3 газу, що виділяється під час реакції, кг;

V_0 - об'єм газу, що виділився під час реакції, приведений до нормальних умов, м^3 ; G_H - наважка нафтопродукту, кг.

Кількість води в нафтопродукті можна визначити за тиском, що створюється в системі в результаті реакції води з хімічними реагентами. В цьому випадку

$$G_B = 100 \cdot KV_0 / (N_T RTG_H) \quad (1.4)$$

Використання волюметричного методу обмежений тривалістю вимірювання, необхідністю приведення газу до нормальних умов, відносною грамівністю і тонкістю вимірювальної апаратури.

Титрометричний метод - оснований на визначенні вологості нафтопродукту при титруванні дослідної проби розчинами хімічних реагентів. Найбільш розповсюджений реактив Фішера, що представляє собою розчин йоду піридина і сірчистого ангідрида в метанолі. При титруванні реактивом Фішера має місце наступна реакція:



Кінцеву точку титрування визначають за величиною струму в міжелектродному просторі вимірювальної комірки.

Калориметричний метод - оснований на екзотермічній взаємодії хімічних реагентів (прості і комплексні гідриди, оксид фосфору (V), сірчана кислота та ін.) з водою, що знаходиться в нафтопродуктах. Про кількість води в нафтопродуктах судять за кількістю теплоти, що виділяється під час реакції. Найбільш підходящим реагентом є гідрид кальцію, тому що він дає найбільший тепловий ефект при взаємодії з водою:



Кулонометричний метод - заснований на електролізі води, яка отримана від аналізованого продукту шляхом адсорбції. Мірою кількості води є кількість електрики, що витрачається на проведення електролізу виділеної води:

$$m_b = \frac{I \cdot t \cdot \varepsilon_b}{F} \quad (1.8)$$

де m_b - кількість води, що розклалася; I - струм електролізу; t - час електролізу; ε_b - електрохімічний еквівалент води; F - число Фарадея.

Необхідна умова методу - повне видалення води з аналізованого продукту.

1.3 Фізичні методи визначення вологості

До фізичних методів відносять електричні та спектрометричні методи визначення вологості нафти та нафтопродуктів. Електричні методи ґрунтуються на залежності електричних параметрів водонафтової емульсії від кількості води. До електричних методів відносять кондуктометричний та діелектричний методи. Крім того до фізичних методів можна віднести надвисокочастотний метод (НВЧ-метод), метод ядерного магнітного резонансу (ЯМР).

Кондуктометричні вологоміри використовують залежність провідності речовини в залежності від кількості води, що знаходиться в речовині, при вимірюванні такі вологоміри дають велику похибку. Це пов'язано з тим, що на величину електропровідності впливає не тільки вологість, а також склад нафти, наявність домішок, поверхневих струмів, температура і ряд інших факторів.

Діелектричні вологоміри використовують значну різницю між діелектричною проникністю нафти (близько 2,5) та води (80). Така різниця в діелектричних проникностях води та нафти дозволяє створити вологомір з високою чутливістю [2].

1.3.1 Діелькометричний метод

Відносна діелектрична проникненість речовини визначається за формулою

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0} \quad (1.9)$$

де C , C_0 - ємність конденсатора, діелектриком в якого є досліджувана речовина або вакуум відповідно.

Відносна діелектрична проникненість ε є величиною безрозмірною. На відміну від абсолютної діелектричної проникненості ($\varepsilon_a = \varepsilon\varepsilon_0$, де ε_0 - діелектрична проникненість вакууму, і рівна $\varepsilon_0 = 8,15 \cdot 10^{-12}$ Ф).

Зв'язок між вимірювальним параметром дослідної речовини (ε , $\text{tg } \varepsilon$) і вологовмістом можна отримати з розрахунку електричних параметрів вологого матеріалу за формулою

$$\varepsilon_B^* = \varepsilon_2^* \left(1 + \frac{\varepsilon_1^* - \varepsilon_2^*}{a\varepsilon_1^* + b\varepsilon_2^*} \cdot \frac{\rho}{\rho_B} \cdot \frac{W}{100} \right) \quad (1.10)$$

де ε_B^* - комплексна діелектрична проникненість вологого матеріалу;

ε_1^* - комплексна діелектрична проникненість поглинутої матеріалом води;

ε_2^* - комплексна діелектрична проникненість сухого матеріалу; ρ - густина матеріалу; ρ_B - густина води; W - вологість досліджуваного матеріалу;

a та b - постійні коефіцієнти (для багатьох матеріалів $a = 0,01 \div 0,03$; $b = 0,5 \div 1,5$).

На рис. 1.1 приведена схема діелькометричного вологоміра з диференціальним методом вимірювання [3], в якого перетворювач 1 вимірює ємність аналізованої емульсії, а компенсаційний перетворювач 2 - ємність еталонної (зневодненої) нафти, яка приготована шляхом відгонки води із аналізованої суміші. З метою компенсації температури обидва давача поміщені в однакові температурні умови. Принцип дії приладу полягає в наступному: в безперервному вимірюванні і порівнянні діелектричних провідностей аналізованої емульсії, що протікає по трубопроводу та зневодненої нафти.

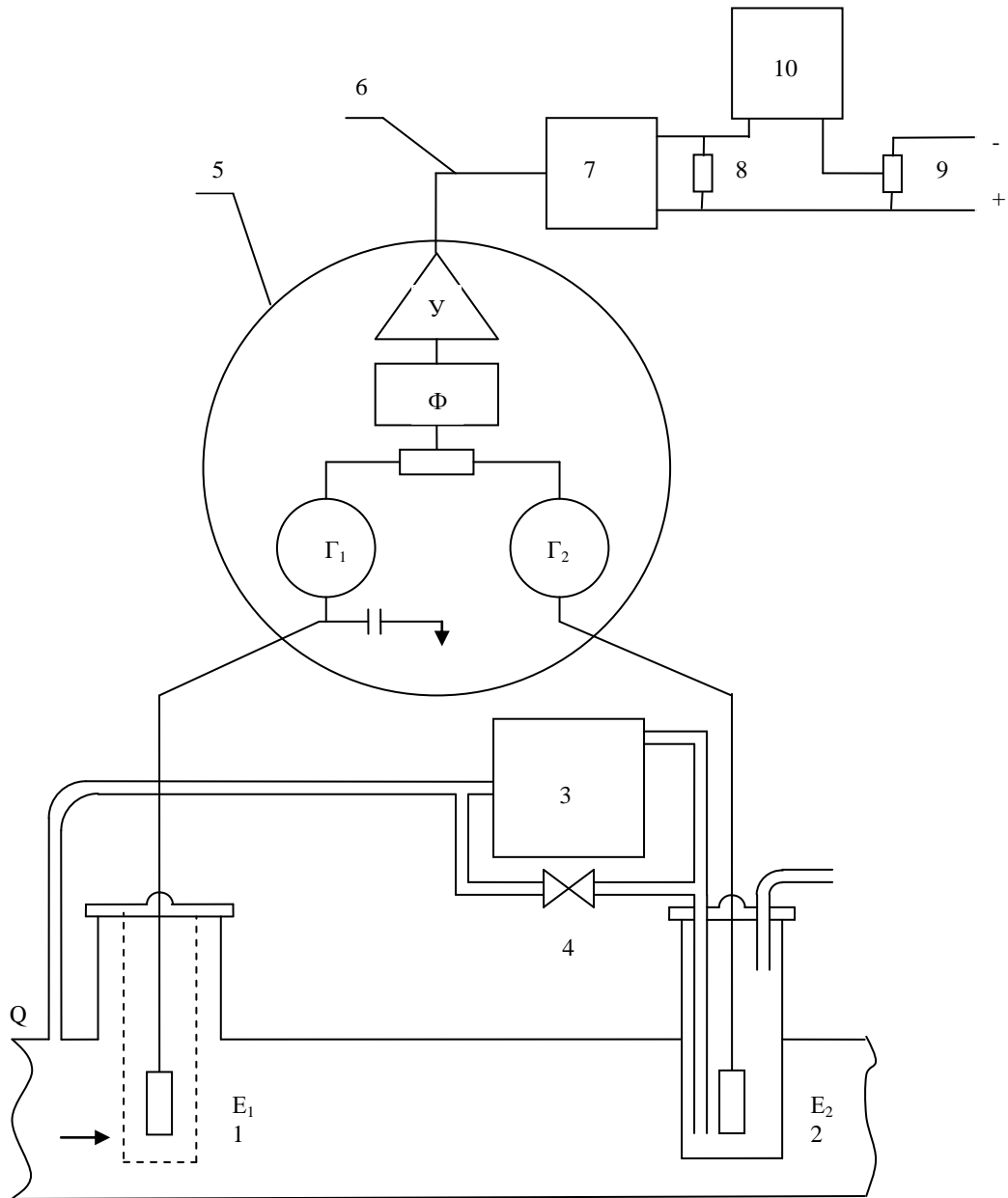


Рисунок 1.1 - Схема дієлькометричного вологоміра з диференційною схемою вимірювання

При цьому прилад безперервно вирішує рівняння:

$$m = \frac{1}{k} (\epsilon_B - \epsilon_H) \quad (1.11)$$

де m - процентний вміст води в нафті; ϵ_B - діелектрична проникненість водонафтової емульсії; ϵ_H - діелектрична проникненість еталонної

(зневодненої) нафти; $\left(k = \frac{d\varepsilon}{dm}\right)$ - коефіцієнт залежності діелькометричної проникненості від її вологості.

Еталонна нафта очищена від води і механічних включень блками еталонізації 3. Клапан 4 шунтує блок еталонізації при установці нуля. Ємності давачів 1 та 2 порівнюються в блоці 5, що виробляє сигнал з частотою, пропорційною різниці ємностей на вході блоку. Блок складається з двох генераторів Г1 та Г2, в коливальний контур яких входять ємності давачів 1 та 2, підналагоджуваний конденсатор Сп, змішувач С та фільтр Ф, що виділяє різницю частот $F=f_1-f_2$ (де f_1 та f_2 - частоти генераторів Г1 і Г2). Перетворювання частотного сигналу F в пропорційну силу постійного струму виконується перетворювачем 7, що з'єднаний з порівнювачем ємності лінії 6. В комплект приладу входять також регулятор чутливості 8, регулятор встановлення нуля 9 та самопишучий електронний потенціометр 10.

1.3.2 Кондуктометричний метод

Кондуктометричний метод вимірювання вологості оснований на вимірюванні електричних характеристик продукта. Область застосування - вимірювання концентрації води в високозаводнених емульсіях, при вмісті води понад 50%. Фріке і Велік-Геріним запропонована найбільш задовільна залежність, що описує залежність електропровідності середовища і вміст в ній сферичних частинок (включень).

$$\frac{1-\gamma}{\gamma_1} = C = \frac{1-\gamma}{\gamma_1} \frac{1+(f-1)\frac{\gamma_2}{\gamma_1}}{1+(f-1)\frac{\gamma_2}{\gamma_1}} \quad (1.20)$$

де $\gamma, \gamma_1, \gamma_2$,- електропровідність емульсії, дисперсного середовища і дисперсної фази відповідно; $C = V_2/V_1$ - об'ємна концентрація; V_1, V_2 - об'ємна концентрація частинок; f - фактор форми і орієнтації частинок.

Ступінь впливу непровідних частинок на провідність аналізованого середовища зазвичай визначається за допомогою фізичної моделі елементарної комірки гегерогоної системи, відповідно якій в центрі провідного кубічного

об'єму (паралелепіеда) поміщають напровідну частинку, в результаті чого спотворюється рівномірне електричне поле в середині цього об'єму і внаслідок чого змінюється опір навколишнього середовища [6].

Опір провідного паралелепіеда при відсутності непровідної частинки рівний:

$$R_1 = \rho_1 \frac{l}{S} \quad (1.21)$$

де l , S - довжина та площа провідного паралелепіеда відповідного;

ρ_1 - приведений опір матеріалу паралелепіеда.

Для непровідного паралелепіеда формула має вигляд:

$$R_2 = \rho_2 \frac{l}{S} \quad (1.22)$$

де l , S - довжина та площа непровідного паралелепіеда відповідного;

ρ_2 - приведений опір матеріалу паралелепіеда.

Основна формула за якою працюють кондуктометричні вологоміри для водонафтових емульсій визначається показниковою функцією виду:

$$R_x = \frac{A}{W^n} \quad (1.23)$$

де R_x - величина опору водонафтової суспензії; A - постійна, що залежить від сорту нафти; W - вологість матеріалу в % маси; n - показник степені, залежний від сорту та складу нафти (для різних сортів нафти може коливатися в доволі широкому діапазоні).

Графік цієї функції показаний на рис. 1.2. Залежність $lg R_x = f(W)$ має дві характерні ділянки.

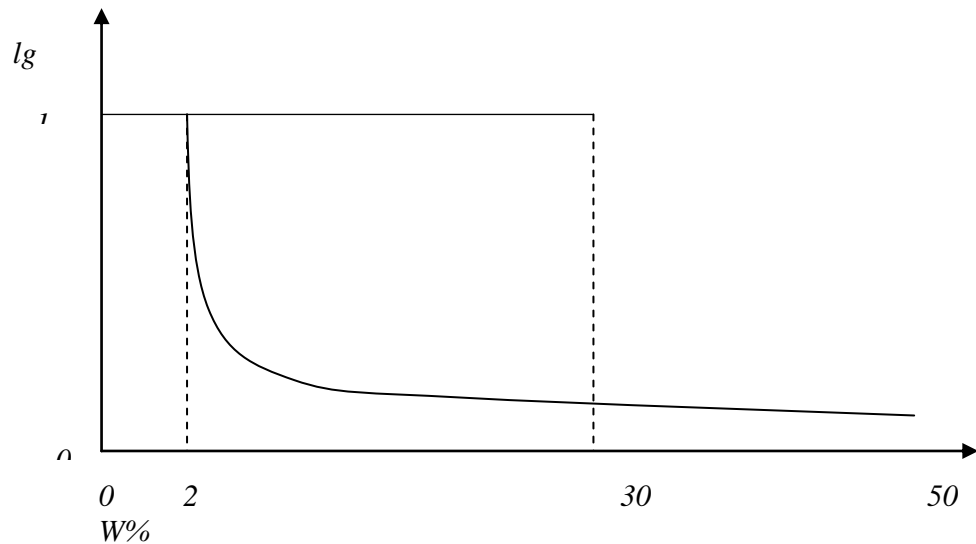


Рисунок 1.2 - Залежність електричного опору від вологості матеріалу

Початкова ділянка, відповідає низькій та середній вологості, і характеризується високою крутизною і може бути апроксимований прямою вигляду $lg R_x = a - bW$, де a та b - постійні, що залежать від сорту нафти та умов вимірювання.

На цій ділянці вологомір дуже чутливий до зміни вологості, а також вплив інших факторів незначний.

Ділянка підвищеної вологості (2-га ділянка) характерна зниженням крутизни характеристики, чутливість вологоміра різко падає, а також зростає вплив побічних факторів на опір матеріалу.

Основна ділянка де використовують кондуктометричний метод обмежена 1-ою ділянкою кривої (до $W=30\%$) [3]. Проте на цій ділянці є область $W=0 \div 2\%$, де практично не можливо виміряти вологість через те що різко зростає опір матеріалу (опір матеріалу стає співрозмірним опору ізоляції або навіть більший її).

Степенева залежність опору від вологості матеріалу визначає високу чутливість кондуктометричного методу визначення вологості нафти. Однак складна залежність опору від ряду інших факторів (температура, структура матеріалу, густина, хімічний склад, наявність електролітів та інших) робить цей метод малопридатним для автоматичного безперервного визначення

вологості. Прилади цього типу використовуються в основному в якості лабораторних і оснований на низькочастотному електродному методі.

Перетворювачі кондуктометричних вологомірів представляють собою два електроди, конструктивно виконані в вигляді плоских пластин, циліндричних трубок, роликів і тому подібно.

В кондуктометричних вологомірах найбільш розповсюдженими вимірювальними схемами є схеми мостів, утвореними двома постійними опорами і внутрішнім опором подвійного триода, в якого зміщення на другу сітку залежить від опору перетворювача. Мостові вимірювальні схеми вирізняються високою чутливістю, вони використовуються при середніх та підвищених вологостях (від 5 до 25%).

На рис. 1.3 приведена принципова схема автоматичного вологоміра з мостовою схемою вимірювання.

Дослідний матеріал (водофатова суспензія) пропускається між двома циліндричними пластинами, які між собою ізолювані. Основним елементом кола є міст, два плеча якого R_4 та R_5 - постійні опори, а два інших це внутрішні опори подвійного триода T_1 (в схемі також присутні два додаткові опори R_1 та R_3). В діагональ моста ввімкнений мілівольтметр. Від'ємна напруга U_c на сітці лівої половини лампи (див. Рисунок 1.3) визначається спадам напруги на опорі R_k і є постійним. Тому буде постійним і опір лівої половини триода. Від'ємна напруга на правій частині триода відрізняється від U_c на величину IR_6 , а струм I залежить від опору R_x досліджуваного матеріалу і від положення реохорда R_2 . Двіжок реохорда R_2 при відхиленні стрілки мілівольтметра від нульового положення (при порушенні рівноваги моста) приводить в рух компенсатором до тих пір, поки падіння напруги на R_2 не зрівноважиться падінням напруги на R_6 та R_7 .

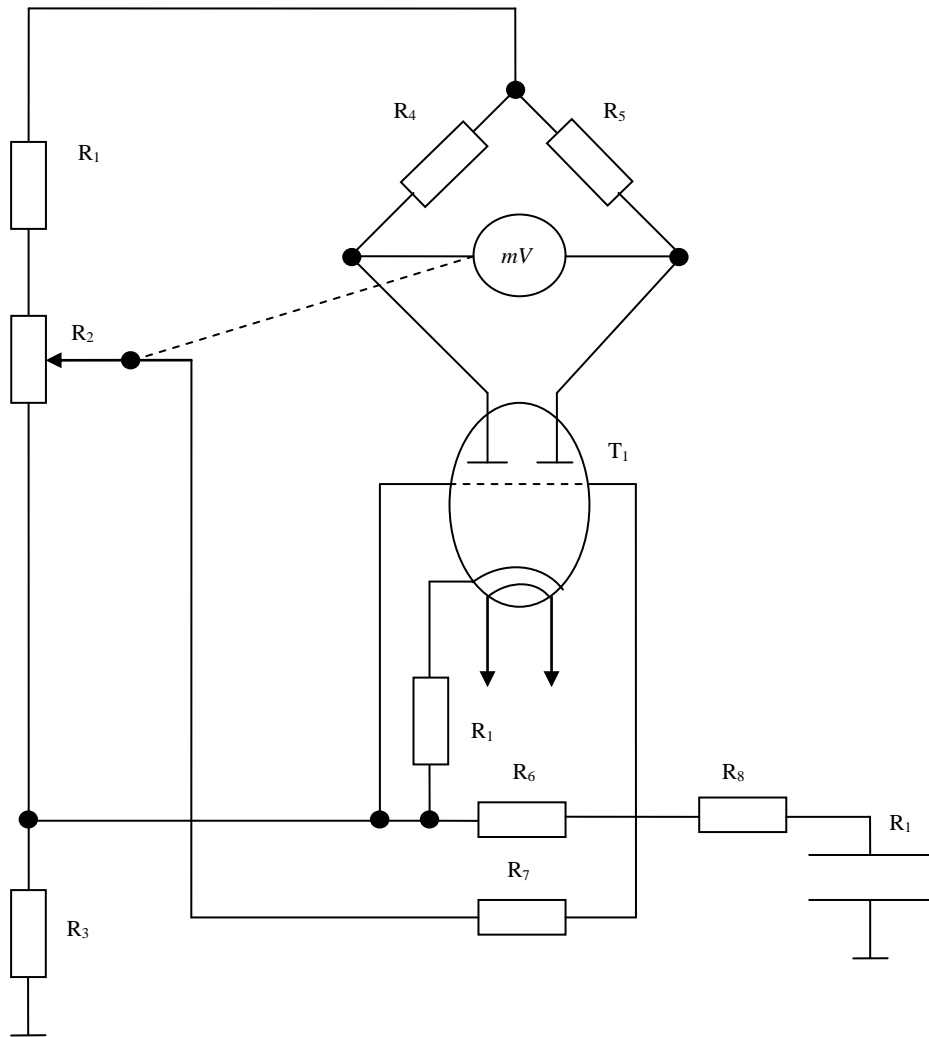


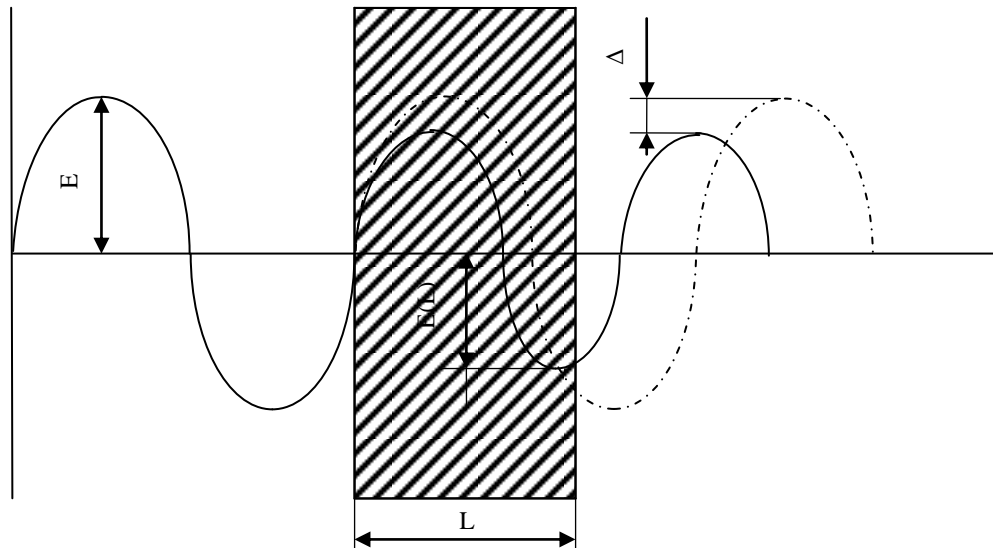
Рисунок 1.3 - Схема автоматичного вологоміра зі мостовою схемою вимірювання

Коли опір зміщення в двох половинах тріода стануть рівними, міст прийде в стан рівноваги. При зміні вологості, а відповідно, при зміні опору матеріалу R_x на опорі R_6 знову виникає струм, міст вийде зі стану рівноваги, що викличе в свою чергу переміщення движка реохорда R_2 .

1.3.3 Надвисокочастотний метод

Як відомо, молекули води є диполями і під впливом змінного електричного поля починають коливатися. Частота коливання визначається часом релаксації молекул. Якщо період коливання зовнішнього поля близьке періоду коливання води, настає резонанс, що обумовлює їх підсилену

взаємодію. Радіохвилі надвисоких частот (НВЧ) з довжиною хвилі від 20 см до 5 мм охоплюють область дисперсії води і тому вони застосовуються при вимірюванні вологості. Проходячи через вологий зразок (рис. 1.4), хвиля послаблюється, що виражається в зміні амплітуди E , і затримки, що зумовлена фазовим зсувом $\Delta\phi$ [3].



1- проходження радіохвилі в повітряному просторі
2- проходження радіохвилі в вологій середовищі

Рисунок 1.4 - Проходження радіохвилі:

При ідеалізації, що відповідає наближено геометричну оптику (без врахування відбиття), внесення плоскопаралельного шару водонафтової емульсії товщиною L між джерелом і приймачем НВЧ викликає зміну вихідного параметра перетворювача:

$$\Delta E = \ln \frac{E(0)}{E(L)} = \int_0^L \alpha(l) dl \quad (1.24)$$

$$\Delta\phi = \int \left[\beta(l) - \frac{2\pi}{\lambda} \right] dl \quad (1.25)$$

де ΔE - зміна амплітуди хвилі; λ - довжина хвилі; l - координата, паралельна поширенню радіохвилі; α та β - відповідно постійна затухання (коефіцієнт поглинання) і фазова постійна, тобто уявна та дійсна частини хвильового числа $\gamma = \beta + j\alpha$, що характеризує умови поширення електромагнітного коливання.

