

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. С. Звягін**

**ЧАСТОТНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ  
ДЛЯ КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ  
НАФТОПРОДУКТІВ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2014

УДК: 621.382

ББК 32.854.2

О-72

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 3 від 31.10.2013 р.)

Рецензенти:

**О. М. Шинкарук**, доктор технічних наук, професор

**В. Ю. Кучерук**, доктор технічних наук, професор

**Осадчук, В. С.**

О-72 Частотні перетворювачі для контролю вологості нафтопродуктів : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. С. Звягін. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 152 с.

ISBN 978-966-641-565-6

В монографії проаналізовано сучасний стан частотних перетворювачів для контролю вологості нафтопродуктів, подано основи побудови мікроелектронних перетворювачів вологості з частотним виходом на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором. Розглянуто принципи побудови, електричні схеми і експериментальні дослідження основних параметрів частотних перетворювачів вологості. Монографія розрахована на наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються проектуванням і розробкою мікроелектронних перетворювачів вологості, а також на аспірантів та студентів вищих технічних навчальних закладів.

УДК 621.382; 621.317

ББК 32.854.2

ISBN 978-966-641-565-6

© В. Осадчук, О. Осадчук, О. Звягін 2014

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП .....	6
1 СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ ВОЛОГОСІ.....	9
1.1 Особливості об'єкта вимірювання.....	9
1.2 Сучасні засоби і пристрої для вимірювання та контролю вологості .....	12
1.3 Засоби і пристрої для вимірювання та контролю вологості нафтопродуктів та їх класифікація .....	18
2 ПЕРВИННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ВОЛОГОСТІ НАФТОПРОДУКТІВ НА ОСНОВІ КОНДЕНСАТОРНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ СТРУКТУР.....	29
2.1 Модель вологочутливої конденсаторної циліндричної структури з сіткоподібними електродами.....	29
2.2 Модель вологочутливої конденсаторної циліндричної структури