Розкриваючи залежність між α , β і діелектричними постійними середовища (ϵ , $\text{tg } \delta$), можна скласти рівняння для послаблення і фазового зсуву радіохвилі, що пройшла через дослідний матеріал:

$$\Delta E = \frac{2\pi L}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta} - 1 \right)} \quad (1.26)$$

$$\Delta \phi = \frac{2\pi L}{\lambda} \left[\sqrt{\frac{\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta} + 1 \right)} - 1 \right] \quad (1.27)$$

Так як ϵ та $\text{tg } \delta$ води в десятки раз більші від нафти, то звичайно зі зміною вмісту води в речовині різко змінюється його діелектричні постійні; іншими словами - послаблення та фазовий зсув є функціями вологості.

Зазвичай послаблення виражають в децибелах -

$$A(\text{дБ}) = 0.43 \lg \frac{E(0)}{E(L)} = 0.43 \Delta E$$

фазовий зсув - в умовних градусах. Враховуючи, що реальні речовини неоднорідні і що при взаємодії радіохвиль з речовиною виникають хвильові явища, такі як, дифракція та інтерференція, тому рівняння (1.26) та (1.27) не можна використовувати для розрахунків вихідної величини вологомірів (т.б. A та $\Delta \phi$), вони можуть служити для пояснення його роботи. Тому при вимірюванні вологості НВЧ-вологоміром користуються кривими, що отримані в процесі градування приладу.

На рис. 1.5 показані блок-схеми найбільш розповсюджених різновидностей НВЧ-вологомірів, що працюють за принципом послаблення та фазового зсуву.

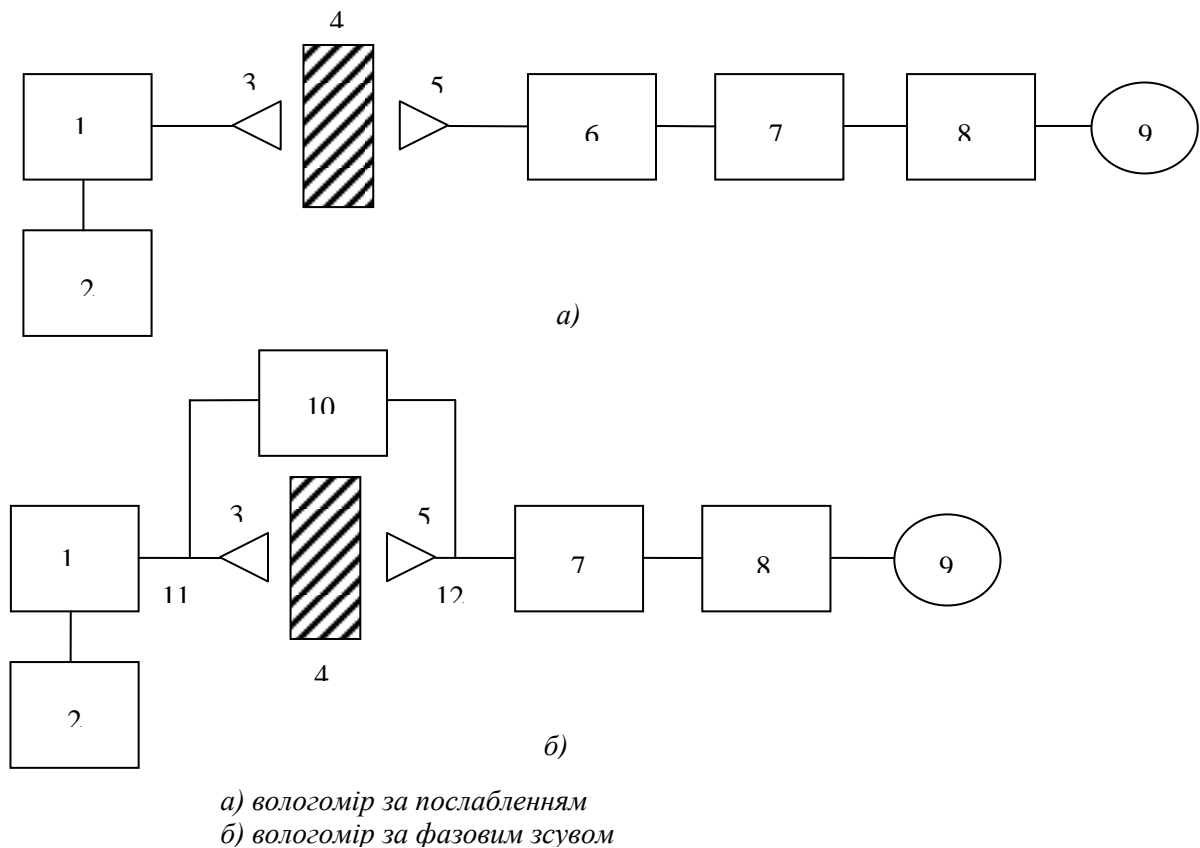


Рисунок 1.5 - Блок-схеми НВЧ-вологомірів

Генератор НВЧ 1 виробляє синусоїдальні коливання строго фіксованої частоти, яка, з метою подальшого підсилення, модулюється в прямокутні імпульси, що генеруються модулятором 2. З допомогою передаючої антени 3 вузький пучок радіохвиль напрямляється на об'єкт контролю (ОК) 4. Хвиля що пройшла через ОК вловлюється приймальною антеною 5, і подається на вимірювальний атенюатор 6 і потрапляє на напівпровідниковий діод 7, що виділяє сигнал низької частоти, який в подальшому підсилюється підсилювачем низької частоти 8 і вимірюється мікроамперметром 9.

Процес вимірювання складається з наступного. При відсутності ОК виводять атенюатор на величину A_1 і добиваються відповідного положення стрілки приладу 9. Вносять зразок в вимірювальний простір, зменшують послаблення, що дає атенюатор, до величини A_2 при тих же показах приладу 9. Різниця $A_1 - A_2 = A$, виражається в децибелах, і буде рівна послабленню енергії

викликаної вологістю ОК. Користуючись попередньо побудованою залежністю $A(W)$, де W - вологість матеріалу, що виражається в процентах по відношенню до маси ОК, можна визначити величину W .

На відміну від роботи описаного вище методу, в роботі фазових НВЧ-вологомірів (рис. 1.5 б) використовується залежність $\Delta\phi(W)$, де $\Delta\phi$ - зсув фази, що виражається в умовних градусах. Коливання НВЧ також виробляється генератором 1, модулюється низькочастотним модулятором 2 і в подільнику 11, що ділить сигнал на два - опорний та вимірювальний. В першому фазообертачем 10 за допомогою передаючої та приймальної антени вимірюється фаза сигналу так, що він став синфазним з коливанням, що пройшли через ОК. в подільнику 12 обидва сигнали змішуються. Величина напруження електромагнітного поля в подільнику 12 вимірюється тією ж схемою, що на Рисунку 1.5 а. В момент синфазності коливання, що пройшли через опорне та вимірювальне коло, покази міліамперметра 9 будуть мінімальними або рівними нулю. Мірою вологості матеріалу є фазовий зсув $\Delta\phi$, що вноситься фазообертачем 10. Перед використанням фазового вологоміра також необхідно провести його градування.

Похибка, що досягається на фазових вологомірах і вологомірах по послабленню, не перевищує 0,5% вологості. Крім лабораторних вологомірів даний метод можна використовувати для побудови промислових вологомірів для контролю вологості матеріалів в потоці. Метод НВЧ - безконтактний та безінерційний, менш чутливий до наявності електролітів в матеріалі і нерівномірного розподілу вологи в зразку по відношенню до інших електричних методів. Однак, як всі методи вологометрії, в яких використовуються різні види випромінювання, він також потребує постійний степінь зжатості (вимагає постійного транспортного тиску), або інформації про тиск і його зміну.

1.3.4 Метод ядерного магнітного резонансу

В основі методу лежить поглинання енергії радіочастотного магнітного поля ядрами атомів водню (гідрагріум) з складу води, що міститься в матеріалі [3].

Ядро атома водню можна розглядати як заряджений шарик, що наділений механічним та магнітним моментом і обертається навколо власної осі обертання. Якщо такий обертаючийся магнітик внести в магнітне поле, то його вісь обертання почне обертатися навколо напрямку магнітного поля з кутовою швидкістю:

$$\omega_0 = \gamma H_0 \quad (1.28)$$

де γ - гіромагнітне число, що характеризує відношення магнітного моменту ядра до його механічного моменту; H_0 - напруженість зовнішнього магнітного поля.

При дії на протон додаткового змінного радіочастотного поля H_1 вектор напруженості якого обертається або коливається і перпендикулярний до поля H_0 , на магнітик (магнітний диполь) буде діяти пара сил, що намагатимуться змінити кут між вектором напруженості поля H_0 і вектором магнітного диполя.

Якщо при цьому частота і напруження змінного магнітного поля H_1 співпадають з кутовою швидкістю (ω_0 і напрямком прецесії диполя, то наступить резонанс - ядерний магнітний резонанс (ЯМР).

Інтенсивність поглинання ОК енергії при ЯМР пропорційна числу протонів водню одиниці об'єму дослідного зразка, відповідно, за величиною поглинання можна однозначно оцінити вміст вологи.

Для досліду з ЯМР зразок матеріалу поміщають в циліндричну котушку, вісь якої перпендикулярна напрямку постійного магнітного поля. По котушці пропускають змінний струм від генератора високої частоти. Резонанс досягається або при постійному значенні напруженості поля H_0 і зміні частоти змінного струму, або ж змінною вузькому діапазоні величини H_0 при постійному значенні частоти змінного струму.

Поглинання радіохвильової енергії визначається за параметрами високо частотного коливального контуру, в який входить котушка з дослідним матеріалом.

На рис. 1.6 приведена блок-схема ЯМР-вологоміра.

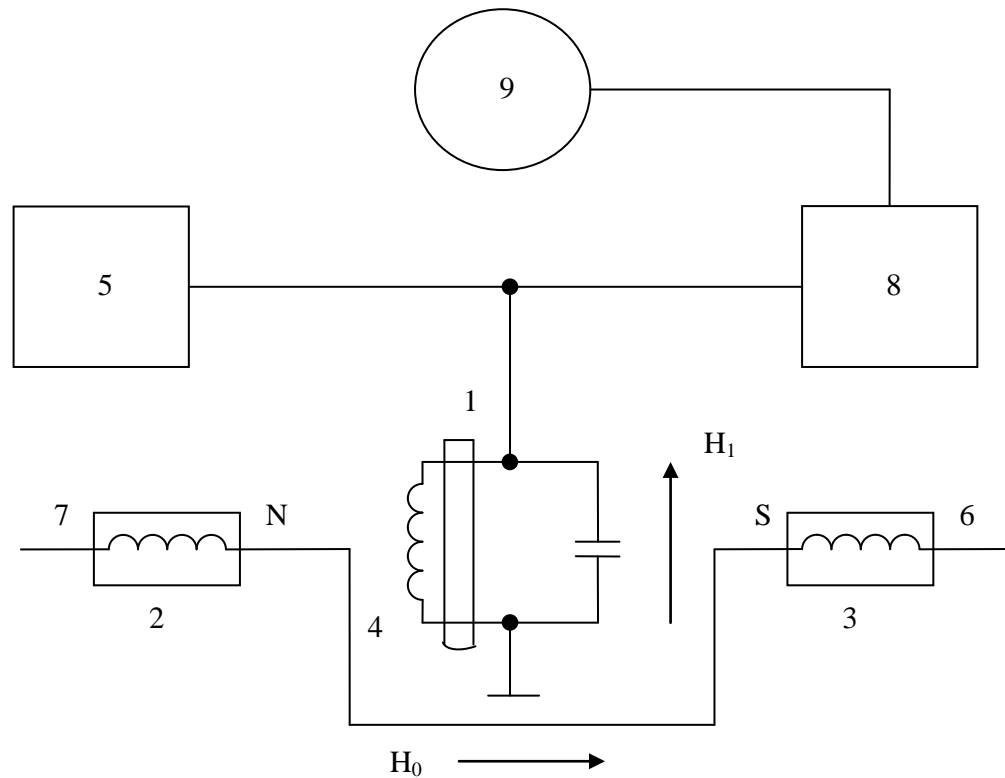


Рисунок 1.6 - Схема ЯМР-вологоміра

Циліндрична ємність 1 з дослідним матеріалом розміщується між полюсами 2 та 3 постійного магніту, що утворює в зразку магнітне поле відповідної напруженості. Ємність зі зразком заповнює внутрішню порожнину котушки 4, що входить в паралельний коливальний контур, що живиться струмом високої частоти від генератора 5. Полюси постійного магніту оснащені повертаючими катушками 6 і 7, що живиться від генератора низької частоти (на рисунку 1.6 не показаний). Радіочастотний сигнал блоком 8 підсилюється та диктується, а потім реєструється вимірювальним приладом 9.

Прилад градується за матеріалом з відомою вологістю. Недоліки ЯМР-методу - необхідність відбору проби і складність вимірювальної апаратури.

1.4 Аналіз методів, обґрунтування вибраного методу та постановка задачі на дипломне проектування

З приведених вище методів визначення вологості в нафті (водонафтовій емульсії), ми можемо зробити висновок про доволі великий вибір та спосіб застосування того чи іншого методу в лабораторних, виробничих чи інших умовах. Перед тим як приступити до вибору методу контролю вологості нафти слід визначитися з поставленими вимогами та завданням на дипломне проектування. А саме потрібно розробити прилад для вимірювання вологості нафти для використання його в умовах транспортування досліджуваної речовини, з високими метрологічними характеристиками, з можливістю безперервного контролю відповідного параметру, доволі простим в експлуатації та наладці.

Дамо коротку характеристику вище приведених методів:

Абсолютні методи дозволяють визначити кількість води шляхом відфільтрації води від основної маси аналізованої речовини. В хімічних методах використовується ефект взаємодії хімічного реагента та води. Дані два методи використовуються в лабораторних умовах, маючи при цьому високі метрологічні характеристики. Проте дані методи не відповідають таким наступним вимогам, як: можливістю безперервного контролю відповідного параметру, простим в експлуатації та наладці, а також головній вимозі використання його в умовах транспортування досліджуваної речовини.

Логічним буде припустити, що доцільно використовувати фізичні методи визначення вологості.

На виробництві та при транспортуванні і використовують саме ці методи. Проте якому методу надати перевагу. В приладів побудованих на основі фізичних методів є ряд переваг та недоліків. Дамо коротку характеристику переваг та недоліків фізичних методів визначення вологості.

При вимірюваних вологості за допомогою кондуктометричного методу використовуються мостові схеми вимірювання, що забезпечує високу чутливість та точність вимірювання. Проте в вологісній залежності кондуктометричного методу існує область нечутливості (рис. 1.2), коли при малих значеннях вологості 0 ч- 2 % не можливо виміряти вологість.

Використання НВЧ-вологомірів теж дає не погані результати, особливо не погано себе зарекомендували вологоміри фазового зсуву в порівнянні з вологомірами за послабленням. На їх точність менше впливають коливання хімічного складу досліджуваного матеріалу. Основним недоліком НВЧ-вологомірів вважається - складність апаратного оформлення.

Також непогано працюють вологоміри, що використовують ЯМР-явища. Ці прилади не прості в використанні, їм також притаманна - складність апаратного вирішення, крім того вони працюють в дискретному режимі, тобто їх не можна використовувати для неперервного вимірювання вологості.

Для діелькометричних вологомірів притаманне високі метрологічні характеристики, хоча слід зауважити, що в кондуктометричних вологомірів вони дещо кращі, якщо брати до уваги першу ділянку (див. Рисунок 1.2). Як видно з подальшого порівня, метрологічних характеристик діелькометричного та кондуктометричного методів, умовно кращими характеристики є у приладів побудованих на базі діелькометричного методу. Крім того область доцільного застосування кондуктометричного методу - вимірювання концентрації води в високозаводнених емульсіях, при вмісті води понад 50%. Як відомо водонафтова емульсія немає таких високих концентрацій води, концентрація води в водонафтовій емульсії не перевищує 10-15% в залежності від сорту нафти та степені її очистки.

Діелькометричні вологоміри мають наступні недоліки:

- виникнення додаткових похибок вимірювання діелектричних параметрів, обумовлене впливом на контрольовану рідину зовнішнього електричного поля;

- зміна потужності, внаслідок зміни активної складової контролюємої рідини;

- “вихід” частоти генератора внаслідок зміни характеристик елементів його електронної схеми.

Ці недоліки змусили розробників до пошуку подальших шляхів покращення діелькометричних вологомірів і пошуку інших принципів вимірювання вологості нафти. Одним з найбільш ефективним методом зменшення впливу неінформативних параметрів є багаточастотний спосіб вимірювання.

На основі теоретичного обґрунтування діелькометричного методу контролю вологості нафти розробити принципову електричну схему установки з розробкою первинного перетворювача.

Здійснити прив'язку первинного перетворювача установки з мікропроцесорним блоком.

Розробити конструкційні заходи для гальванічної розв'язки цифрового та вимірювального блоку. Розробити конструкцію установки з графічною розробкою корпусу та електронних вузлів.

Здійснити метрологічний аналіз вологоміра та розробити метрологічне забезпечення.

2 РОЗРОБКА УСТАНОВКИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ НАФТИ

2.1 Теоретичне обґрунтування та вибір методу контролю вологості нафти

Основою діелькометричного методу визначення вологості є залежність вологості від багатьох параметрів, що характеризують поведінку вологих матеріалів в електричних полях. Головною задачею цих методів є створення доволі точних математичних моделей вологого матеріалу, що описують залежність електричних властивостей матеріалу від його вологовмісту і інших параметрів, тобто є залежністю виду $e = f(W, z)$, первинного перетворювача вологоміра.

В діелькометричних вологомірах використовують середньохвильовий та короткохвильовий ($f = 0,3 \div 30$ МГц) діапазон частот або надвисокий частотний діапазон (НВЧ) електромагнітних коливань. В першому випадку геометричні розміри давача та інших елементів вимірювального кола значно менші від довжини хвилі і їх можна розглядати, як системи з сконцентрованими параметрами. При вимірюваннях в областях сантиметрових та міліметрових хвиль приходиться розглядати системи з розподіленими параметрами. Практично існує також проміжна область частот. Граничною частотою для системи з сконцентрованими параметрами можна вважати 100 МГц.

Поведінка діелектрика (водонофтова емульсія) в синусоїдальному електромагнітному полі характеризується макроскопічними величинами комплексними діелектричними ϵ^* та магнітними μ^* проникненостями [3]. У вологих матеріалів, що не містять ферромагнетиків, величина $\mu^* \approx \mu_0$ (магнітній проникненості вакууму) і їх електричні властивості в слабких змінах електричного поля можна описати двома параметрами, зв'язаних з ϵ^* . При вимірюванні вологості використовуються наступні пари величин:

дійсна ε' та уявна ε'' складає комплексної діелектричної проникненості $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$;

діелектрична проникненість ε та тангенс діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta$;

діелектрична проникненість ε і питома провідність (точніше, її активна складова) σ .

Залежність між цими величинами має наступний вигляд:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad \varepsilon'' = \frac{\sigma}{\omega} \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon'} \quad \varepsilon^* = \varepsilon(1 - j\operatorname{tg} \delta) \quad (2.1)$$

де ω - кутова частота.

Знаючи одну із вказаних пар параметрів, можна, відповідно, обчислити будь-яку іншу. Рідше користуються такими параметрами, як добротність $Q = 1/\operatorname{tg} \delta$ або активна σ' і реактивна σ'' складові комплексної провідності σ^* . При вимірюванні на надвисоких частотах інколи вводять із фізичної оптики комплексний показник заломлення $n^* = n - jk$ (n - показник заломлення, k - коефіцієнт поглинання), що зв'язаний з комплексною діелектричної провідністю співвідношенням Максвелла: $\varepsilon^* = (n^*)^2$.

Сучасна фізика діелектриків зв'язує залежність ε та $\operatorname{tg} \delta$ матеріалів від їх властивостей з основним процесом, що відбувається в будь-якому діелектрику під дією електричного поля, - поляризацією частинок діелектрика.

В гетерогенних системах поляризація має неоднаковий характер для різних фаз і для всієї системи в цілому. На характеристики системи здійснює вплив також подвійний електричний прошарок, що визначається наявністю заряду на поверхні розділу двох середовищ, що мають різні електричні властивості (ε та σ).

Розглянемо в електричній формі процеси поляризації і електричні властивості основних компонентів вологих матеріалів.

Вода та лід належать до полярних речовин з ярко вираженими явищами діелектричної релаксації. В таких речовин при зростанні частоти поля діелектрична проникненість вимірюється від значення ε_0 при нульовій частоті (статична діелектрична проникненість) до значення ε_∞ при нескінченно великій частоті (оптична діелектрична проникненість), проходячи через область

аномальної діелектричної дисперсії. В область дисперсії залежність $tg \delta(\omega)$ має екстремум (максимум) при частоті, рівній критичній частоті ω_C ; абсцисі рівній ω_C , відповідає точка перегину залежності $\varepsilon(\omega)$. Час релаксації $\tau=1/\omega_C$ рівний часу, під час якого після моменту зняття зовнішнього поля поляризація зменшиться до величини $1/e$ від попереднього значення.

За Дебаєм частотна залежність діелектричної проникненості при релаксаційному поглинанні описується наступними рівняннями:

$$\varepsilon^* - \varepsilon_\infty = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (2.2)$$

звідси

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (2.3)$$

та

$$\varepsilon'' = (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (2.4)$$

Зі співвідношення (2.4) можна визначити максимальне значення ε'' :

$$\varepsilon''_{\max} = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{2} \quad (2.5)$$

Для води при кімнатній температурі критична частота знаходить в діапазоні сантиметрових хвиль. Обрахована за формулою Дебая критична довжина хвилі, відповідає часу релаксації, $\lambda_C = 1\text{см}$; згідно експериментальних даних при температурі $t=20^\circ\text{C}$ $\lambda_C=1,74\text{см}$. значення ε та $tg \delta$ чистої води при температурі $t = 25^\circ\text{C}$, змінюється в широкому діапазоні частот, і наведена в табл. 2.1 [4].

В діапазоні частот $10^5 < f < (10^7 \div 10^8)$ Гц значення ε чистої води при кімнатній температурі зазвичай близько 80.

Значення ε_∞ вважають рівним 5,5, хоча за даними деяких дослідників більш точним значенням ε_∞ рівним 4,5 або 4,9.

Таблиця 2.1 Діелектричні параметри води

Параметр води	Частота, Гц
---------------	-------------

при 25 °С	10^5	10^6	10^7	10^8	$3 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^9$	10^{10}	$2,5 \cdot 10^{10}$
ε	78.2	78.2	78.2	78.0	77.5	76.7	55.0	34.0
$10^4 \cdot tg \delta$	4000	400	46	50	160	1570	5400	2650

Приведені дані відносяться до води, що знаходиться в вільному стані. При зв'язуванні води вона втрачає рухомість в електричному полі і її діелектрична проникність зменшується по мірі збільшення енергії зв'язку. Для найбільш сильної форми зв'язку - хімічного - вважають діелектричну проникненість води $\varepsilon_{св} \approx \varepsilon_{\infty}$.

Електричні властивості води різко змінюється при зміні її агрегатного стану, ε та $tg \delta$ льоду залежить від частоти струму, температури і наявності домішок в воді і дуже сильно відрізняються від параметрів рідкої води. На надвисоких частотах в діапазоні температур мінус 50 °С до 0 °С для льоду $\varepsilon = 3,05$ (при довжині хвилі $\lambda = 3$ см) та 3,17 (при $\lambda = 1,25$ см).

Близькість значень електричних параметрів льоду та сухої речовини (рис. 2.1) має важливе значення для визначення вмісту вологи в твердій фазі неможна використовувати діелькометричний метод.

При відсутності вологи капілярнопористі та рідкі неполярні та слабополярні речовини мають дуже низьку діелектричну проникненість та малі діелектричні втрати. В табл. 2.2 приведені середні значення ε різних вологовмістних матеріалів в зневодненому при кімнатній температурі. Результати вимірювання електричних параметрів матеріалів, отриманими різними дослідниками, часто відрізняються внаслідок використання різних методик вимірювання і різних використовуваних зразків.

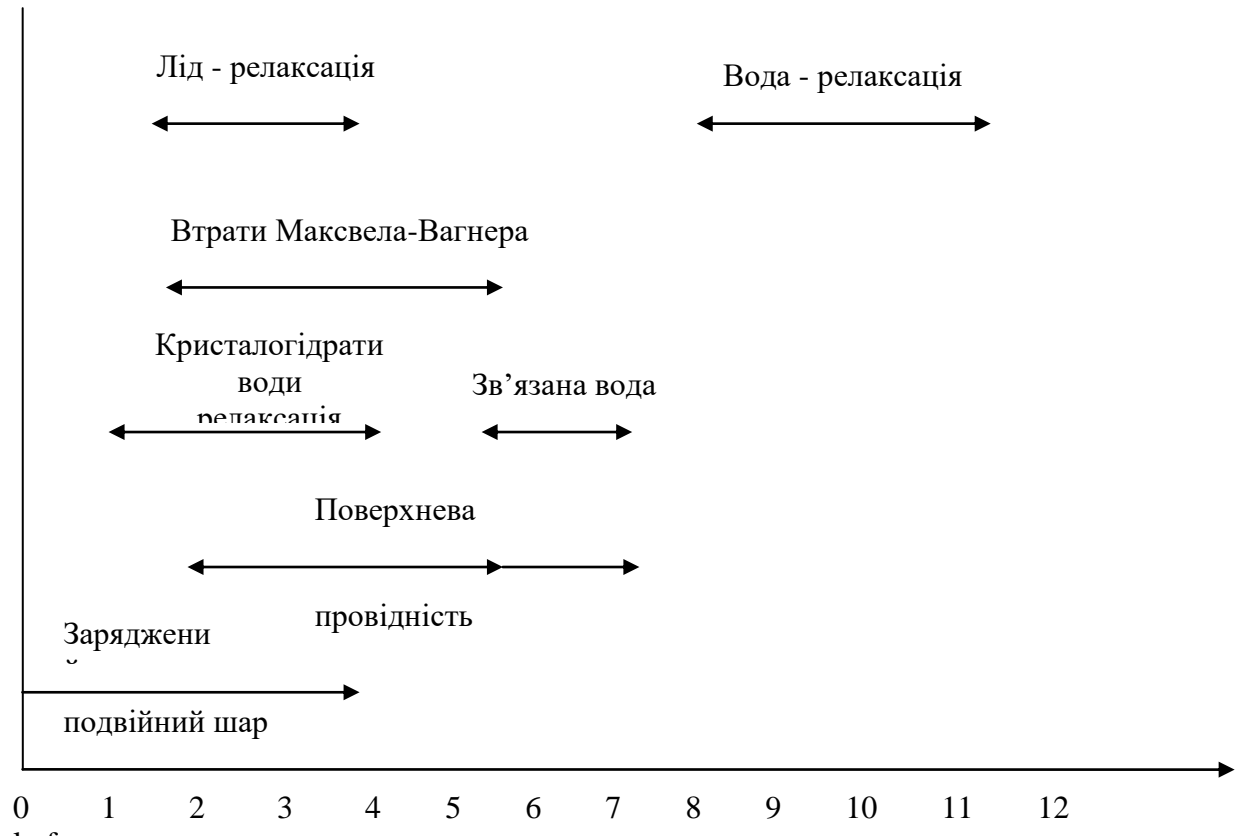


Рисунок 2.1- Протікання процесу утворення диполів

Таблиця 2.2 Значення діелектричної проникненості деяких матеріалів

Матеріал	ϵ	Матеріал	ϵ
Шкіра	1,3	Вугілля	2,5
Нафта	2,0÷2,7	Тваринні жири	3÷3,5
Папір	1,5÷3	Деревина	1,6÷4
Бавовняна тканина	2÷2,5	Гіпс	5,5
Мінеральні та рослинні масла	2÷3	Кам'яна сіль	5÷6

Тому дані табл. 2.2 можна розглядати, як приблизні, в той же час вони показують велику різницю води від інших сухих матеріалів.

Наявність вологи здійснює великий вплив на поляризацію неоднорідних діелектриків складного складу, якими є вологі матеріали.

В загальному випадку в складному діелектрику можуть мати місце наступні основні види поляризації: електрона, іона, дипольна, структурна та внутрішарова. В залежності від особливостей матеріалу різні види поляризації можуть мати більшу чи меншу вагу, а деякі із них можуть і зовсім бути відсутніми. Сумарна поляризація речовини представляє собою суму всіх видів поляризації, що присутні в матеріалі. Втрати течі є лише однією із складових сумарних втрат в змінному полі, додаткові втрати викликані саме різними видами поляризації. Схема заміщення досліджуваного діелектрика містить геометричну ємність (ємність, відповідає полю електродів електродів в вакуумі) в сумі ємностей, обумовлених різними видами поляризації (рис.2.2).

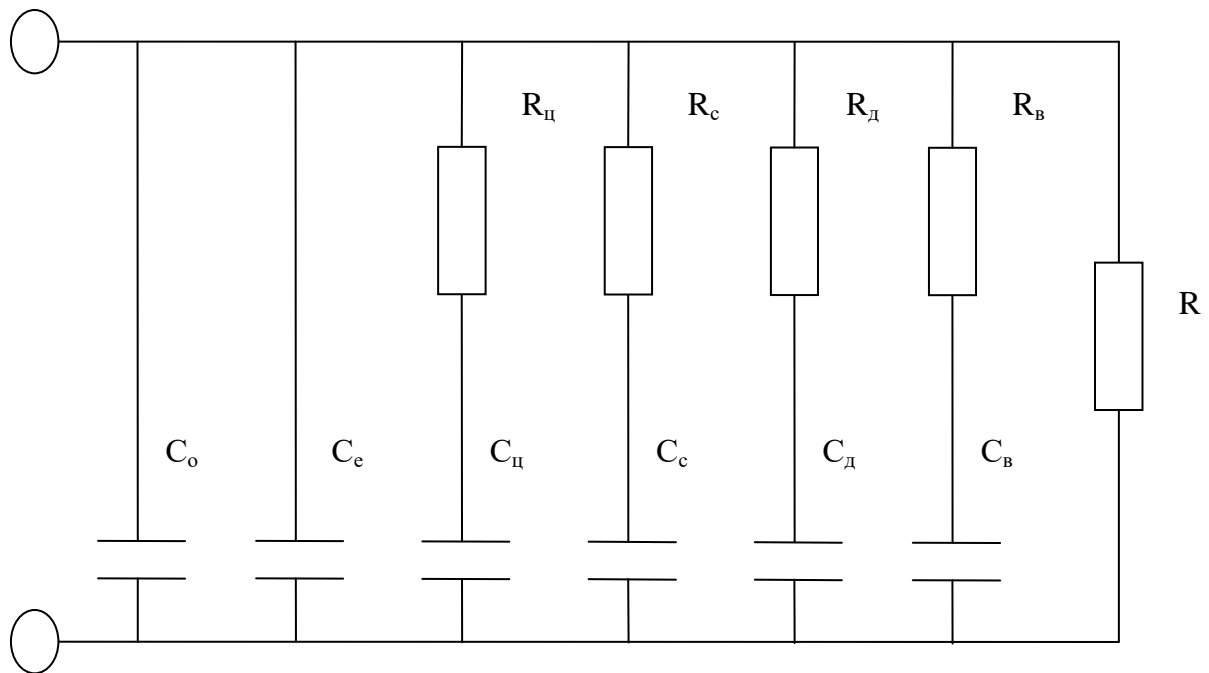


Рисунок 2.2 - Схема заміщення діелькометричного датчика

Останні ємності (крім ємності електронної поляризації) в схемі заміщення мають послідовний опір, що враховує втрати за рахунок цих видів поляризації. Крім того, в схемі введено активний опір, величина якого залежить від наскрізного струму провідності між електродами.

Таким чином, поляризація вологовмісного матеріалу має складний характер, і у всіх випадках повний опір давача з матеріалом є комплексною величиною.

Поляризація при змінному струмі визначає комплексну провідність діелектрика: реактивна складова останньої зв'язана з діелектричною проникністю, активна - з діелектричними втратами.

Друге важливе для вимірювання явище поляризації матеріалів полягає в чіткій залежності їх електричних параметрів від частоти поля.

В багатьох капілярнопористих матеріалах область дисперсії значно ширша, чим по Дебаю, і критична частота матеріалу в цілому відрізняється від критичної частоти води, що включена в непровідне і нерелаксаційне середовище (суха речовина). Інколи спостерігається більше однієї області дисперсії і відповідно більше одного екстремуму ϵ''

В гетерогених системах, що містять воду, необхідно додатково приймати до уваги наступні фактори [4]:

наявність подвійного поляризаційного шару частинок, в наслідок якого можуть з'являтися значення ϵ значна більші, ніж у води; висока поверхнева провідність частинах чи домішок.

З врахуванням вказаних ефектів, приводимо характеристику факторів, що зумовлюють діелектричні втрати в гетерогених системах в широкому діапазоні частот.

В області низьких частот має місце накладання багатьох факторів, а в діапазоні НВЧ (понад 10^9 Гц) основним видом є релаксаційні втрати, пов'язані з поляризацією вільної води. Це поєднує різниці в характеристиці діелькометричного методу, що відповідає різним діапазонам частот.

Принцип роботи діелькометричного методу, з врахуванням вище сказаного, оснований на тому, що діелектрична проникненість ϵ та тангенс діелектричних втрат $\tan \delta$ твердих капілярно-пористих та рідких речовин, відносяться з точки зору фізики діелектриків до макроскопічних неоднорідних діелектриків, що в великій мірі залежать від їх вологості. Зв'язок між цими величинами визначається комплексною діелектричною провідністю (2.1).

Очевидно, що і ємнісний перетворювач, заповнений вологовмісною речовиною, повинен характеризуватися комплексною електричною ємністю, чисельне значення якого залежить від вологості матеріалу.

Зв'язок між вимірювальним параметром дослідної речовини (ε , $\text{tg } \delta$) і вологовмістом можна отримати з розрахунку електричних параметрів вологого матеріалу за формулою [3]

$$\varepsilon_B^* = \varepsilon_2^* \left(1 + \frac{\varepsilon_1^* - \varepsilon_2^*}{a\varepsilon_1^* + b\varepsilon_2^*} \cdot \frac{\rho}{\rho_B} \cdot \frac{W}{100} \right) \quad (2.6)$$

де ε_B^* - комплексна діелектрична проникненість вологого матеріалу;

ε_1^* - комплексна діелектрична проникненість поглинутої матеріалом води;

ε_2^* - комплексна діелектрична проникненість сухого матеріалу; ρ - густина матеріалу; ρ_B - густина води; W - вологість досліджуваного матеріалу;

a та b - постійні коефіцієнти (для багатьох матеріалів $a = 0,01 \div 0,03$; $b = 0,5 \div 1,5$).

Більшість капілярно-пористих матеріалів є хорошими діелектриками, їх діелектрична проникненість $\varepsilon_2' = 1 \div 6$, в той же час як у води, що володіє значною електропровідністю, діелектрична проникненість $\varepsilon_1' = 81$. Таким чином, присутність води в твердому або рідкому матеріалі повинно в значній мірі впливати на величину комплексної діелектричної проникненості ε_B^* .

Якщо $\varepsilon_2^* = \varepsilon_2' = \varepsilon_2$, а $\varepsilon_1^* = \varepsilon_1' - j\varepsilon_1'' = \varepsilon_1 - j \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right)$, то ε_B^* можна представити в

вигляді:

$$\varepsilon_B^* = \varepsilon_M + \frac{\Delta \varepsilon_p}{1 + j\omega \tau_p} \quad (2.7)$$

де

$$\varepsilon_M = \varepsilon_2 \left(1 + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{a\varepsilon_1 + b\varepsilon_2} \cdot \frac{\rho}{\rho_p} \cdot \frac{W}{100} \right) \quad (2.8)$$

$$\Delta \varepsilon_p = \frac{\varepsilon_2^2 (a+b)}{a(a\varepsilon_1 + b\varepsilon_2)} \cdot \frac{\rho}{\rho_p} \cdot \frac{W}{100} \quad (2.9)$$

$$\tau_p = \frac{\varepsilon_0 (a\varepsilon_1 + b\varepsilon_2)}{a\sigma} \quad (2.10)$$

З виразу (2.7) можна отримати зв'язок між вимірюваними значеннями діелектричної проникненості ε'_B вологого матеріалу, тангенсом діелектричних втрат вологого матеріалу $\operatorname{tg} \delta_B$ і вологовмісту що входить в вирази (2.8 - 2.10), отримаємо:

$$\varepsilon'_B = \varepsilon_M + \frac{\Delta\varepsilon_p}{1 + \omega^2 \tau_p^2} \quad (2.11)$$

$$\operatorname{tg} \delta_B = \frac{\Delta\varepsilon_p \omega \tau_p}{\varepsilon_M (1 + \omega^2 \tau_p^2) + \Delta\varepsilon_p} \quad (2.12)$$

Підставляючи значення ε_M , $\Delta\varepsilon_p$ та τ_p , виражені через параметри сухого матеріалу та води, в формули (2.11) та (2.12) вологого матеріалу, отримаємо зв'язок між вологовмістом W та вимірювальними параметрами ємнісного перетворювача:

$$\varepsilon'_B = \varepsilon_2 + \frac{\varepsilon_2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{a\varepsilon_1 + b\varepsilon_2} \cdot \frac{\rho}{\rho_p} \cdot \frac{W}{100} + \frac{\varepsilon_2^2(a+b)\sigma^2 a}{(\sigma^2 a^2 + \omega^2 \varepsilon_0^2)(a\varepsilon_1 + b\varepsilon_2)} \cdot \frac{\rho}{\rho_p} \cdot \frac{W}{100} \quad (2.13)$$

$$\operatorname{tg} \delta_B = \frac{\omega \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_2^2}{a^2 \sigma} (a+b) \cdot \frac{\rho}{\rho_p} \cdot \frac{W}{100}}{\varepsilon_2 \left(1 + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{a\varepsilon_1 + b\varepsilon_2} \cdot \frac{\rho}{\rho_p} \cdot \frac{W}{100} \right) \left(1 + \omega^2 \frac{\varepsilon_0^2 (a\varepsilon_1 + b\varepsilon_2)^2}{a^2 \sigma^2} \right) + \frac{\varepsilon_2^2(a+b)\rho W}{100a(a\varepsilon_1 + b\varepsilon_2)\rho_B}} \quad (2.14)$$

Характеристики, що використовуються в дієлькометричному методі, залежні від приведених електричних параметрів матеріалу від його вологості, властивостей та стану, а також умов проведення вимірювання [6]:

вологісні характеристики електричних параметрів матеріалу - залежність ε та $\operatorname{tg} \delta$ або інших параметрів, в тому числі і комплексних, від його вологості W при постійних значеннях частоти поля, температури матеріалу, степінь згущення (для дисперсних матеріалів) і інші величини, впливаючі на результати вимірювання;

частотні характеристики - функції $\varepsilon(f)$ і $\operatorname{tg} \delta(f)$ при постійності W , t та інших величин, характеризують стан матеріалу;

температурні характеристики - функція $\varepsilon(f)$ і $\operatorname{tg} \delta(f)$ при постійності W , f і інших факторів;

характеристики, що описують залежність електричних параметрів матеріалу від його складу, густини, поширенню вологи і тому подібне.

Вологісні характеристики служать основою градування вологомірів і в значній мірі визначають їх метрологічні характеристики. Лінійні вологісні характеристики мають небагато матеріалів. До них відносяться деякі рідкі діелектрики, в твердих діелектриках такий характер залежності зустрічаються рідше і тільки для вузьких діапазонів вологовмісту.

В переважній більшості матеріалів ε і $\operatorname{tg} \delta$ збільшуються з ростом вологості швидше, чим би це відповідало лінійному закону, відносна крутизна характеристики $\operatorname{tg} \delta(W)$, як правило, більша, ніж характеристика $\varepsilon(W)$.

Залежність $\varepsilon(W)$ при різних умовах вимірювання можна описати монотонно зростаючою функцією, в широкому діапазоні вологовмісту їх можна апроксимувати ломаною прямою, що складається з двох відрізків з одною спільною - критичною вологістю $W_{\text{кр}}$ (рис. 2.3).

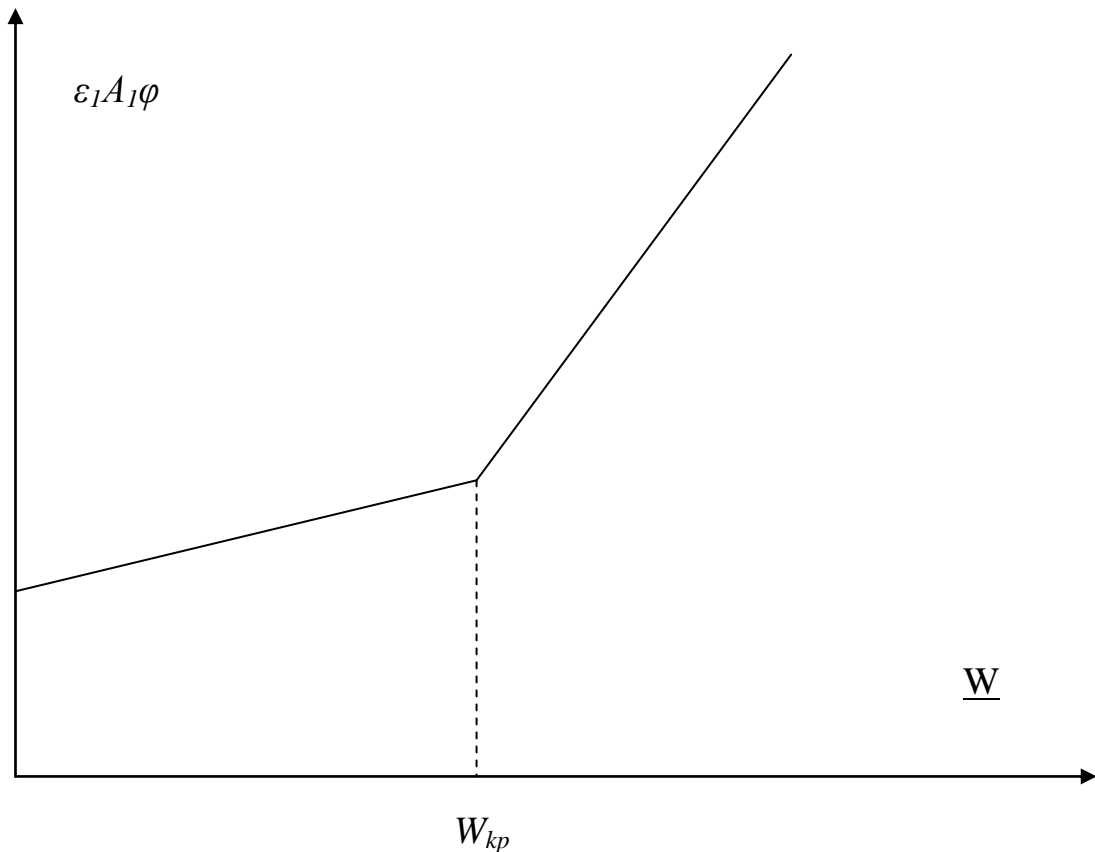


Рисунок 2.3 - Критична крива утворень диполів

На ділянці $W < W_{кр}$ крутизна характеристики (і відповідно і чутливість вологоміра) значно менша, ніж на ділянці $W > W_{кр}$. Такий характер був встановлений для залежності $\epsilon'(W)$ і $\epsilon''(W)$ багатьох матеріалів при частотах порядку декількох мегагерц та на НВЧ. Сингулярна точка (з абсцисою, рівною $W_{кр}$) приблизно відповідає переходу від мономолекулярного шару до води полімолекулярної адсорбції. В областях $W < W_{кр}$ енергія зв'язку води дуже значна і діелектрична проникненість, визначається в основному електронною та атомною поляризацією, мала і в основному залежить від ϵ сухого матеріалу. В області переважання вільної води $W > W_{кр}$ відбувається плавне зменшення енергії зв'язку, збільшення рухливості молекул води і зв'язане з цим збільшення діелектричної проникненості системи.

Характеристика матеріалів, що складаються з компонентів, різних за своїми водоутримуючими властивостями (і відповідним їм енергії води), можуть мати більше однієї сингулярної точки. На розміщення цієї точки

здійснює деякий вплив також ступінь дисперсності системи і частота поля. Що стосується абсолютних величин значень ϵ' та ϵ'' , то при постійній частоті вони визначаються (особлива в області $W > W_{кр}$) не стільки електричними параметрами сухого матеріалу, як його водоутримуючими властивостями та пористою структурою.

При порівнянні залежності $\epsilon'(W)$ та $\epsilon''(W)$ різних категорій твердих матеріалів (макропористих, полікапілярних, колоїдних- капілярнопористих та колоїдних) спостерігається зміщення цих характеристик в сторону осі по мірі збільшення активної поверхні (площі поверхні мікро- і макрокапілярів). Вище інших проходять криві $\epsilon'(W)$ та $\epsilon''(W)$ піску та гравію, які майже не мають води мікропор та адсорбованої. Повністю закономірно також збільшення критичної вологості $W_{кр}$ з збільшенням гігроскопічності

На рис. 2.4 [7] приведені вологісні характеристики в різних, далеких один від одного діапазонах частот. На рис. 2.4 приведені експериментальні залежності $\epsilon(W)$ і $\text{tg } \delta(W)$, отримані на частоті 500 кГц, а на рис. 2.5 - залежності $\epsilon'(W)$ і $\epsilon''(W)$ на частоті 9,4 ГГц для групи типових матеріалів, що відрізняються гігроскопічними властивостями

Частотні характеристики вологовмісту матеріалів має форму, обумовлену неодинаковим впливом частоти на різні види поляризації. Цей вплив різний в залежності від вмісту, стану та форми зв'язку води в матеріалі. Характеристика природи діелектричних втрат в широкому діапазоні частот показує, що в області низьких частот переважаюче значення має втрати пов'язані прямою провідністю. В цьому діапазоні значень ϵ визначається головним чином повільними видами поляризації, тут велике значення має поверхнева провідність.

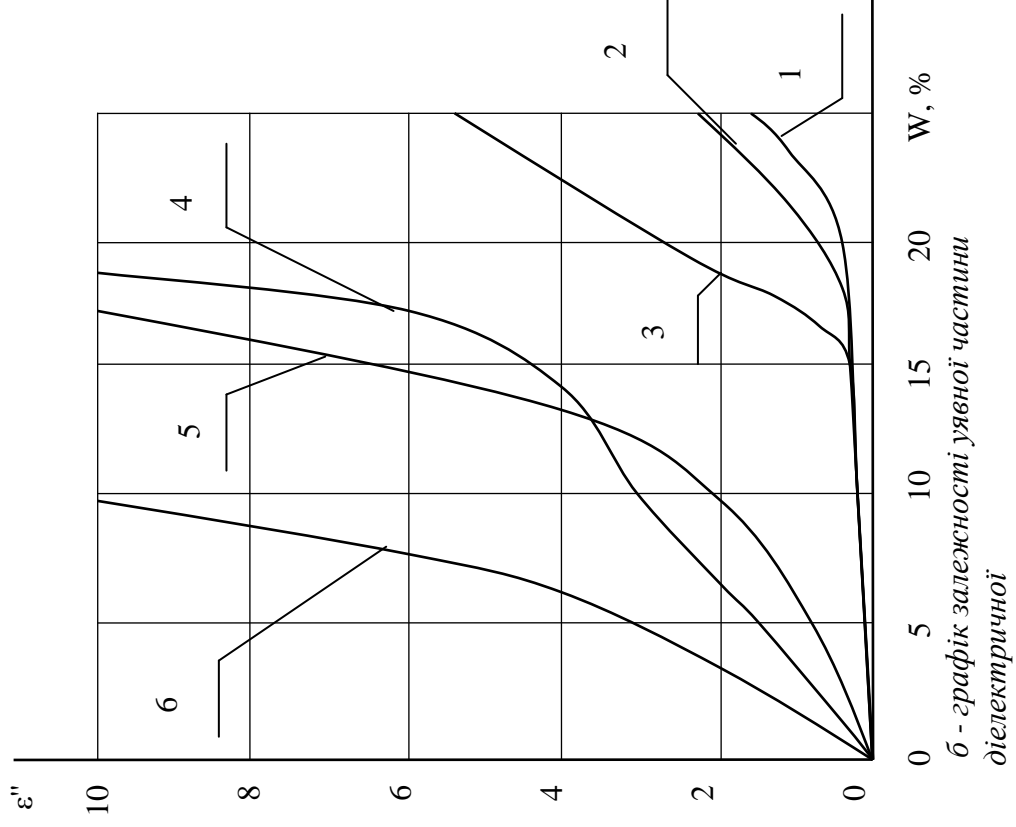
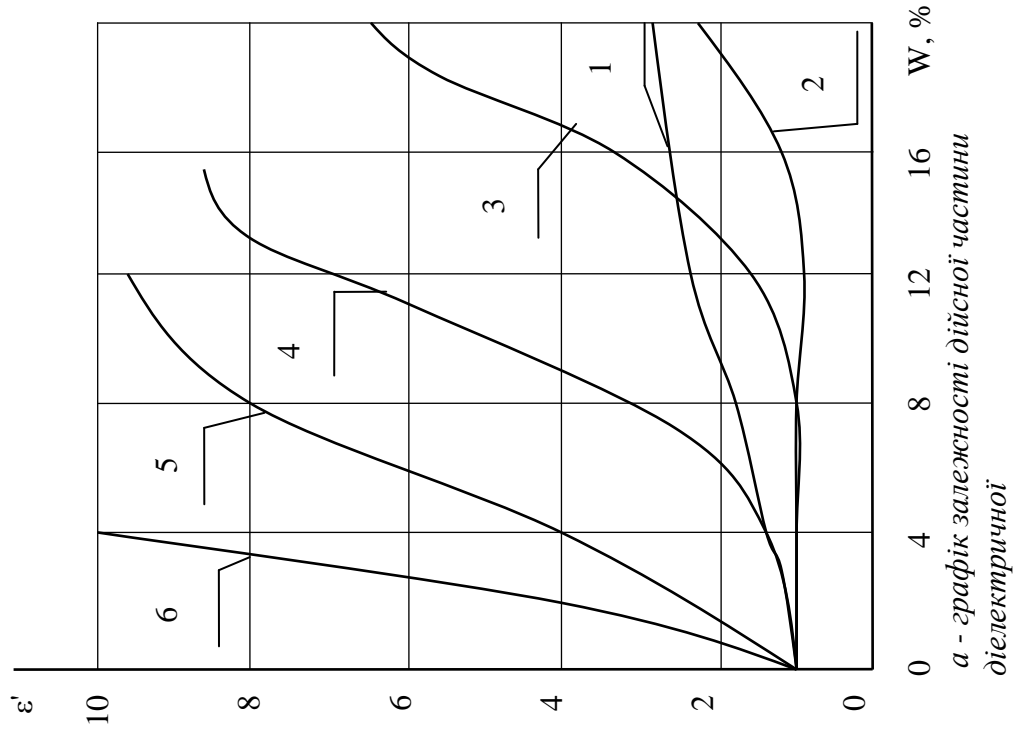


Рисунок 2.4 - Поводження деяких типових речовин при вимірюванні вологості діелектричним методом

2.2 Розробка принципової схеми приладу

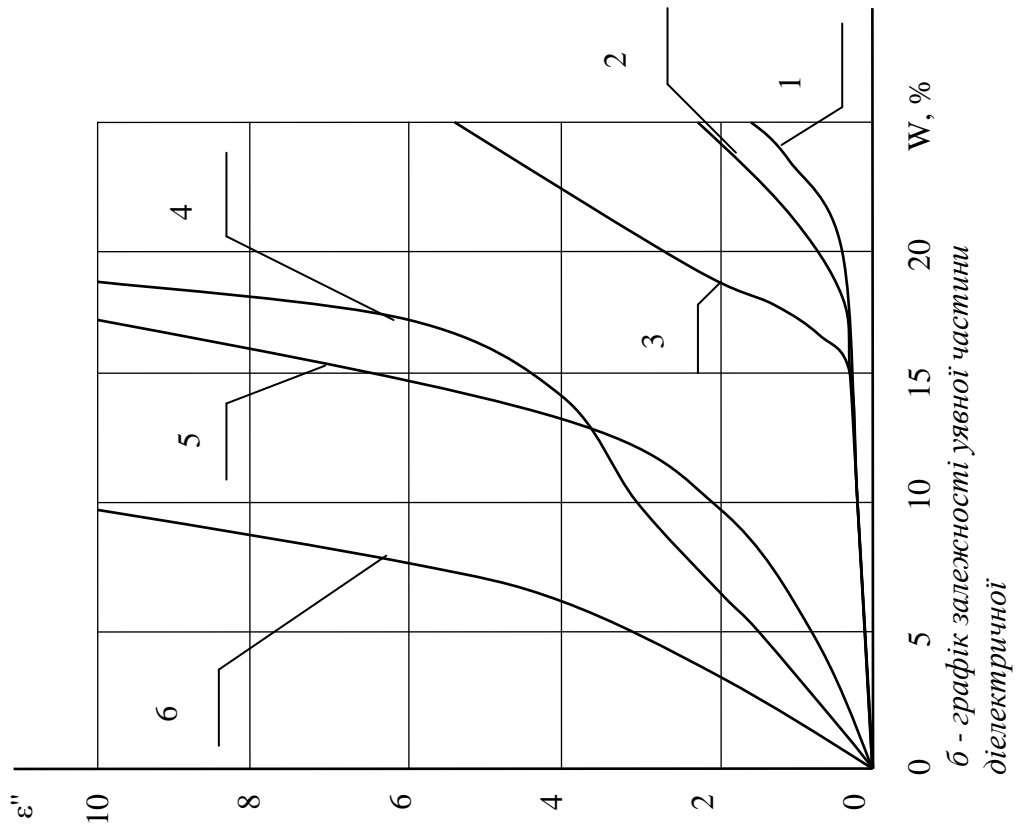
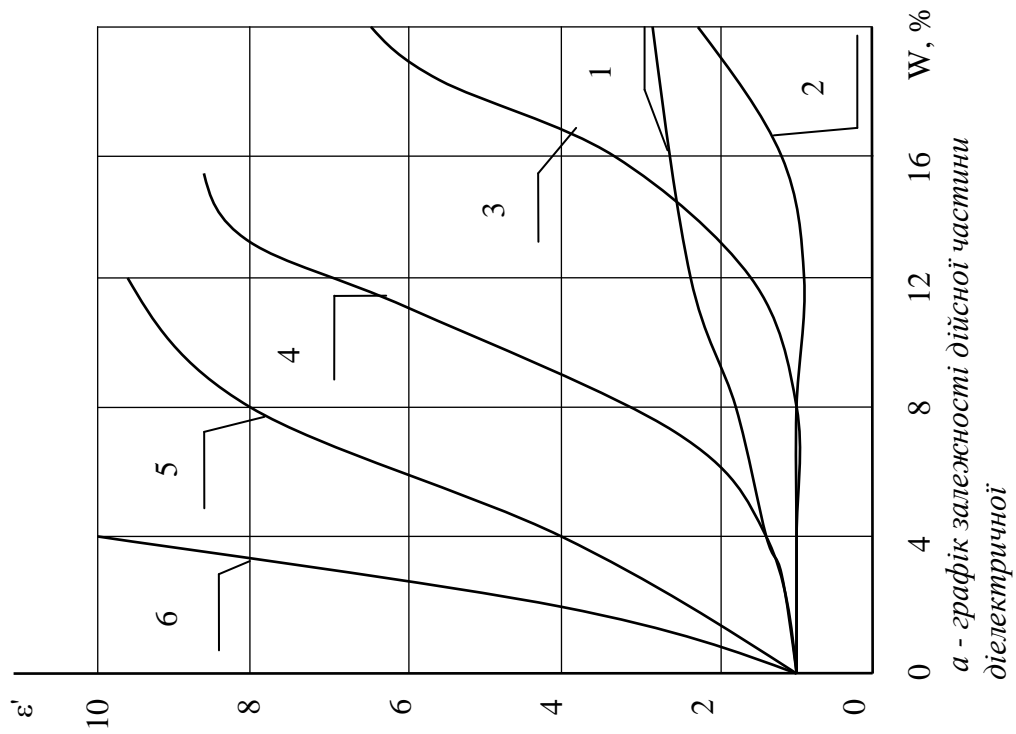


Рисунок 2.5 - Поводження деяких типових речовин при вимірюванні НВЧ вологометрії

Спочатку розроблено структурну схему діелькометричного вологоміра, яка зображена на аркуші МР.МТТм -06.00.00.000С1.

Познайомившись, з особливостями методу вимірювання вологості перейдемо до розробки принципової схеми приладу. Проектований вологомір нафти буде складатися з наступних блоків, а саме з аналогового блоку та блоку цифрової обробки інформації. До аналогового блоку входять такі блоки:

генератор синусоїдальних коливань, діелькометричний перетворювач, вимірювальний міст, диференційний підсилювач, лінійний підсилювач, детектор. До цифрового блоку обробки інформації - аналого-цифровий перетворювач, пристрій обробки інформації, пристрій передачі інформації, блок індикації. До вимірювального приладу входить також блок живлення, хоча він позначається на принциповій схемі.

Генератор синусоїдальних коливань служить для живлення вимірювальної схеми вологоміра нафти. Сигнал з генератора поступає на первинний перетворювач 2. Який в свою чергу ввімкнений в вимірювальне плече вимірювального моста 3. Інше плече становить набір змінних та постійних резисторів та конденсаторів для компенсації вимірювального сигналу в певних реперних точках, при вологості 0, 10, 20, 40 %. При настройці вологоміра на певний діапазон вимірювання з вимірювального моста можна знімати напругу розбалансу. Що прямо пропорційна вологості досліджуваного матеріалу в певному діапазоні.

Далі сигнал розбалансу потрапляє на диференційний підсилювач 4, що виконує по відношенню до нього математичну операцію віднімання у відповідності до формули (2.15).

$$U_{Вх}=U_2-U_1 \quad (2.15)$$

де U_1 - значення падіння напруги на плечі компенсації; U_2 - значення падіння напруги на вимірювальному плечі.

Диференційний підсилювач не може забезпечити достатній коефіцієнт підсилення вихідного сигналу по напрузі тому потрібно використовувати додатковий лінійний підсилювач низької частоти 5.

Після підсилення вихідного сигналу до потрібного рівня потрібно провести детектування з використанням детектора 6. Детектором може служити високочастотний випрямний діод. Детектор потрібний для того, щоб перетворити змінний вихідний сигнал з підсилювача постійний сигнал для оцифрування за допомогою аналого-цифровим перетворювачем 7.

За допомогою АЦП проводимо оцифрування вихідного сигналу, зробивши таким чином доступним для подальшої цифрової обробки. Подальша цифрова обробка полягає в безпосередній індикації отриманого результату за допомогою пристрою індикації 10 та передачі отриманих даних для подальшого використанні в автоматизованих системах управління виробничими процесами за допомогою передавального пристрою 9. Вся робота пов'язана з цифровою обробкою даних покладається та виконується пристроєм обробки даних 8, що є по суті програмованим мікроконтролером.

Нормальна робота всіх вище описаних блоків вологоміра забезпечується за допомогою стабілізованого блоку живлення з стабілізацією напруг живлення на ± 15 В та на ± 5 В.

Приступимо до розробки кожного вище описаного блоку.

2.3 Розробка первинного перетворювача дієлькометричного вологоміра нафти

Приступимо до розробки первинного перетворювача для дієлькометричного вологоміра нафти, виходячи з наступних вимог: перетворювач працюватиме під робочим тиском нафти 4 МПа, прилад розробляється для використання в умовах видобутку, транспортування та переробки нафти, тому повинен легко монтуватися та підлягати ремонту в великій мірі, при монтажі потрібно передбачити легкість встановлення перетворювача на транспортні трубопроводи.

Виходячи з поставленого завдання робимо висновок, що прилад буде побудований з використанням трубної арматури. Перетворювач складається з корпусу, електрода, фланця-заглушки, фланця, ущільнювача, заглушки,

накидної гайки, вузла з'єднання, перехідника та кріпильних елементів. Складальне креслення перетворювача приведено на аркуші МР.МТТм - 06.01.01.000 СК.

Користуючись [13] вибираємо зовнішній діаметр труби $\text{Ø}184$ мм та товщину стінки 10 мм, даний сорт труб широко використовується для транспортування нафти під тиском до 10 МПа. Довжина корпусу перетворювача 800 мм. В середині корпусу встановлений електрод з зовнішнім діаметром труби $\text{Ø}42$ мм [13]. Відстань між вхідними та вихідним отворами рівна 500 мм, що дозволяє вільний доступ при монтажі перетворювача на відвід транспортного трубопроводу, приєднання фланців, перехідників та патрубків відбувається за допомогою зварювання згідно [14], докладніші технічні вимоги приведені на аркуші МР.МТТм -06.01.01.002 СК.

Складання перетворювача відбувається наступним чином. Закріпивши, електрод 9 в внутрішньому отворі ущільнювача 4 встановлення електроду передбачається з натягом. Ущільнювач разом електродом встановлюють в патрубок фланця 3, таке встановлення відбувається з натягом, оскільки ущільнювач має невелику конусність, а також володіє доволі великою пластичністю, що вберігає його від пошкоджень типу тріщин. Фланець монтується на корпусі перетворювача за допомогою кріпильних елементів. Фланець-заглушка служить для контролю співвісності електрода з віссю корпусу та для поточного ремонту перетворювача кріпиться до корпусу перетворювача за допомогою кріпильних елементів. Встановлення перехідника 6 відбувається на різьбове з'єднання на електроді 9, далі одівається ізолююча прокладка 5. Основне призначення ізолюючої прокладки 5 ізоляція корпусу від електрода, оскільки однією обкладкою конденсатора-перетворювача є корпус - це є доцільно. На перехідник одівається накидна гайка 8, яка водночас фіксує ущільнювач з електродом, а також є основою для встановлення вузла з'єднання 1 в якому міститься плата трьох затискної схеми передачі вимірювальної величини.

Сам перетворювач в зібраному вигляді може кріпитися в вертикальному вигляді за допомогою кріпильних елементів до відводу транспортного трубопроводу, як це показано на аркуші МР.МТТм -06.00.002. Або ж аналогічно в горизонтальному положенні - просторове розміщення не впливає на роботу та точність вимірювання вологості нафти. Проте в даному випадку потрібно пам'ятати про можливість налипання осаду на електроді. При такому просторовому розміщенні перетворювача слід збільшити кратність ремонтів перетворювача, особливо коли давач встановлений в місцях видобування нафти.

Слід, особливо, пам'ятати про вхідні і вихідні отвори. Входом перетворювача вважається фланець який розміщений найближче до точки кріплення електрода в ущільнювачі. Це пов'язано з механічною дією тиску нафти на електрод, що викликає згин електрода. Що в свою чергу приводить до збільшення похибки перетворювача.

2.4 Розробка та розрахунок вузлів проектного приладу

2.4.1 Розробка та аналіз електричних блоків схеми

Аналізуючи електричну принципову електричну схему приведену на аркуші МР.МТТм-06.01.01.000 ЕЗ, ми можемо зробити висновок, що приведена електрична схема повністю відповідає приведеній на аркуші МР.МТТм-06.00.00.000С1 структурній схемі.

Аналізуючи, схему можемо зробити висновок, що найбільш високі вимоги ставляться до вимірювального мосту, що забезпечує високу точність вимірювання вологості нафти в певному діапазоні. Для перемикачів по діапазонах використані фіксуючі малопотужні та малогабаритні кнопки перемикачі SA1 (П2КЛ-4) для перемикачів в діапазоні 0, 10, 20, 40 % вологості. А також для забезпечення вимірювання різних сортів нафти згідно ГОСТ 14203-69 [15], передбачений перемикач аналогічної будови SA2 (П2КЛ-2) для перемикачів між вимірюваннями двох різних сортів нафти. Таке

використання перемикачів SA1 та SA2 дозволяє зменшити похибку вимірювання та підвищити достовірність результатів вимірювання.

2.4.2 Розрахунок блоку живлення

Для нормальної роботи проектованого приладу потрібно забезпечити електроні вузли дієлькометричного вологоміра потрібними напругами живлення, як було проаналізовано вище прилад використовує дві стабілізовані напруги живлення ± 15 В та ± 5 В, отож блок живлення буде складатися з двох різних електричних схем стабілізованого живлення (рис. 2.6). Для отримання напруги живлення ± 15 В використаємо електричну принципову схему компенсаційного стабілізатора на транзисторах і проведемо його розрахунок [8], для отримання напруги живлення ± 5 В використаємо інтегрований стабілізатор напруги на основі мікросхеми К 142 ЕН1.

Проведемо розрахунок стабілізатора послідовного типу на транзисторах з наступними вихідними даними: номінальна напруга мережі живлення $U_C=220$ В; частота $f=50$ Гц; межі зміни напруги мережі $a_c=b_c=0,1$; номінальна вихідна напруга $U_H=15$ В; допустиме встановлюване відхилення $\Delta U_H = \pm 1$ В; номінальний струм навантаження $I_H = 0,7$ А; межі зміни струму навантаження $I_{H \min} = 0,5$ А та $I_{H \max} = 1$ А; коефіцієнт стабілізації при зміні напруги мережі $K_{ст} \geq 500$, внутрішній опір $r_H \leq 0,7$ Ом; амплітуда пульсації вихідної напруги $U_{H\sim} \leq 3$ мВ; температура навколишнього середовища $T_{c \max} = 60^\circ\text{C}$, $T_{c \min} = -10^\circ\text{C}$, максимальне температурне відхилення напруги $\delta U_{H.T.} = 0,12$ В; $\delta U_{H.\text{доп}} = 0,05$ В.

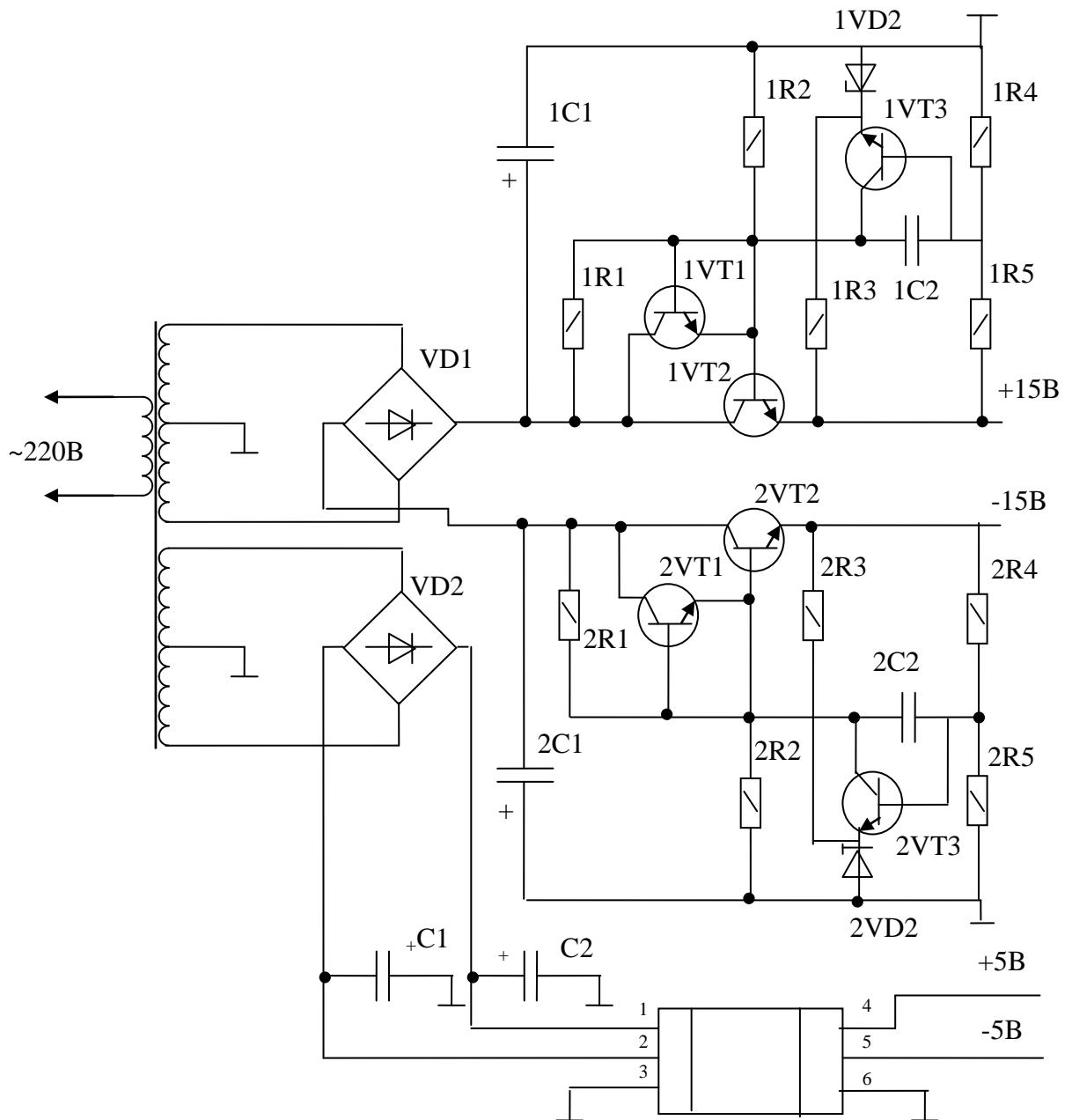


Рисунок 2.6 - Принципова електрична схема біполярного блоку живлення

Вибираємо в ролі регулюючого елемента VT2 (рис. 2.5) транзистор типу КТ817А з параметрами [10]. $I_{к\text{ max}}=3\text{A}$, $U_{ке\text{ max}}=25\text{В}$; $P_{к\text{ max}}=14\text{ Вт}$, $h_{21\text{ e min}}=25$, $I_{кб}=0,4\text{мА}$. При заданому струмі навантаження $I_{н\text{ max}}=1\text{А}$ приймаємо напругу насичення на транзисторі $U_{ке\text{ нас}}=3\text{В}$, а максимальний рівень пульсації вихідної напруги $U_{н\sim}=0,15\text{В}$.

Визначимо вихідну напругу живлення:

$$U_{n.\max} = \frac{(U_{ke.\max} + U_{n.\infty} + U_n) \cdot (1 + a_c)}{(1 - b_c)} \quad (2.16)$$

$$U_{n.\max} = \frac{(3B + 0.15B + 1B) \cdot (1 + 0,1)}{(1 - 0,1)} = 23,4 \text{ В}$$

$$U_n = \frac{U_{n.\max}}{(1 + a_c)} \quad (2.17)$$

$$U_n = \frac{23,4}{(1 + 0,1)} = 21,27 \text{ В}$$

$$U_{n.\min} = U_n \cdot (1 - b_c) \quad (2.18)$$

Отже, в ролі випрямляча напруги беремо діодний міст, складений з діодів КД 202 А.

Максимальна потужність, що розсіюється на регулюючому транзисторі:

$$P_{T\max} = (U_{K\max} - U_K - \Delta U_K) \cdot I_{R\max}$$

$$P_{T\max} = (19,7 - 12 - 1) \cdot 1 = 6,7 \text{ Вт}$$

За вхідними та вихідними даними характеристиками транзистора КТ 817А визначаємо: $U_{eб2} = 0,8 \text{ В}$; $\Delta U_{eб2} = 0,04 \text{ В}$; $\Delta U_{ke} = 6 \text{ В}$;

$$\mu_{T2} = \frac{\Delta U_{KE}}{\Delta U_{KB}} = \frac{6}{0,04} = 150$$

$$h_{11E2} = \frac{\Delta U_{EB}}{I_{B1} - I_{B2}} = \frac{0,1}{(1,5 - 0,3) \cdot 10^{-3}} = 83 \text{ Ом}$$

Максимальне значення колекторного струму, напруга колектор-емітер (в момент ввімкнення) й розсіючої потужності для складового транзистора VT1 відповідно дорівнюють:

$$I_{K1} = \frac{I_{n\max}}{h_{21e\min}}$$

$$I_{K1} = \frac{1A}{25} = 0,04A$$

$$U_{KE1} = E_{K\max} = 19,7 \text{ В}$$

$$P_{K1} = \frac{P_{m.\max}}{h_{21e2\min}}$$

$$P_{K1} = \frac{7}{25} = 0,28 \text{ А}$$

Вибираємо в якості складового транзистор типу КТ 603 Б з параметрами []: $I_{к1 \max}=0,3A > 0,04A$; $U_{ке1\max}=30V > 19,7V$; $P_{к1 \max}=0,4Вт$ (при $T_{стаж}=60^{\circ}C$) $>0,28 Вт$; $U_{ке \text{ нас}}=0,25V$; $h_{21e1}=60$; $U_{еб1}=0,7V$; $h_{11e1}=300 Ом$; $I_{кб01}=0,503 mA$; $\mu_{\tau1}=600$. Струм бази транзистора VT1

$$I_{Б1} = \frac{I_{K1}}{h_{21e1\min}}$$

$$I_{Б1} = \frac{0,04A}{60} = 0,7mA$$

Максимальна напруга на регулюючому елементі:

$$U_{КЕнас} = U_{КЕнас1} + U_{ЕБ}$$

$$U_{КЕнас} = 0,25 + 0,8 = 1,05 V$$

Уточнимо значення напруги живлення, що розсіюється на транзисторах потужності, а також $\mu_{\tau22}$, h_{11e} за приведеними вище формулами (2.16), (2.17), (2.18)

$$U_{н.\max} = \frac{(1,05 + 0,15 + 12 + 1)(1 + 0,1)}{(1 - 0,1)} = 13,4 V$$

$$U_H = 17,4(1 - 0,1) = 15,7 V$$

$$U_{н.\min} = \frac{15,7}{1 + 0,1} = 14,3 V$$

$$P_{K2} = (17,4 - 15 - 1)1 = 1,4 Вт$$

$$P_{K1} = \frac{(U_{1\max} - U_H - \Delta U_H - U_{еб2}) \cdot I_{н.\max}}{h_{21e2\min}} \quad (2.19)$$

$$P_{K1} = \frac{(17,4 - 15 - 1 - 0,8) \cdot 1}{25} = 0,144 Вт$$

$$\mu_{\tau22} = \frac{\mu_{\tau1} \cdot \mu_{\tau2}}{\mu_{\tau1} + \mu_{\tau2}} \quad (2.20)$$

$$\mu_{\tau22} = \frac{150 \cdot 600}{150 + 600} = 120$$

$$h_{11E} = h_{11E1} + h_{11E2} + h_{11E1\min} \quad (2.21)$$

$$h_{11E} = 300 + 83 + 60 = 5,3 кОм$$

$$\tau_{1T} = \frac{\mu_{\tau22} \cdot h_{11E}}{h_{21E1\min} \cdot h_{21E2\min}} \quad (2.22)$$

$$\tau_{1T} = \frac{120 \cdot 5300}{60 \cdot 25} = 425 Ом$$

Максимальне значення напруги $U_{\text{вих.у.}}$ дорівнює з формули (2.23)

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{к}} + \Delta U_{\text{к}} + U_{\text{ЕБ1}} + U_{\text{ЕБ2}}, \quad (2.23)$$

$$U_{\text{вих}} = 15 + 1 + 0,7 + 0,8 = 17,5 \text{ В}$$

Проведемо розрахунок кола зворотнього зв'язку блоку живлення:

Вибираємо стабілітрон типу Д 818 Б з параметрами: $U_{\text{ст.мін}}=7,65\text{В}$; $U_{\text{ст.макс}}=9\text{В}$,
 $I_{\text{ст.мін}}=3\text{мА}$, $I_{\text{ст.макс}}=33\text{мА}$, $r_{\text{диф}}=18 \text{ Ом}$, $\alpha_{\text{Н}}=-1,8 \text{ мВ/с}$

Приймаємо

$$E_{\text{доп}} = 0,4(U_{\text{к}} + \Delta U_{\text{к}}) = 0,4(15 + 1) = 6,4 \text{ В},$$

та вибираємо в якості VT3 транзистор КТ 312 Б з параметрами: $U_{\text{кє3макс}}=35\text{В}$;
 $I_{\text{к3макс}}=30\text{мА}$; $\alpha_{\text{т3}}=2\text{мВ/}^\circ\text{С}$; $h_{21\text{є3мін}}=25$; $U_{\text{єб3}}=0,3\text{В}$; $r_{\text{є3}}=50 \text{ Ом}$; $r_{\text{єб3}}=1\text{кОм}$, $\mu_{\text{т3}}=1000$,
 [10].

Приймаємо колекторний струм транзистора VT3 (див. Рисунок 2.5) рівним $I_{\text{к3}} = 2,8 \text{ мА} > I_{\text{б1}} = I_{\text{вих.у}} = 0,7 \text{ мА}$ та вираховуємо опори резисторів R1 та R3:

$$R1 = \frac{E_{\text{доп}} + U_{\text{Н}} + U_{\Delta} - U_{\text{вих}}}{I_{\text{к3}} + I_{\text{вих}}} \quad (2.24)$$

$$R1 = \frac{5,2 + 15 + 1 - 17,6}{(2,8 + 0,7) \cdot 10^{-3}} = 1,1 \text{ кОм}$$

$$R3 = \frac{U_{\text{Н}} - U_{\Delta} - U_{\text{ст.макс}}}{I_{\text{ст.мін}} - I_{\text{к.3}}} \quad (2.25)$$

$$R3 = \frac{15 - 1 - 9}{(3 - 2,8) \cdot 10^{-3}} = 10 \text{ кОм}$$

Визначаємо струм бази транзистора VT3 й опори резисторів подільника напруги:

$$I_{\text{Б3}} = \frac{I_{\text{к3}}}{h_{21\text{є3мін}}}$$

$$I_{\text{Б3}} = \frac{2,8\text{мА}}{25} = 0,1 \text{ мА}$$

$$I_{\text{діл}} = 10 \cdot I_{\text{Б3}}$$

$$I_{\text{діл}} = 10 \cdot 0,1 = 1 \text{ мА}$$

Визначимо з умови (2.26) та (2.27) опори резисторів R4 та R5:

$$R5 \leq \frac{U_{cm.min} + U_{EB3}}{I_{\text{діл}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta U_n}{U_n}\right)} \quad (2.26)$$

$$R5 \leq \frac{(7.56 + 0.8)}{1 \cdot (1 + 1/15)} = 7.8 \text{ кОм}$$

$$R4 \leq \frac{U_n - \Delta U_{cm.max} - U_{EB3}}{U_{cm.max} + U_{EB3}} \cdot R5 \quad (2.27)$$

$$R4 \leq \frac{(15 - 1 - 9 - 0.8)}{(9 + 0.8)} \cdot 7.8 \cdot 10^3 = 1.1 \text{ кОм}$$

$$RP = \frac{U_n}{I_{\text{діл}}} - R4 - R5$$

$$RP = \frac{15}{1 \cdot 10^{-3}} - 960 - 7800 = 3.3 \text{ кОм}$$

Для підвищення компенсаційного стабілізатора напруги вибираємо $C_{oc}=0,1\text{мкФ}$. Ємнісний опір на частоті 100 Гц дорівнює

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{oc}} = \frac{1}{6.3 \cdot 100 \cdot 0.8 \cdot 10^{-6}} = 16 \text{ кОм} \quad (2.28)$$

Цей опір, що утворює негативний зворотній зв'язок за змінною напругою, зменшить коефіцієнт передачі K_n кола зворотнього зв'язку, на частоті 100 Гц, не більше ніж в два рази, тобто $K_{n-}=3$.

Визначаємо температурну нестабільність вихідної напруги компенсаційного стабілізатора напруги, враховуючи $\alpha_n=1,8 \text{ мВ/}^\circ\text{C}$, $\alpha_{HT} = - 2 \text{ мВ/}^\circ\text{C}$, $\alpha_{вд} = -1 \text{ мВ/}^\circ\text{C}$:

$$\delta U_{nm+} = \frac{U_n + \Delta U_n}{U_{cmmin}} (\pm \alpha_n \pm \alpha_{nm} \pm \alpha_{нд}) \cdot (T_{cmax} - T_c) \quad (2.29)$$

$$\delta U_{nm+} = \frac{15+1}{7.65} (1.8 - 2 - 1) \cdot (60 - 20)^\circ\text{C} = -85 \text{ мВ}'$$

$$\delta U_{HT} = 2,13 \cdot 10^{-3} (T_c + T_{cmin}) \quad (2.30)$$

$$\delta U_{HT} = 2,13 \cdot 10^{-3} (60 + 20)^\circ\text{C} = 120 \text{ мВ}'$$

$$\delta U_{HT+} < \delta U_{HT}$$

$$-85 \text{ мВ} < 120 \text{ мВ}$$

де $\alpha_{нд}$ -загальний температурний коефіцієнт резисторів RP, R4, R5 подільника напруги.

Знак "мінус" в одержаному результаті для δU_{HT+} означає зменшення вихідної напруги з підвищенням температури.

Обрахуємо:

$$R2 = \frac{U_n - \Delta U_n}{I_{KB2}}$$

$$R2 = \frac{15 - 1}{0.4} = 27 \quad \text{кОм}$$

Визначаємо номінальне та мінімальне значення коефіцієнту корисної дії стабілізатора:

$$\eta = \frac{U_n \cdot I_n}{U_n \cdot I_n \cdot P_{cy}} \quad \eta_{\min} = \frac{(U_n - \Delta U_n) \cdot I_{n,\max}}{U_{n,\max} \cdot I_{n,\max} + P_{cy}} \quad (2.31)$$

$$P_{cy} \approx (E_{\text{доп}} + U_n) \cdot (I_{B1} + I_{K3}) + U_n (I_{KB2} + I_{\text{стмін}} - I_{K3} + I_{\text{діл}}) \quad (2.32)$$

$$P_{cy} = (5,2 + 15) \cdot (0,7 + 2,8) \cdot 10^{-3} + (0,4 + 3 - 2,8 + 1) \cdot 10^{-3} = 79,4 \quad \text{мВт}$$

2.4.3 Розрахунок генератора синусоїдальних коливань

Для генерації електричних сигналів з частотою $15 \div 20$ кГц в наш час використовують генератори ЯС-типу, в яких замість коливального контуру використовують ЯС-фільтри. Генератори ЯС-типу можуть генерувати доволі стабільний синусоподібний сигнал в доволі широкому діапазоні частот. Крім того, вони мають доволі габаритні розміри та масу [9].

Генератори будуються на основі резистивного підсилювача з ланкою фазоповороту. Типова схема генератора приведена на рис. 2.7. Підсилювачі будується по звичайній схемі.

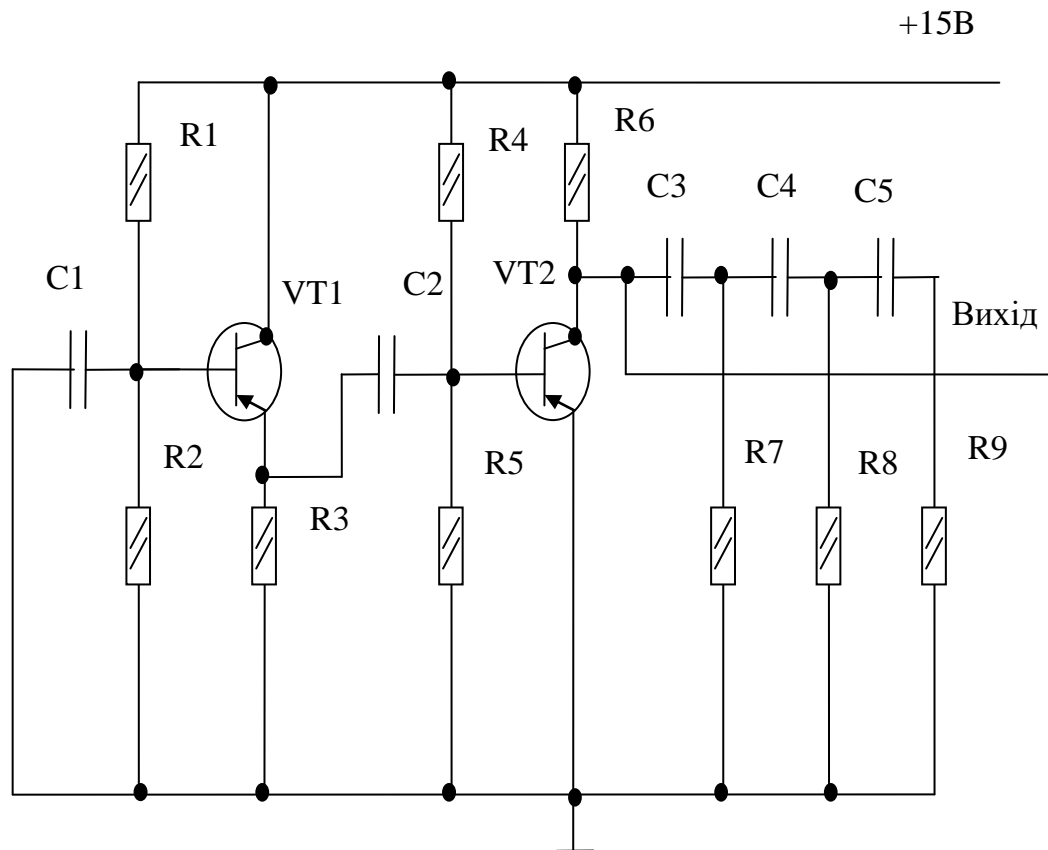


Рисунок 2.7 - Електрична принципова схема генератора синусоїдальних коливань

Для самозбудження підсилювача, тобто для перетворювання першочергових виникших коливань в незатухаючі, необхідно на вхід підсилювача подати частину вихідного сигналу, тобто іншими словами охопити підсилювач додатнім зворотнім зв'язком достатньої глибини. Для отримання синусоїдальних коливань необхідно, щоб доні умови виконувались на одній певній частоті і різко порушувались на всіх інших частотах. Дана задача вирішується за допомогою фазоповертаючої ланки, яка має декілька RC- ланок і служить для повороту фази на 180° . В зв'язку з тим, що одна RC- ланка повертає на кут $\varphi < 90^\circ$, мінімальна кількість фазоповертаючих ланок $n=3$. В практичних схемах однокаскадних генераторів зазвичай використовують три або чотири ланки.

Розрахунок будь-якого генератора зводиться до визначення його параметрів базового підсилювача, що забезпечує коефіцієнт підсилення і

мінімальні нелінійні похибки, і вибору елементів ланки фазоповороту, а також елементів ланок, додатньої та від'ємної зворотнього зв'язку.

Вихідними даними для розрахунку генератора RC-типу з фіксованою настройкою є: робоча частота $f_p = 10$ кГц; типи транзисторів КТ 315 А.

Знаходимо величину вхідного опору емітерного повторювана на транзисторі VT1:

$$R_{BX1} = (1 + h_{21E}) R_{H.E} \quad (2.33)$$

де $R_{\epsilon x 2} = \frac{U_{\epsilon x 2}}{I_{\epsilon x 2}}$,

$$R_{H.E} = \frac{R3 R_{\epsilon x 2}}{R3 + R_{\epsilon x 2}} \quad (34)$$

Значення навантаження R3 емітерного повторювана і вхідного опору другого каскаду R_{BX2} на транзисторі VT2 визначається в процесі попереднього розрахунку даної схеми, як підсилювача.

$$R3 = \frac{E_k - U_{KE(VT1)}}{I_{cp}} \quad (2.35)$$

В формулі (2.35) E_k - напруга живлення каскаду, $E_k = 15$ В; U_{KE} - напруга між колектором та емітером транзистора VT1, $U_{ке} = (2..3)$ В, струм колектора транзистора VT1 [11] $I_{cp} = 0,5$ мА. Тоді

$$R3 = \frac{15 - 2.5}{0.5 \cdot 10^{-3}} = 25 \quad \text{кОм}$$

$$R_{\epsilon x 2} = \frac{15}{0.5 \cdot 10^{-3}} = 30 \quad \text{кОм}$$

$$R_{H.E} = \frac{25 \cdot 30}{25 + 30} = 13,64 \quad \text{кОм}$$

$$R_{BX1} = (1 + 45) \cdot 13,64 = 627,44 \quad \text{кОм}$$

Визначаємо величину опорів резисторів фазоповертаючої ланки, приймаємо $R7 = R8 = R9 = R$. Величину R знаходимо із співвідношення:

$$R = \frac{R_{\epsilon x 1}}{(2...5)} \quad (2.36)$$

$$R = \frac{627.44}{(2..5)} = 119.7 \quad \text{кОм}$$

Вибираємо стандартний номінал резистора $R = 120$ кОм.

Уточнюємо величину опору навантаження R6

$$R6 = \frac{R}{(2..5)} = \frac{120}{3} = 40 \quad \text{кОм},$$

Вибираємо стандартний номінал резистора R6 = 42 кОм.

Розрахуємо коефіцієнт підсилення по напрузі каскада на транзисторі VT2

$$K_{U(2)} = \frac{R6 h_{21E(2)}}{R_{\text{вх}2}} \quad (2.37)$$

$$K_{U(2)} = \frac{45 \cdot 42}{30} = 63,6$$

$$K_{U_{\text{ююю}a}} = 63,6 / 29$$

Знайдемо величину ємності конденсатора фазоповертаючої ланки:

$$C = \frac{10^6}{2\sqrt{6\pi \cdot f_p \cdot R}} \quad (2.38)$$

$$C = \frac{10^6}{2\sqrt{6 \cdot 3,14 \cdot 10^4 \cdot 120 \cdot 10^3}} = 0,000054 \text{ мкФ} = 54 \text{ пФ}$$

Вибираємо стандартний номінал ємності конденсатора C = C3 = C4 = C5 = 54 пФ.

Уточнюємо величину опору емітерного повторювана

$$R3(10...20) = \frac{R_{\text{вх}1}}{h_{21E(VT1)}} \quad (2.39)$$

$$R3(10...20) = \frac{627,44}{45} = 139,7 \quad \text{кОм}$$

Вибираємо стандартний номінал резистора R3 = 142 кОм.

Визначимо ємності конденсаторів C1 та C2 за наступними формулами:

$$C1 = \frac{10^6}{0,2 \cdot \pi \cdot f_p \cdot R_{\text{вх}1}} \quad (2.40)$$

$$C2 = \frac{10^6}{0,2 \cdot \pi \cdot f_p \cdot R_{\text{вх}2}} \quad (2.41)$$

$$C1 = \frac{10^6}{0,2 \cdot 3,14 \cdot 10^4 \cdot 627,44 \cdot 10^3} = 0,00486 \text{ мкФ} = 480 \text{ пФ}$$

$$C2 = \frac{10^6}{0,2 \cdot 3,14 \cdot 10^4 \cdot 30 \cdot 10^3} = 0,005305 \text{ мкФ} = 5300 \text{ пФ}$$

Відповідно для ємності конденсаторів $C1$ та $C2$ вибираємо стандартні номінали $C1 = 480$ пФ, $C2 = 5300$ пФ.

Визначимо значення опорів резисторів $R1$, $R2$, $R4$, $R5$ подільника. Використавши умову (2.42) отримаємо:

$$R1 + R2 = \frac{E_K}{I_D} \quad (2.42)$$

Прийнявши відповідно, що $R1 = R4$, $R2 = R5$, $R2 = 3R1$ тому

$$R1 = \frac{15}{4 \cdot 0.4 \cdot 10^{-3}} = 37.5 \text{ кОм},$$

$$R2 = 3 \cdot R1 = 3 \cdot 37.5 = 112.5 \text{ кОм},$$

Вибираємо стандартні номінали $R1 = R4 = 42$ кОм, $R2 = R5 = 120$ кОм.

2.3.4 Розрахунок блоку підсилення проектованого приладу

Диференційні підсилювачі призначені для підсилення різниці двох вхідних напруг. Стабілізація коефіцієнту підсилення диференційного підсилювача так як інвертуючого чи неінвертуючого підсилювача, здійснюється за допомогою від'ємного зворотнього зв'язку.

Удосконалені диференційні підсилювачі дуже часто називають інструментальними підсилювачами [12]. Такі підсилювачі мають високий вхідний опір за двома входами та забезпечують встановлення заданого коефіцієнту підсилення за допомогою одного змінного опору.

Високий коефіцієнт зниження синфазного вхідного сигналу забезпечує диференційний підсилювач на трьох ОП, схема якого приведена на рис. 2.8.

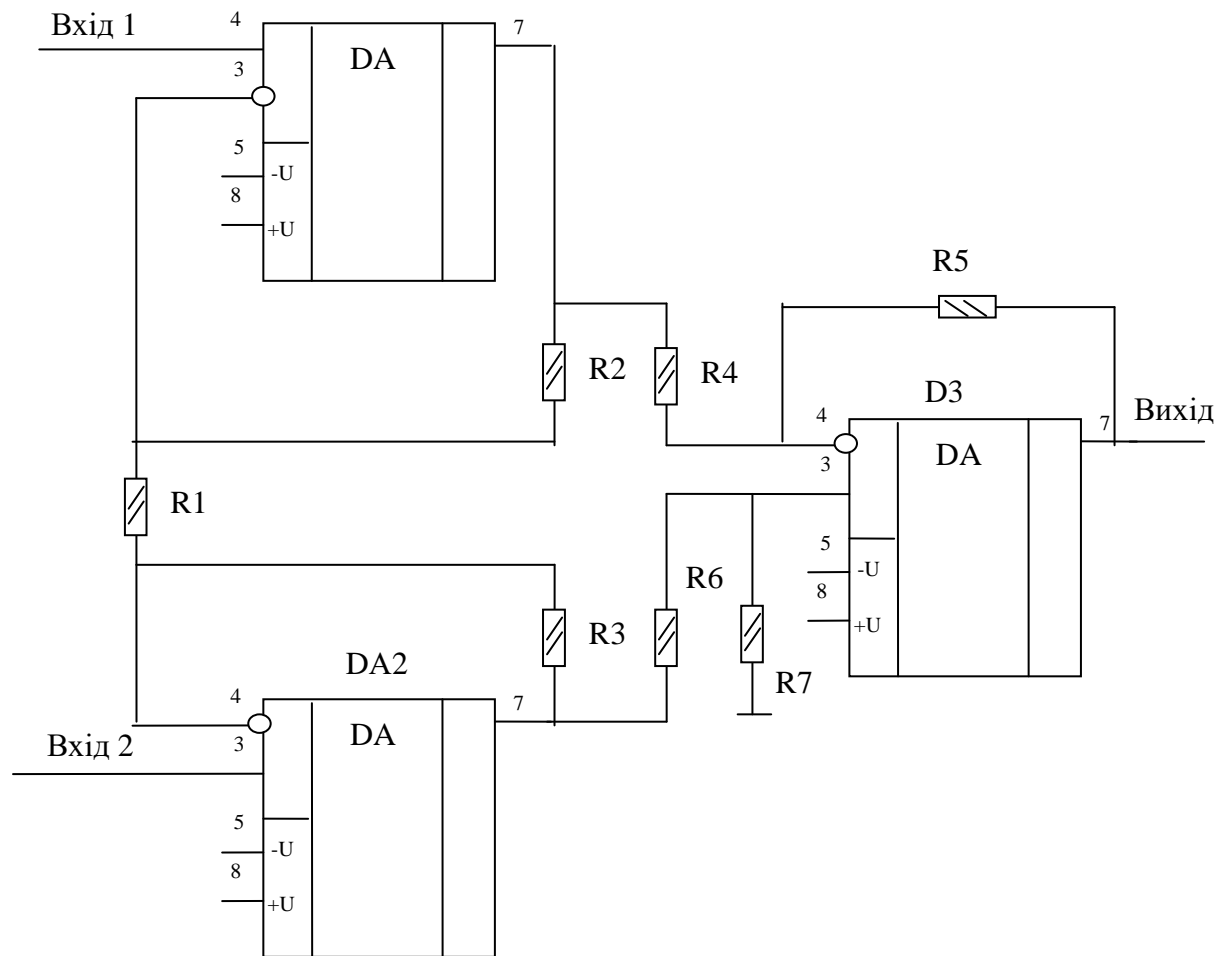


Рисунок 2.8 - Диференційний підсилювач

Даний диференційний підсилювач побудований на мікросхемі К 140УД8, дана мікросхема розміщена в корпусі. Резистори R4 - R7, що входять до цього підсилювача повинні відповідати наступним вимогам $R7/R6 = R5/R4$. Тоді вихідна напруга визначається формулою (2.44)

$$U_{\text{вих}} = (U_2 - U_1) \frac{R5}{R4} \left(\frac{R2 + R3}{R1} + 1 \right) \quad (2.44)$$

Задамося потрібними значеннями резисторів $R7=R6=R5=R4=42$ кОм, тоді $R1 = 91$ кОм, $R2 = 47$ кОм, $R3 = 52$ кОм.

Даний диференційний підсилювач побудований на мікросхемі К 140УД8, дана мікросхема розміщена в корпусі. Резистори R4 - R7, що входять до цього підсилювача повинні відповідати наступним вимогам $R7/R6 = R5/R4$. Тоді вихідна напруга визначається формулою (2.44)

$$U_{\text{вх}} = (U_2 - U_1) \frac{R5}{R4} \left(\frac{R2 + R3}{R1} + 1 \right) \quad (2.44)$$

Задано потрібними значеннями резисторів $R7=R6=R5=R4=42$ кОм, тоді $R1 = 91$ кОм, $R2 = 47$ кОм, $R3 = 52$ кОм.

Для розрахунку попереднього каскаду підсилювача НЧ повинні бути відомі наступні вихідні дані, отримані в результаті ескізного розрахунку підсилювача: напруга живлення, що підводиться до каскаду $E_k = 15$ В, діапазон частот підсилення $f_n = 10$ кГц, амплітуда змінного струму на вході наступного каскаду чи приладу $I_{\text{max.вх.н}} = 40$ мА [9].

Принципова електрична схема підсилювача приведена на рисунку 2.9.

Проведемо перевірку правильності попереднього вибору транзистора. Для нормальної роботи транзистора необхідно, щоб допустима напруга між колектором та емітером вибраного транзистора КТ 315 В перевищувало напругу живлення, що підводиться до каскаду.

$$U_{\text{КЕmax}} > E_k \quad (2.45)$$

А величина допустимого струму колектора перевищувала вхідний струм наступного каскаду не менше ніж в 1,5...2 рази.

$$I_{\text{Кmax}} > (1.5 \dots 2) I_{\text{max.вх.н}}, \quad (2.46)$$

Користуючись довідковою літературою [10] бачимо, що умовна (2.45) та (2.46) виконуються.

$$I_k = 1.4 \cdot 20 = 28 \text{ мА}$$

Знаходимо опір навантаження в колі колектора (рис. 2.9). При виборі величини опору $R3$ в колі колектора необхідно виконання двох умов: з одної сторони, бажано, щоб опір $R3$ було якомога більшим по відношенню до величини вхідного опору наступного каскаду. З іншого боку, збільшення опору $R3$ приводить до збільшення падіння напруги на ньому, а напруга між колектором та емітером зменшується до недопустимо малої величини.

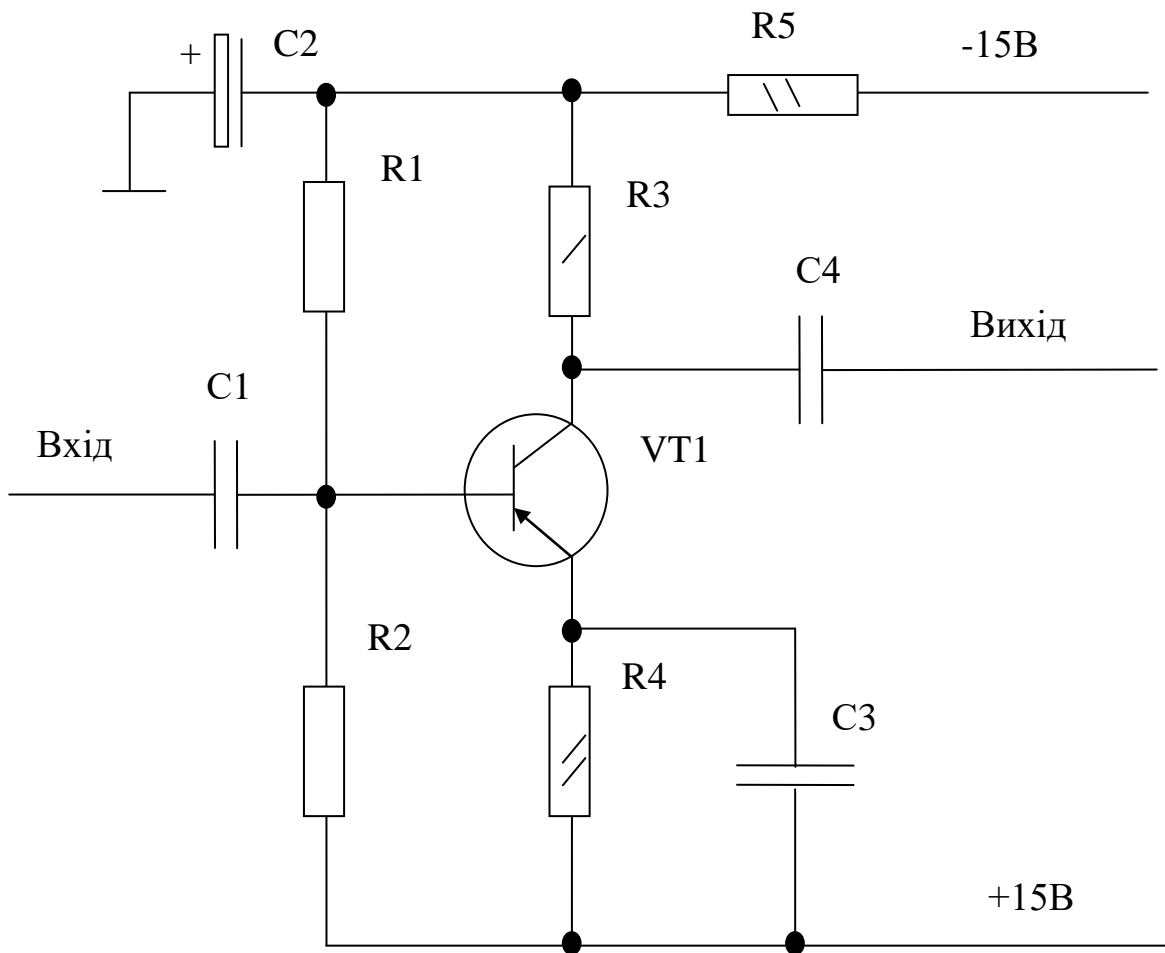


Рисунок 2.9 - Електрична принципова схема підсилювача низької частоти

Визначимо величину струму спокою в колі колектора за формулою (2.47)

$$I_{K_{\max}} = 1,4 \cdot I_{\max_{\text{вх.н}}} \quad (2.47)$$

З врахуванням цих вимог формула для визначення опору R3 має вигляд:

$$R3 = 0,4 \cdot E_K / I_{Kp} \quad (2.48)$$

$$R3 = 0,4 \frac{15}{28 \cdot 10^{-3}} = 214 \text{ Ом}$$

Потужність, що розсіюється на резисторі R3 складає

$$P_{R3} = I_{Kp}^2 \cdot R3 = (28 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 214 = 0,168 \text{ Вт}$$

, приймаємо потужність резистора 250 мВт.

Визначимо величину опору резистора R4 в колі термостабілізації за формулою (2.49)

$$R4 = 0.2E_K I_{Kp}, \quad (2.49)$$

$$R4 = 0.2 \frac{15}{28 \cdot 10^{-3}} = 107.14 \text{ Ом}$$

Потужність, що виділяється на резисторі R4, рівна $P_{R4} = I_{Ep}^2 \cdot R4$. На практиці приймають струм емітера в режимі спокою рівним I_{Kp} .

$$P_{R4} = I_{Ep}^2 \cdot R4 = (28 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 107.14 = 0.083 \text{ Вт}$$

З врахуванням знайдених значень опорів та потужності для резисторів R3, R4 вибираємо стандартні номінали R3 = 210 Ом, R4 = 110 Ом.

Знайдемо ємність конденсатора згідно формули (2.50)

$$C3 = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot 0.1 \cdot R4} \quad (2.50)$$

$$C3 = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 10^4 \cdot 0.1 \cdot 110} = 1.446 \text{ мкФ}$$

Знаходимо напругу між колектором та емітером транзистора в режимі спокою

$$U_{KEp} = E_K - I_{Kp} R3 - I_{Ep} R4 \quad (2.51)$$

$$U_{KEp} = 15 - 28 \cdot 10^{-3} (220 - 110) = 11.92 \text{ В}$$

В сімействі вихідних статичних характеристик транзистора КТ 315 В, ввімкненого по схемі з загальним емітером, визначаємо положення робочої точки Р, що відповідає координатам U_{KEp} та I_{Kp} (Додаток А). Знайденому положенню відповідає струм бази I_{Bp} . Отримане значення струму бази дозволяє визначити положення робочої точки Р' на вхідній характеристиці транзистора (Додаток Б), знятій при $U_{KE} \neq 0$, напруга спокою ділянки база-емітер U_{BEp} і вхідний опір змінному струму $R_{вх}$.

Для отримання значення необхідно провести дотичну до точки спокою Р' і знайти відношення $R = MK/KP'$.

$$\text{Тоді } I_{Bp} = 0,27 \text{ мА, } U_{BEp} = 2 \text{ В, } R_{вх} = 450 \text{ Ом}$$

Визначимо елементи подільника в колі бази R1 та R2. Приймаємо спад напруги на опорі резистора R5 фільтра рівним (2.51)

$$\Delta U_{R5} = (0.1 \cdot 0.2) E_K, \quad (2.51)$$

$$\Delta U_{R5} = 0.15 \cdot 15 = 2.25 \text{ В}$$

Знаходимо напругу, що підводиться до подільника із умови

$$I_D = (2 \dots 5) I_{BP} = 2,5 \cdot 0,27 = 0,675 \text{ мА}$$

Визначаємо значення опорів резисторів R1 та R2.

$$R1 = \frac{U_D - \Delta U_{R4} - U_{БЕР}}{I_{BP} + I_D} \quad (2.52)$$

$$R2 = \frac{\Delta U_{R4} + U_{БЕР}}{I_D} \quad (2.53)$$

Прийнявши падіння напруги на резисторі R4 рівним

$$\Delta R4 = 0.1 \cdot E_K = 0.1 \cdot 15 = 1.5 \text{ В}$$

$$R1 = \frac{12.75 - 1.5 - 2}{(0.27 + 0.675) \cdot 10^{-3}} = 9.7 \text{ кОм}$$

$$R2 = \frac{1.5 + 2}{0.675 \cdot 10^{-3}} = 5.1 \text{ кОм}$$

Перевіримо виконання умови $R2 = (5 \dots 10) R_{вх}$ як видно умова виконується. Вибираємо стандартні значення резисторів R1 та R2 і визначимо потужність резисторів.

2.4.5 Розрахунок вимірювального моста

Основним завданням, що стоять в даному розділі - це визначення номіналів конденсаторів C13 - C25 та резисторів R12, R14 - R20 та R29 - R34, що використовуються для компенсації ємності діелькометричного перетворювача C1-R1. Діелькометричний перетворювач змінює свою ємність відповідно до зміни діелектричної проникненості вимірювального середовища.

При вимірюванні за допомогою електричних методів вимірювання вологості зустрічається необхідність визначення електричних параметрів матеріалу за результатами вимірювання ємності та опору матеріалу при відомих параметрах давача [4]. Діелектричну проникненість матеріалу не можна визначити за відношенням ємності “пустого” давача до ємності давача з вимірювальною речовиною. Оскільки конденсаторні дані, крім частин, що

заповнені дослідною речовиною мають також виводи, ізолятори, та інші деталі. Що створюють додаткову ємність C_H , яка має постійне значення для даного давача. В величину C_H входить також ємність незаземленої обкладки конденсатора. Накінець існує також краєвий ефект, тобто викривлення електричного поля коло країв обкладинок конденсатора, що створює крайову ємність C_K , величина якої залежить від розміщення діелектрика відносно країв обкладки і цього діелектричної влативості.

Найбільш точним способом визначення параметрів давача є калібрування давача в умовах експлуатації, при калібровці конденсатора-давача можливе використання, як рідинних так і газових еталонів. В загальному випадку сумарна ємність конденсатора, що заповнений дослідною речовиною рівна:

$$C_x = \varepsilon C_0 + C_H + C_R, \quad (2.54)$$

Незважаючи на проблеми, що виникають при визначенні ємності діелькометричного перетворювача, все ж таки можна визначити ємність заповненого давача і провести попередній розрахунок реперних значень ємностей конденсаторів С13 - С25, що служать для визначення діапазону вимірювання вологості нафти. Розрахунок слід проводити з врахуванням вимог стандартів до якості нафти [15], що виділяє два сорти нафти які в свою чергу відрізняються між собою хімічними та фізичними властивостями.

Виходячи з формули (2.14) проведемо розрахунок ємності конденсаторів, при використанні наступних даних [15].

$$\text{Сорт 1: } \varepsilon_1 = 81; \varepsilon_2 = 2.0; \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м};$$

$$\rho = 810 \text{ кг/м}^3; \rho_v = 1000 \text{ кг/м}^3;$$

$$\sigma_1 = 30 \cdot 10^{-6} \text{ См}\cdot\text{м};$$

$$f = 10 \text{ кГц};$$

$$a = 0,015; b = 0,73.$$

$$\text{Сорт 2: } \varepsilon_1 = 81; \varepsilon_2 = 2.6; \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м};$$

$$\rho = 850 \text{ кг/м}^3; \rho_v = 1000 \text{ кг/м}^3;$$

$$\sigma_1 = 30 \cdot 10^{-6} \text{ См}\cdot\text{м};$$

$$f = 10 \text{ кГц};$$

$$a = 0,020; b = 0,95.$$

Розрахунок циліндричних конденсаторів проводимо з використанням програмних засобів MathCAD програма розрахунку приведена в додатку В, а також приведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 Результати розрахунку ємностей конденсаторів вимірювального моста

W, %	Сорт 1		Сорт 2	
	ϵ	C, пФ	ϵ	C, пФ
0	2,6	65,13	2,0	50,1
10	8,261	206,9	5,830	146,0
20	13,922	348,7	9,659	242,0
40	25,243	632,3	17,319	433,8

Отже за даними табл. 2.3 маємо, що ємності конденсаторів C13 = 200 пФ, C15 = 148 пФ C17 = 348 пФ, C19 = 260 пФ, C21 = 630 пФ, C23 = 430 пФ, зміна ємності підстроювальних конденсаторів C14, C16, C18, C20, C22, C24 вибирається рівною приблизно (0...50)пФ, зміна ємності конденсатора C25, що відповідає пустому перетворювачу вибирається рівною (50...75)пФ.

Опори постійних резисторів R12, R14 - R20 та R29 - R34, мають наступні значення R14 = R16 = 31 МОм, R18 = R20 = 28 МОм, R30 = R34 = 22 МОм, величина зміни опору змінних резисторів R12 = R15 = (0,5... 1,0)МОм, R17 = R19 = (0,5... 1,2)МОм, R29 = R31 = (0,5... 1,7)МОм.

Величина опору резисторів R13 та R37 рівна 52 МОм.

2.4.6 Розробка блоку цифрової обробки інформації

2.4.6.1 Опис роботи аналогово-цифрового перетворювача

Основою блоку цифрової обробки інформації, так би мовити первинним перетворювачем аналогового сигналу в цифровий є аналогово-цифровий перетворювач (АЦП). Для цієї мети використовуємо вітчизняну

мікросхему АЦП К1108ПВ1. Дана мікросхема представляє собою [20] швидкодіючу функціональна закінчений АЦП почергового приближення аналогового сигналу в двійковий паралельний цифровий код.

В склад функціональної мікросхеми входить джерело опорної напруги (ДОН), генератор тактових імпульсів (ГТІ), вихідний регістр з трьома логічними станами і функцією збереження інформації підчас одного циклу перетворення ВРГ РПП, цифрово-аналоговий перетворювач (ЦАП), багатовходовий КН з вхідним віднімаючим пристроєм, дешифратор (ДНІ) рівнів струму.

Мікросхема розрахована на перетворення однополярного вхідного сигналу в діапазоні від 0 до 3 В, що подається на вхід через зовнішній ОП або ПНЧ при максимальній частоті перетворення 1,1 МГц для 10-розрядного режиму та 1,33 МГц для 8-розрядного режиму.

Мікросхема К1108ПВ1 розміщена в герметичному металокерамічному корпусі типу 210В.24-1 з двох стороннім розміщенням вертикальним розміщенням виводів.

Для роботи АЦП К1108ПВ1 потрібно декілька зовнішніх керамічних конденсаторів та джерела живлення $U_{cc1} = 5V \pm 5\%$, $U_{cc2} = 5,2V \pm 5\%$. Номінальне значення напруги внутрішнього ДОН складає 2,5 В. Потужність споживана від джерела живлення становить 0,85 Вт.

Мікросхема К1108ПВ1 може працювати, як в 10 так і в 8-розрядному режимі перетворення. Цикл перетворення в режимі 10-розрядного АЦП складається з 12 тактів (10 робочих в процесі кодування і по одному службовому на початку та в кінці циклу перетворення).

Цикл починається з першим від'ємним фронтом тактових імпульсів після отримання команди на запуск ST. Підчас першого службового циклу здійснюється обнулення регістрів і встановлення напруги на вході селектора опорних рівнів.

Підчас наступних десяти тактів відбувається кодування аналогового сигналу при умові, що він зафіксований на вході АЦП. Завдяки тому, що

обнулення КН проходить в кінці кожного такту, вхід перетворювача нечутливий до імпульсних завад, що діють на протязі $2/3$ його тривалості.

На дванадцятому такті код з регістра зберігання переписується в вихідний регістр, після чого формується сигнал готовності даних. Поява на RAD (вивід 11) сигналу логічний 0 засвідчує зміну інформації на вихідному резисторі і її збереження весь наступний цикл перетворення.

Для зчитування інформації необхідно подати на вхід ERD (вивід 20) сигнал логічний 0. При подачі сигналу логічна 1 інформаційні виходи АЦП переводяться в третій стан, в якому шина даних не нагружається. Одночасно з появою імпульса готовності можна проводити вибірку аналогового сигналу на вході АЦП.

В ВІС К1108ПВ1 передбачений також 8-розрядний режим роботи, тобто скорочений цикл (вхід SE 10/8 з'єднується з шиною від'ємного джерела живлення).

Запуск АЦП можна вважати стійким, якщо сигнал ST подається на протязі одного періоду тактової частоти з моменту початку наступного циклу. При асинхронному режимі запуску (по відношенню до тактового сигналу) тривалість сигналу ST повинна бути не менше двох її періодів. При цьому затримка запуску АЦП (відносно фронту сигналу ST) залежить від миттєвого положення фронтів і може досягати тривалості одного періоду тактових імпульсів.

Якщо після закінчення одного циклу перетворення на вході БТ зберігається рівень логічного 0, то починається новий цикл.

Регістр зсуву АЦП управляється внутрішнім ГТІ, що працює в дох режимах: автоколивальній та з зовнішньою синхронізацією.

Типова схема ввімкнення ВІС АЦП К1108ПВ1 приведена на рис. 2.10, а правила комутації виводів ВІС при перемикані з одного режиму в інший приведені в табл. 2.4

Таблиця 2.4 Перемикання режимів ВІС АЦП К1108ПВ1

Режим роботи	Положення перемичок комутації
--------------	-------------------------------

З внутрішнім ГТІ та ДОН	23_а та 13_14
Те саме , укорочений цикл	23_а та 13_12
Внутрішній ГТІ, зовнішній ДОН	23_а та 20_в
	18_г та 13_14
Те саме , укорочений цикл	23_а та 20_в
	18_г та 13_12
Зовнішній ГТІ, внутрішній ДОН	23_б та 13_14
Те саме, укорочений цикл	23_б та 13_12

Конденсатори блокування С1 та С2 по колу джерела живлення доцільно встановлювати в безпосередній близькості до відповідних виводів ВІС і дублювати електролітичними конденсаторами ємністю 10-100 мкФ для згладжування низькочастотних пульсацій.

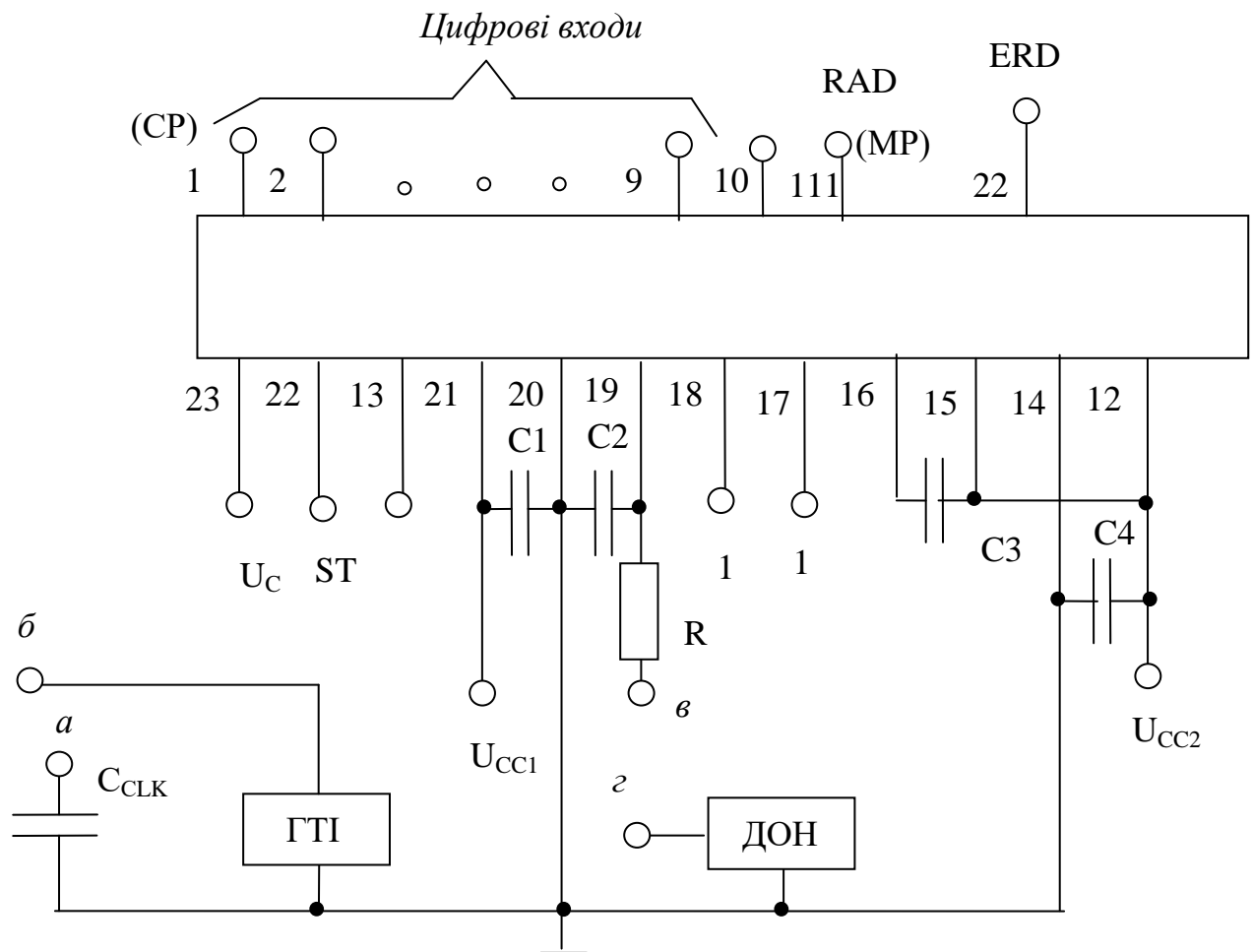


Рисунок 2.10 - Типова схема включення ВІС АЦП К1108ПВ1

2.4.6.2 Опис алгоритму роботи мікропроцесорного контролера

Мікроконтролер в розроблюваному приладі для вимірювання вологості нафти повинен керувати процесом оцифрування, обробки та індикації результатів вимірювання вологості діелькометричним вологоміром.

Блок-схема роботи мікроконтролера приведена на аркуші МР.МТТм-06.01.00.003.

Електрична принципова схема включення мікроконтролера приведена на аркуші МР.МТТм-06.01.01.000 ЕЗ. Мікросхема ВІС 002 представляє собою К1816ВЕ48 розміщена в герметичному металокерамічному корпусі типу 210В.24-1 з двох стороннім вертикальним розміщенням виводів. Дана мікросхема пов'язана з ВІС АЦП К1108ПВ1, а також з паралельним

інтерфейсом 004, що представлений ВІС КР580ВВ79, який в свою чергу пов'язаний з дешифратором К555ТВ1. Вихід АЦП К1108ПВ1 (виводи) поступають на порт процесора 002 К1816ВЕ48 Р1 (виводи 27-34) вони працюють, як вхідний порт. Вихідним портом є порт Р2 (виводи 21-24 та 35-38), на них згідно програми, що приведена в додатку Г, виставляється вихідний код який подається на інтерфейс КР580ВВ79 [21].

В той же час на вхід дешифратора приходять код запалювання симесигментних індикаторів, мікросхеми 007-0010, що представляють собою світодіодну зборку з спільним анодом і управляються за допомогою низького рівня сигналу (логічний 0). Оскільки для запалювання семисегментних індикаторів потрібний низький рівень сигналу, а вихід інтерфейса високим тому використовується логічна функція на основі двох мікросхем D5-DD6 типу К153ЛА3.

Використаний наступний тип семисегментних індикаторів АЕ3246. Для створення потрібного потенціалу на аноді семисегментних індикаторів використаний транзисторний ключ, який попарно входять такі елементи R2, R2, VT3; R3, R6, VT4; R9, R41, VT5; R40, R42, RT6 на основі малопотужного високочастотного транзистора КТ315А. Номінали резисторів $R_{32} = 2,1 \text{ кОм}$, $R_{32} = 1,5 \text{ кОм}$, тип резисторів може бути навіть МЛТ. Номінали резисторів R21 - R28 однакові рівні 1 кОм.

2.4.6.3 Розрахунок електромагнітного екрану блоку цифрової обробки інформації

При розрахунку екранів від зовнішніх електромагнітних наводок необхідно знати конструктивні параметри приладу що розробляється на дипломному проектуванні, спектр частот перешкод f , відповідно напруження електричного та магнітного поля [19]. Виходячи з цього задамося потрібними даними для розрахунку.

Габаритні розміри корпусу приладу 300*250*165 мм, частота поля наводки $f = 50$ Гц, напруга джерела наводки $U_{дж} = 220$ В, доповнююча напруга $U_{доп} = 0,1$ В, відстань до джерела наводки $r = 30$ мм.

Визначаємо необхідну ефективність екранування:

$$E_E = 20 \lg \left(\frac{U_{дж}}{U_{доп}} \right) \quad (2.55)$$

$$E_E = 20 \lg \left(\frac{220}{0,1} \right) = 66,84 \text{ дБ}$$

Екран буде встановлений на плату цифрового блоку обробки інформації, тобто в середині екрану буде розміщений сам вирід, а не джерело наводки.

Визначаємо тип поля наводки

$$r' = \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{c}{2\pi f} \quad (2.56)$$

$$r' = \frac{3 \cdot 10^8}{2\pi \cdot 50} = 0,95 \cdot 10^6 \text{ м}$$

Отже, це ближнє поле наводки.

Вибираємо конструктивну форму екрану в залежності від форми і розмірів друкованої плати. Оскільки габаритні розміри друкованої плати 100*120*20 мм, тому вибираємо габаритні розміри екрану 100*120*30 мм. Розрахуємо еквівалентний радіус екранування $R_{екв}$

$$R_{екв} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot l_1 \cdot l_2 \cdot l_3}{4\pi}} \quad (2.57)$$

$$R_{екв} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 0,1 \cdot 0,12 \cdot 0,03}{4\pi}} = 0,09$$

На основі значення $R_{екв}$ розраховуємо нижню границю резонансної частоти екрану $f_{рез}$.

$$f_{рез} = \frac{138 \cdot 10^6}{R_{екв}} \quad (2.58)$$

$$f_{рез} = \frac{138 \cdot 10^6}{0,09} = 1,53 \text{ ГГц,}$$

Значення $f_{рез}$ не входить в спектр частот наводок, отже не будуть виникати наводки від самого екрану.

Вибираємо матеріал для стінок екрану. Екрануюча дія матеріалу екрану характеризується проникненою здатністю поля наводки δ ,

$$\delta = \frac{0.52}{\sqrt{\mu_r \cdot f \cdot \sigma}} \quad (2.59)$$

де μ_r - відносна магнітна провідність матеріалу, f - частота наводки, МГц, σ - питома провідність матеріалу, См/м.

Вибираємо, як матеріал екрану залізо з наступними властивостями $\mu_r = 4100$, $\sigma = 1 \cdot 10^7$ См/м [].

$$\delta = \frac{0.52}{4100 \cdot 50 \cdot 10^{-6} \cdot 10^7} = 0.00020 \text{ м}$$

Розрахуємо необхідну товщину матеріалу екрану. Для прямокутного екрану товщина матеріалу екрану визначається за формулою (2.60)

$$d_{np} = 0,5 \cdot a_2 \left[1 - \sqrt{1 - \frac{10^{E_H/20} - 1}{\mu_r + \frac{1}{\mu_r} - 2}} \right] \quad (2.60)$$

$$d_{np} = 0,5 \cdot 0,03 \left[1 - \sqrt{1 - \frac{10^{66,88/20} - 1}{4100 + \frac{1}{4100} - 2}} \right] = 0.0047 \text{ м}$$

Мінімальна товщина замкнутої форми екрану $d_{min,E}$ визначають за формулою (2.61)

$$d_{min,E} = \frac{10^{E_E/20}}{60\pi \cdot \sigma} \quad (2.61)$$

де ефективність екранування E_E визначається з наступної формули (2.62)

$$E_E = 20 \lg(60\pi \cdot d_{np} \cdot \sigma) \quad (2.62)$$

$$E_E = 20 \lg(60\pi \cdot 0,0047 \cdot 1 \cdot 10^7) = 138,94 \text{ дБ}$$

Тоді

$$d_{min,E} = \frac{10^{138,94/20}}{60\pi \cdot 10^7} = 0.0046 \text{ м}$$

Отже, розрахунок екрану проведено правильно.

2.5 Розробка спроектованого приладу для вимірювання вологості нафти
Складальне креслення приладу приведенне на аркуші МР.МТТм-06.01.03.000СК.

Корпус приладу для вимірювання вологості нафти складається з шасі 6 до якого кріпиться плата з'єднань 3 за допомогою кріпильної опори 12. До плати з'єднань кріпляться друковані плати підсилювача 1 та плата МП- блоку 2 за допомогою кріпильних стійок 10. Також до шасі кріпиться плата блока живлення 5 за допомогою кріпильної опори 12 та з'єднувальних елементів 14.

Силовий трансформатор 18 кріпиться до шасі за допомогою кріпильних елементів. Так само встановлений радіатор 24 з транзистором 25. Гумова ніжка 13 кріпиться за допомогою кріпильних елементів до кутника 11. До якого в свою чергу кріпиться задня стінка 8 та кришка корпусу 9.

Плата індикації 4 виведена на передню панель 7 і закріплена за допомогою кріпильних елементів 14. На передній панелі також встановлено роз'єм 21, вмикач живлення приладу 22, а також індикатор роботи приладу 23. На передню панель також виведені кнопки перемикання діапазону вимірювання 20 та кнопки вибору сорту нафти 19. Передня панель за допомогою кріпильних елементів прикручується до кутнику і таким чином встановлюється на місце.

З'єднувальні дроти 26 зв'язані за допомогою нейлонової нитки в джути і розміщені по периметру корпусу, що дозволяє доступ до потрібного елемента, розміщеного в корпусі.

Прилад встановлюється стаціонарно на гумові ніжки.

З МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ДІЕЛЬКОМЕТРИЧНОГО ВОЛОГОМІРА НАФТИ

3.1 Аналіз видів похибок

Забезпечення високої точності вимірювань - важке завдання, і вирішення її належить сфері метрологічного забезпечення. Дослідника, чи інженера в кінцевому результаті цікавить похибка отриманих ними результатів досліджень. Похибка вимірювання, як така складається з багатьох складових. Різновидність прояву і впливу похибок на результати вимірювання привело до класифікації похибок, як таких.

Похибка результату вимірювань - це відхилення результатів вимірювання від істинного (дійсного) значення вимірюваної величини.

Аналізуючи причини виникнення похибок, необхідно в першу чергу виділити ті з них, які суттєво впливають на результат вимірювання.

В залежності від форми вираження розрізняють абсолютну і відносну похибки. Абсолютною називають похибку, яка показує на скільки результат вимірювання відрізняється від істинного значення вимірюваної величини [13].

Тобто

$$\Delta = A - X_{\text{іст}} \quad (3.1)$$

де Δ - абсолютна похибка вимірювань; A - результат вимірювання; $X_{\text{іст}}$ - істинне значення вимірюваної величини.

Абсолютна похибка виражається в тих же одиницях, що й вимірювальна величина.

Відносна похибка вимірювань представляє собою відношення абсолютної похибки вимірювання до істинного значення вимірюваної величини. Відносну похибку визначають в процентах за формулою:

$$\delta = \frac{A - X_{\text{іст}}}{X_{\text{іст}}} \cdot 100 = \frac{\Delta}{X_{\text{іст}}} \quad (3.2)$$

До похибок засобів вимірювання належать інструментальні похибки, методичні похибки.

Інструментальні похибки є в кожному засобі вимірювань, вони можуть бути визначені при його випробуваннях і занесені в паспорт на цей засіб.

Методичні похибки - це такі похибки, які пов'язані з вибраним методом вимірювань даної величини.

В залежності від умов і режимів вимірювання розрізняють статичну і динамічну похибки засобу вимірювання. Статичною називають похибку, яка не залежить від швидкості зміни вимірюваної величини в часі. Статична похибка засобу вимірювання виникає при зміні за його допомогою постійної величини.

Динамічною називають похибку, яка залежить від швидкості зміни вимірюваної величини в часі [15]. Виникнення динамічної похибки зумовлене інерційністю елементів вимірювальної ланки засобу вимірювання, тобто тим, що перетворення в вимірювальній ланці не відбуваються миттєво, а потребують певного часу.

Динамічною похибкою засобу вимірювання є різниця між похибкою засобу вимірювання в динамічних умовах та його статичною похибкою, яка відповідає значенню величини в даний момент часу.

В залежності від характеру виявлення, можливості усунення і причин виникнення розрізняють систематичну та випадкову похибки. Систематичною називають складову похибки вимірювань, яка є постійною або закономірно змінюється при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж величини. Причинами виникнення систематичної складової похибки вимірювань (систематичних похибок) є: відхилення параметрів реального засобу вимірювання від розрахованих значень передбачених схемою; неврівноваженість певних деталей засобу вимірювання відносно їх осі обертання, яке призводить до додаткового обертання за рахунок зазорів, що є в механізмі; похибка градування або деякий зсув шкали; знос робочих поверхонь деталей засобу вимірювання; старіння деталей; несправність засобу вимірювання і т. д. Ззовні

систематичну похибку неможливо виявити. Виявити її можна тільки при повірці шляхом порівняння робочих засобів вимірювання з зразковими [15].

Випадковою називають складову похибки, яка змінюється випадково при повторному вимірюванні однієї і тієї ж величини. Випадкова похибка виникає при одночасній дії багатьох джерел, кожне з яких саме по собі непомітно впливає на результат вимірювань, а сумарний вплив всіх джерел може бути достатньо великим, тобто це така похибка, яка не може бути передбачена ні по знаку ні по величині.

Поряд з систематичною та випадковою похибками Існує ще і прогресуюча похибка. Прогресуюча похибка змінюється в часі і ця зміна залежить від зміни характеристик окремих елементів засобу вимірювання.

Систематичне відхилення експериментальних даних від вибраної характеристики засобу вимірювання називають похибкою адекватності.

Проте є також і похибка градуювання, яка залежить від тих похибок взірцевих засобів вимірювання за допомогою яких здійснювалося експериментальне градуювання робочого засобу вимірювання.

Похибки засобу вимірювань, які залежать від величини вхідного сигналу називаються мультиплікативними, а ті що не залежать - адитивними.

Ультразвуковий рівнемір складається з багатьох блоків і однією з складових похибок системи є похибка квантування.

3.2 Метрологічний аналіз похибок проектного приладу

Під час проведення контролю вологості нафти за допомогою дієлькометричного вологоміра ми стикаємося з безліччю факторів, що докорінним способом впливають на вимірювальну величину. Вплив цих факторів доволі суттєвий його не можна нехтувати, тому звернемося до розгляду результату впливу цих факторів на кінцевий результат вимірювання вологості нафти дієлькометричним вологоміром.

Під дією електричного поля в діелектрику виникає струм зміщення, причому величина струму зміщення діелектричній проникненості речовини і

прикладеному до обкладинок конденсатора напруги, тобто, діелектрична проникненість ϵ мірою поляризації діелектрика і ϵ константою, що відповідає певній речовині.

В основу діелектричного методу вимірювання вологості емульсії типу вода в маслі покладено наступні залежності: при $\text{tg } \delta \gg 1$

$$\epsilon = \epsilon_H \left(1 + \frac{3W}{1-W} \right), \text{ якщо } W=0.1 \div 0.15 \quad (3.3)$$

$$\epsilon = \epsilon_H \left(1 + \frac{3W}{1-W} \left(1 + 13.6 \frac{(0.92-W)^2}{1-W} \right) \right) \quad (3.4)$$

при $\text{tg } \delta \ll 1$

$$\epsilon = \epsilon_H \left(1 + \frac{3W}{D_1 - 1} \right), \text{ якщо } W=0.1 \div 0.15 \quad (3.5)$$

$$\epsilon = \epsilon_H \left[\left(1 + \frac{3W}{D_1 - 1} \right) \left[1 + 13.6 \frac{F(\epsilon_B + \epsilon_H)(0.92 - W)^2}{(\epsilon_B + 36.5\epsilon_H)(D_1 - W)} \right] \right] \quad (3.6)$$

де ϵ , ϵ_H , ϵ_B - діелектрична проникненість емульсії, речовини (нафти) і внутрішньої фази (води) відповідно.

W - об'ємний вміст внутрішньої фази (води)

$$D_1 = \frac{\epsilon_B + 2\epsilon_H}{\epsilon_B - \epsilon_H} \quad (3.7)$$

F - коефіцієнт флокуляції, показує відношення вологості, з концентрованих в флокулах до загальної вологості.

При вимірюванні вологості діелькометричним методом у вологомірах слід передбачити вплив на точність вимірювання таких факторів, як зміна густини, температури і тиск емульсії, хімічний склад дисперсного середовища і провідність фази, наявність емульгатора і вільного газу, осаду на електродах.

Нафта, що входить в склад водонафтової емульсії має складний склад, % мас.: вуглець 82-87, водень 11-15, сірка 0,1-0,7, азот до 2,2 та кисень до 1,5 і представляють собою складну природню суміш з вуглеводнів - метанових, нефтенових, ароматичних. Такого роду суміш зазвичай називають статичними, так як в них компоненти розміщені просторово неупорядковано та хаотично.

Справжнє значення діелектричної проникненості суміші (ϵ_{CM}) повинна лежати між значеннями, що визначаються за формулами (“нерівності Вінера”).

$$\frac{1}{\sum_{i=1}^{i=m} \left(\frac{y_i}{\epsilon_{ri}} \right)} \leq \epsilon_{CM} \leq \sum_{i=1}^{i=m} y_i \epsilon_{ri} \quad (3.8)$$

де ϵ_i - діелектрична проникненість компонентів суміші;

y_i - об’ємна концентрація компонентів в суміші;

m - число компонентів в суміші.

Для розрахунку діелектричної проникненості статистичної суміші найбільш підходящою є формула Ліхтенекера (логарифмічний закон зміщення):

$$\lg \epsilon_{CM} = \sum_{i=1}^{i=m} y_i \lg \epsilon_{ri} \quad (3.9)$$

З вище приведених формул випливає, що за рахунок непостійності складу нафти, що проходить через вологомір, буде змінюватися діелектрична проникненість суміші. Зміни діелектричної проникненості суміші можуть внести суттєві похибки в результат вимірювання вологості.

Діелектрична проникненість змінюється в залежності від частоти, так як з збільшенням частоти орієнтація диполів все більше не встигає за змінами змінного електричного поля. Частотну залежність діелектричної проникненості зазвичай називають дисперсією діелектричної проникненості. Залежність “ємність-частота” широко використовується для вимірювання вологості. В якості критерію вологості використовують відношення низької (2 Гц) і звичайної промислової частоти (50 Гц) ємностей діелектрика при різних частотах - при одній тій же температурі.

Вплив зміни температури і тиску враховується за допомогою температурного (ТК) і барометричного (ВК) коефіцієнтів діелектрична проникненості.

$$TK_{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon_{CM}} \cdot \frac{d\epsilon_{CM}}{\delta T} \quad (3.10)$$

$$BK_{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon_{CM}} \cdot \frac{d\epsilon_{CM}}{\delta p} \quad (3.11)$$

Оцінку похибок, обумовлених зміною температури, тиску, наявністю деемульгатора і інших домішок проводяться за формулами згідно таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Аналіз похибок дієлькометричного вологоміра

Причина похибки	Максимальна похибка (δ_{\max}) при зміні малих вологостей ($\delta_{\max} < 0.15\%$)	Максимальна похибка при зміні великих вологостей ($\delta_{\max} > 0.15\%$)
1. Зміна провідності дисперсної фази	$7,4 \cdot 10^{-19} \frac{f^2 \varepsilon}{\sigma^2}$	$7,4 \cdot 10^{-19} \frac{f^2 \varepsilon}{\sigma^2 (1 - W_{III})}$
2. Наявність емульгатора	$8.66 \frac{l}{d} \frac{\varepsilon - \varepsilon_H}{\varepsilon}$	$8.66 \frac{l}{d} \frac{\varepsilon - \varepsilon_H}{\varepsilon} \frac{2 - W_{III}}{1 - W_{III}}$
3. Зміна тиску	$0.145 \frac{A}{B} \frac{1 + W_{III}}{W_{III}} (P - P_0)$	$0.145 \frac{A}{B} \frac{(P - P_0)}{W_{III}}$
4. Наявність вільного газу	$\frac{W_r [\varepsilon(1 + 3W_{III}) - 1](1 - W_{III})}{3W [2\varepsilon(1 + 3W_{III}) + 1]}$	$0.19 \frac{W_r}{3W}$
5. Осадок домішок на електродах	$\frac{W_c}{3W_{III}} \left[\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} (1 + 3W_{III}) - 1 \right] (1 + W_{III})$	$\frac{W_c}{3W_{III}} \left[\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \frac{(1 + W_{III})}{(1 - W_{III})} - 1 \right] (1 + 2W_{III})(1 - W_{III})$
6. Зміна температури на емульсії	$d_n (T - T_0) \frac{1 + W_{III}}{3W_{III}}$	$0.38 d_n \frac{(T - T_0)}{W_{III}}$
7. Зміна дисперсного середовища	$\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{3W_{III}}$	

Примітка. W_r , W_c - відповідно об'ємний вміст газу і шару домішок в робочому просторі; W_{III} - похибка, пов'язана з шкалою вологоміра; A , B - коефіцієнти які характеризують речовину; P , T , P_0 , T_0 - відповідно значення тиску і температури при робочих умовах і температурі 20°C .

3.3 Розрахунок основної допустимої похибки дієлькометричного вологоміра

Методика розрахунку допустимої похибки наступна. Для визначення сумарної відносної похибки приладу користуємося наступними формулами.

$$\delta_z = \frac{\Delta_\Sigma}{U_{н.вих}} \quad (3.12)$$

$$\Delta_\Sigma = Z \cdot \sigma_\Sigma \quad (3.13)$$

де Δ_Σ - сумарне середньо - квадратичне відхилення(СКВ) похибок;

$U_{н.вих}$ - номінальне значення вихідної напруги;

Z - коефіцієнт Ст'юдента (коефіцієнт довіри), який по нормальному закону розподілу рівний $Z=1,96$.

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sum \sigma_i^2} \quad (3.14)$$

де σ_i - СКВ похибок окремих елементів і яке рівне

$$\sigma_i = \frac{\Delta_i}{Z} \quad (3.15)$$

де

$$\Delta_i = \delta_i \cdot U_n \quad (3.16)$$

Розрахуємо сумарну похибку розроблюваного нами генератора синусоїдальних коливань і дієлькометричного вологоміра в цілому.

3.3.1 Розрахунок похибки генератора синусоїдальних коливань

Так як в дипломному проекті здійснюється розрахунок генератора синусоїдальних коливань, то здійснимо розрахунок його сумарної похибки.

Генератор складається з транзисторів, конденсаторів і резисторів. Оскільки в розрахованій схемі певні групи елементів однотипні, то й відносна похибка даних елементів буде для всіх однакова. Відносна похибка цих елементів береться з довідника [16]. Тому для резисторів $\delta_R=0,5\%$ при цьому в схемі налічується 9 резисторів, для конденсаторів $\delta_C =1,0\%$ їх є 5, для транзисторів - $\delta_I =0,1\%$ при тому, що в схемі їх 2.

Для того, щоб обчислити сумарну похибку генератора необхідно при цьому від відносних похибок перейти до абсолютних, для цього відносну

похибку помножимо на номінальну напругу живлення кожного елемента, вона складає $U_{HR}=15$ В, $U_{HC}=15$ В, $U_{HT}=20$ В, тому перемноживши дані величини отримаємо:

$$\Delta R=(9 \cdot 0.005) \cdot 15=0.675$$

$$\Delta R=(5 \cdot 0.002) \cdot 15=0.375$$

$$\Delta R=(2 \cdot 0.001) \cdot 20=0.040$$

Тепер потрібно перейти до СКВ, при цьому отримані результати потрібно поділити на коефіцієнт Ст'юдента $Z=1,96$, зробивши цю операцію отримаємо:

$$\sigma_R = \frac{0.675}{1.96} = 0.334$$

$$\sigma_R = \frac{0.375}{1.96} = 0.191$$

$$\sigma_R = \frac{0.040}{1.96} = 0.020$$

Після цього знаходимо сумарну похибку генератора синусоїдальних коливань про те в СКВ тому підставивши у формулу (3.13) отримані дані отримаємо:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{0.334^2 + 0.191^2 + 0.020^2} = 0.385$$

Отримавши сумарну похибку вдосконаленого вузла в СКВ переходимо тим самим шляхом, що йшли сюди до відносної похибки вдосконаленого блоку за формулами (3.12), (3.13):

$$\Delta_{\Sigma}=0.385 \cdot 1.96=0.755$$

тоді

$$\delta_{\Sigma} = \frac{0.755}{24} = 0.037$$

Отже, сумарна похибка генератора складає 3,7%.

Тому можна зробити висновок, що, генератор синусоїдальних імпульсів має похибку, яка складає 3,7%. При такій похибці даний вузол дієлькометричного вологоміра можна вважати справним і придатним до роботи.

3.3.2 Розрахунок похибки дієлькометричного вологоміра

Розрахунок сумарної похибки проектованого рівнеміру проведемо аналогічно розрахунку сумарної похибки генератора. Вхідною інформацією при розрахунку сумарної похибки приладу є похибка кожного функціонального блоку, з якої він складається згідно МР.МТТм-06.00.00.001.

Наведемо значення похибок кожного функціонального вузла системи:

1. сумарна похибка дієлькометричного перетворювача, яка складає 2,0 % [16];
2. похибка диференційного моста - 0,01 % [16];
3. похибка генератора синусоїдальних коливань - 3,7 % (обчислена);
4. похибка підсилювача - 0,5 % [16];
5. похибка мікропроцесорного блоку - 0,01 % [16].

Розрахунок значень абсолютних похибок окремих блоків приладу наведено нижче:

$$\Delta_1 = 0.02 \cdot 5 = 0.1000$$

$$\Delta_2 = 0.001 \cdot 5 = 0.0050$$

$$\Delta_3 = 0.037 \cdot 15 = 0.5550$$

$$\Delta_4 = 0.05 \cdot 15 = 0.7500$$

$$\Delta_5 = 0.0001 \cdot 5 = 0.0005$$

Знайдемо СКВ кожної ланки згідно (3.14):

$$\sigma_1 = \frac{0.1000}{1.96} = 0.052$$

$$\sigma_2 = \frac{0.0050}{1.96} = 0.003$$

$$\sigma_3 = \frac{0.5550}{1.96} = 0.283$$

$$\sigma_4 = \frac{0.01}{1.96} = 0.005$$

$$\sigma_5 = \frac{0.0005}{1.96} = 0.003$$

Знаючи похибку кожного блоку, знайдемо СКВ похибок згідно (3.15)

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{0.052^2 + 0.003^2 + 0.283^2 + 0.005^2 + 0.003^2} = 0.288$$

Знайшовши СКВ, знайдемо сумарну відносну похибку рівнеміру за формулами (3.12), (3.13):

$$\Delta_{\Sigma}=0.288 \cdot 1.96=0.564$$

Згідно формули (3.16), прийнявши, що вихідна напруга системи - 15 В, знайдемо:

$$\delta_{\Sigma P} = \frac{0.564}{15} \cdot 100\% = 4.278\%$$

Таким чином сумарна похибка дієлькометричного вологоміру складає 2%, що є достатньою для проведення вимірювань вологості нафти.

Схема нагромадження похибок зображена на аркуші МР.МТТм-06.00.00.004.

3.4 Метрологічне забезпечення процесу вимірювання вологості нафти

Завдання метрологічного забезпечення вимірювання вологості нафти виникли порівняно недавно, після того як ці вимірювання посіли місце в одній із галузей аналітичної техніки. Як і перед іншими галузями вимірювальної техніки, основним завданням метрологічного забезпечення є збереження і підтримання точності і єдності вимірювання.

Метрологічна база вимірювання вологості в вигляді вихідних еталонів або еталонних установок і засоби передачі одиниць вимірювання до зразкових та робочих приладів в нашій країні, так як і в інших країнах знаходиться в процесі розробки. Для градуювання та повірки вологомірів найбільш важлива та обставина, що точність аналітичних методів в багатьох випадках не вище точності градуйованого чи повіряемого приладу. В багатьох випадках значення похибки лабораторних методів зовсім невідомі. Діючі стандарти, як правило, нормують лише допустимі розходження між паралельно проведеними дослідженнями, найчастіше для двох проб, так це прийнято для нафти (ГОСТ 2477 - 75) та для ряду інших матеріалів. Дані різниці характеризують, в кращому випадку, сходимість результатів вимірювання, проте не можуть характеризувати їх точність.

Градуювання та повірка вологомірів пов'язана з деякими ускладненнями. Для рідин можливе використання штучно приготовлених зразкових проб, атестованих за вологовмістом і представляють собою зразки досліджуваних рідин - абсолютно сухі та заданого вологовмісту; останні отримують точним дозуванням абсолютно сухої рідини та води.

Методика проведення і атестації таких проб в вигляді водонафтових емульсій була розроблена спеціально для повірки та градування електричних вологомірів для нафти []. Вона складається з декількох операцій, причому на кожному з цих етапів виготовлення оцінюється можлива гранично допустима похибка, що дозволяє виконувати розрахункову атестацію отриманої суміші.

Повне вилучення вологи з досліджуваної рідини досягається одним або декількома відомими способами - перегонкою, центрифугуванням, пропускання через шар твердого сорбенту (цеолітів). Атестація отриманої "абсолютно сухої" нафти повинна виконуватися доволі точним способом.

Дану суху нафту і воду дозують за об'ємом за допомогою мірних ємностей, виходячи з кількості та вологовмісту проби. Подальшим етапом є емульгування суміші за допомогою диспергантів. Що забезпечують диспергування води до величини дисперсної частинки, що не перевищує 10 мкм. Отримані емульсії нестійкі і повинні використовуватися на протязі 5 хв. Вони не можуть зберігатися та транспортуватися, тобто, вони не є стандартними зразками; такі зразком може бути тільки суха проба.

Повірка вологомірів для нафти по атестаційних штучним емульсіям передбачена в ГОСТ 14203 - 69, причому вологовміст емульсії повинно бути визначено з точністю, в 2,5 рази перевищуючою точність вологоміра.

ВИСНОВКИ

В магістерській роботі проведено аналіз абсолютних, хімічних та фізичних методів визначення вологості речовин. А саме, розглянуто такі методи: метод Діна і Старка, визначення вологості з допомогою волюметричного, титрометричного методів. Розглянуто основні відмінності та недоліки використання діелькометричного і кондуктометричного методу визначення вологості речовин. Проведено ознайомлення з ЯМР та НВЧ методами визначення вологості.

На основі проведеного порівняльного аналізу вище приведених методів вибрано діелькометричний метод вимірювання вологості нафти. Він найбільш придатний для контролю якості нафти. Це пов'язано з тим, що він якнайкраще реагує (з більшою точністю та достовірністю) на зміну діелектричної проникності речовини, що викликано вмістом в ній води. Оскільки відносна діелектрична проникність води $\epsilon_{\text{води}}=81$, тоді коли відносна діелектрична проникність нафти $\epsilon_{\text{нафти}}=2,0-2,7$ (в залежності від сорту нафти). Вибраний метод проаналізований теоретично, а також розглянемо його обґрунтування.

На основі теоретичного розгляду вияснив, які необхідно складові частини для роботи приладу, а також складено структурну та функціональну схеми.

На основі функціональної схеми розроблено електричну принципову схему, яка містить генератор синусоїдальних коливань з робочою частотою 10 кГц, діелькометричний перетворювач, вимірювальний міст, диференційний підсилювач і лінійний підсилювач вхідного сигналу, детектор, АЦП, мікропроцесор, блок обробки інформації, блок живлення. Проведено розрахунок блоку живлення, генератора, лінійного підсилювача. Вибрано радіо-елементи з обґрунтуванням їхніх номіналів.

Проведено розрахунок електромагнітного захисту приладів від дії електромагнітних хвиль.

Розроблено, виходячи з вимог функціональної схеми, конструкцію установки для вимірювання вологості нафти, яка складається з діелектричного перетворювача та вимірювального блоку. Спроектовано конструкцію діелектричного перетворювача.

Проведено метрологічний аналіз методичної похибки при вимірюванні вологості діелектричним методом, а також визначено інструментальну похибку вимірювального блоку. Сумарна відносна похибка приладу становить 3,73 % .

СПИСОК ПОСИЛАНЬ НА ЛІТЕРАТУРУ

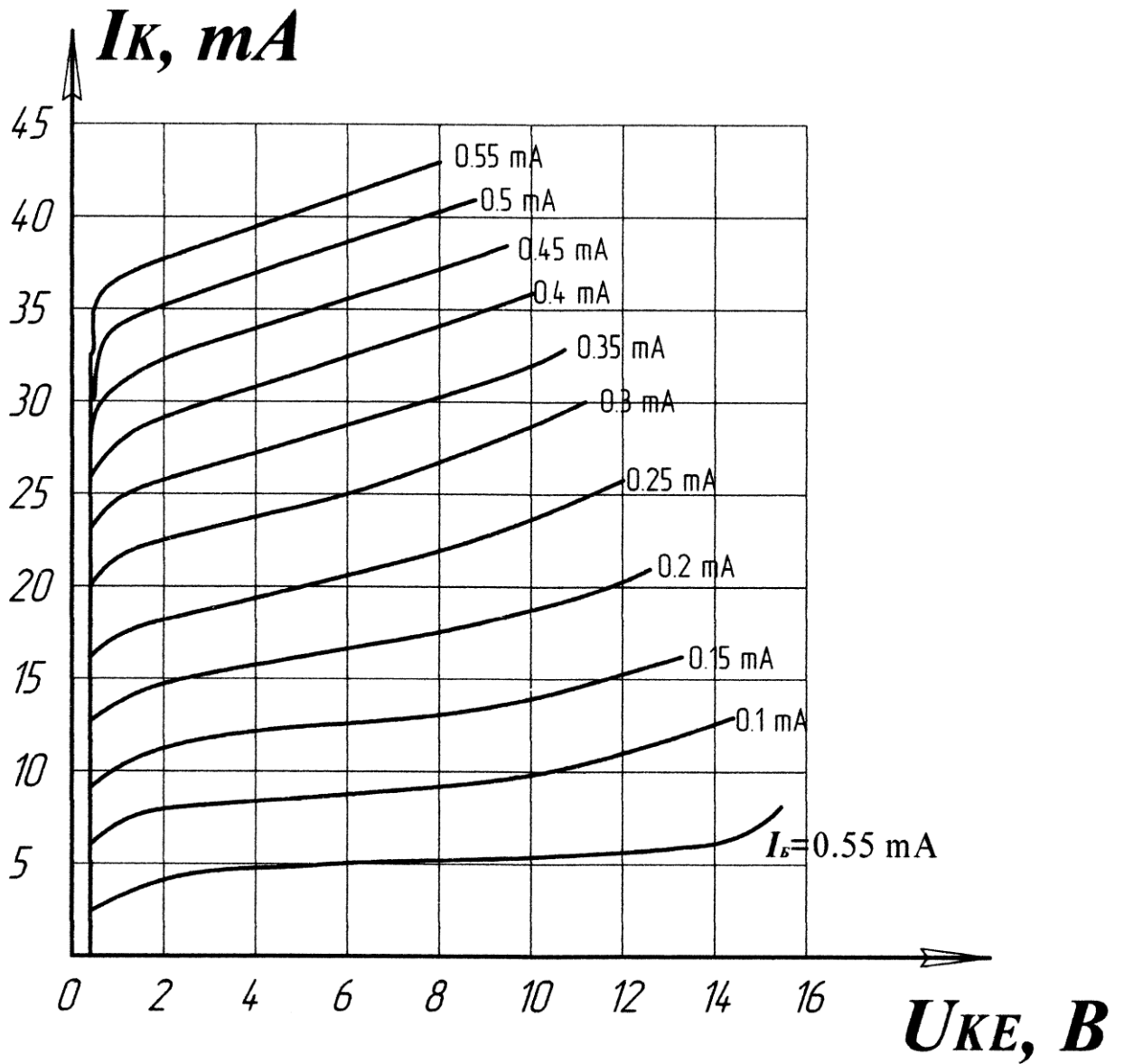
1. Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. — Д. : Донбас, 2004. — Т. 1 : А — К. — 640 с.
2. Лукінюк М. В. Технологічні вимірювання та прилади: Навч. посіб./ М.В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 436 с.
3. Муратов, В. Г. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади : навч. посіб. / Муратов Віктор Георгійович. - Вид. 2-е, допов. - Київ : Освіта України, 2016. - 364 с. : табл., рис.
4. Коряків В. І. Прилади в системах контролю вологості твердих речовин і їх метрологічні характеристики. / В. І. Коряків, А. С. Запорожець. – К. : Десна, 2012.
4. Богачук В. В. Методи та засоби вимірювального контролю вологості матеріалів. / В. В. Богачук. — В. : Лебідь, 2008.
5. Нестерчук Д.М. Н55 Методи і засоби вимірювань електричних та неелектричних величин: навчальний посібник / Д.М.Нестерчук, С.О.Квітка, С.В.Галько. – Мелітополь: Виданвничо-поліграфчний центр «Люкс», 2017. - 206 с.
6. Денісов А. К. Теплотехнічні вимірювання та прилади : навчальний посібник / А. К. Денісов, С. А. Денісов. – Рівне : НУВГП, 2013. – 184 с.
7. Методи та принципи побудови засобів вимірювання вологості середовища. Володимир Кононов, Олена Кононова, Володимир Олексюк / <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.2.031>
8. Вербицький Є.В.. Система електроживлення електронної апаратури. навчальний посібник / К.:НТУУ «КПІ». 2016. – 180 с.
9. Заболотний О.В., Марчук В.І., Караченцев В.Є. Проектування електронних пристроїв: навчальний посібник – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2018 – 360с.
10. Лавриненко, В. Ю. Довідник по напівпровідникових приладів Видавництво: Київ: Техніка; Видання 7-е, перероб. 576 сторінок; 1973 р.

11. П.Р. М.Терещук, К.М. Терещук, С.А.Седов. Довідник радіолюбителя. Вид. 2-е. – К.: Наукова думка, 1981. 670с.
12. Схемотехніка електронних систем: У 3 кн. :Підручник /В.І. Бойко, А.М. Гуржій, В.Я. Жуйков та ін.- 2-ге вид., допов. і переробл. Кн. 1.: Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої. – К.: Вища школа, 2004. – 366 с.
13. ДСТУ 8936:2019 Труби сталеві водогазопровідні. Технічні умови
14. ДСТУ 9218:2023 Труби сталеві зварні прямошовні. Технічні умови
15. ДСТУ ГОСТ 2477:2021 Нафта та нафтопродукти. Метод визначення вмісту води
16. Вологомір нафтопродуктів ИВН-3003 - Області застосування. <https://xn--90anfscfbdt.com.ua/ua/p775840048-ivn-3003-izmeritel.html>
17. Лободзінська Р.Ф., Костюк О.А., Нікольський О.І., Шеремета О.П. К65 Конструювання і технологія радіоелектронних засобів. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2007. – 91 с.
18. Задерейко О.В., Панов Л.І., Циганов О.В. Конструювання і технологія радіоелектронної апаратури: Навч. посіб. - О.: Наука і техніка, 2007. - 122 с.
19. Барась С.Т. Конструювання радіоелектронних засобів телекомунікаційних систем. Навчальний посібник. / Барась С.Т., Лободзінська Р.Ф., Лазарєв О.О. – Вінниця: ВНТУ, 2004. – 82 с.
20. Воробйова О.М. Цифрові пристрої: навч. посіб. – Ч. 2 / О.М. Воробйова, М.П. Савицька, Ю.В. Флейта. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2016. – 80 с.
21. Організація ліній інтерфейсу. Інтерфейси ПК. https://e-tk.lntu.edu.ua/pluginfile.php/5152/mod_resource/content/1/%D0%90%D0%A0%D0%A52_%D0%9B%D0%95%D0%9A11.pdf

ДОДАТКИ

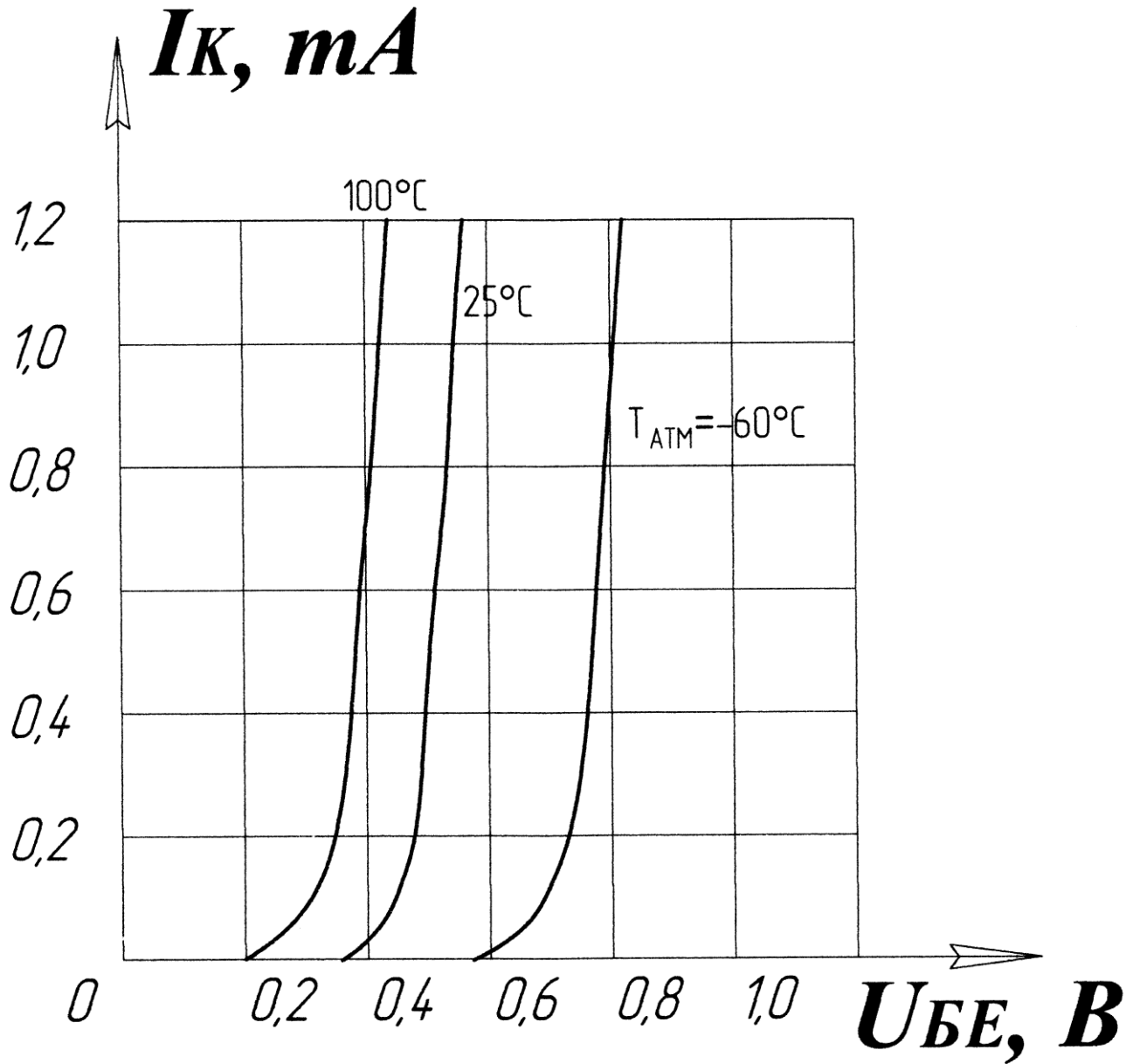
Додаток А

Вихідна характеристика транзистора КТ315Б



Додаток Б

Вхідна характеристика транзистора КТ315Б



Додаток В

Розрахунок параметрів вимірювального моста

i:=1...3

a:=0.015 b:=0.73

 $\varepsilon_1:=81$ $\varepsilon_2:=2.6$ $\rho:=810$ $\rho\nu:=1000$ $\sigma_1:=30\cdot 10^{-6}$ f:=10000 $\omega:=2\cdot 3.14\cdot f$ $\varepsilon_0:=8.85\cdot 10^{-12}$ $W_i:=$

10
20
40

$$\varepsilon\nu_{1_i} = \varepsilon_2 + \left[\frac{W_i \cdot \rho \cdot \varepsilon_2 \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{100 \cdot \rho\nu \cdot (a \cdot \varepsilon_1 + b \cdot \varepsilon_2)} \right] + \left[\frac{\rho \cdot \varepsilon_2^2 \cdot W_i \cdot (a + b) \cdot \sigma_1^2 \cdot a}{100 \cdot \rho\nu \cdot (a^2 \cdot \sigma_1^2 + \omega^2 \cdot \varepsilon_0^2) (a \cdot \varepsilon_1 + b \cdot \varepsilon_2)^3} \right]$$

 $\varepsilon\nu_{1_i} =$

8.261
13.922
25.243

i:=1...3

a:=0.020 b:=0.95

 $\varepsilon_1:=81$ $\varepsilon_2:=2.0$ $\rho:=810$ $\rho\nu:=1000$ $\sigma_1:=30\cdot 10^{-6}$ f:=10000 $\omega:=2\cdot 3.14\cdot f$ $\varepsilon_0:=8.85\cdot 10^{-12}$ $W_i:=$

10
20
40

$$\varepsilon\nu_{2_i} = \varepsilon_2 + \left[\frac{W_i \cdot \rho \cdot \varepsilon_2 \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{100 \cdot \rho\nu \cdot (a \cdot \varepsilon_1 + b \cdot \varepsilon_2)} \right] + \left[\frac{\rho \cdot \varepsilon_2^2 \cdot W_i \cdot (a + b) \cdot \sigma_1^2 \cdot a}{100 \cdot \rho\nu \cdot (a^2 \cdot \sigma_1^2 + \omega^2 \cdot \varepsilon_0^2) (a \cdot \varepsilon_1 + b \cdot \varepsilon_2)^3} \right]$$

$$\varepsilon v_{2_i} =$$

5.83
9.659
17.319

$$l := 0.6 \quad R1 := 0.159 \quad R2 := 0.042$$

$$C1_i := \frac{2 \cdot 3.14 \cdot \varepsilon v_{1_i} \cdot \varepsilon_0 \cdot l}{\ln\left(\frac{R1}{R2}\right)} \quad C2_i := \frac{2 \cdot 3.14 \cdot \varepsilon v_{2_i} \cdot \varepsilon_0 \cdot l}{\ln\left(\frac{R1}{R2}\right)}$$

$$C1_i :=$$

$2.069 \cdot 10^{-10}$
$3.487 \cdot 10^{-10}$
$6.323 \cdot 10^{-10}$

$$C2_i :=$$

$1.46 \cdot 10^{-10}$
$2.42 \cdot 10^{-10}$
$4.338 \cdot 10^{-10}$

$$\varepsilon 1 := 2.6$$

$$\varepsilon 2 := 2.0$$

$$C1 := \frac{2 \cdot 3.14 \cdot \varepsilon 1 \cdot \varepsilon_0 \cdot l}{\ln\left(\frac{R1}{R2}\right)}$$

$$C2 := \frac{2 \cdot 3.14 \cdot \varepsilon 2 \cdot \varepsilon_0 \cdot l}{\ln\left(\frac{R1}{R2}\right)}$$

$$C1 = 6.513 \cdot 10^{-11}$$

$$C2 = 5.01 \cdot 10^{-11}$$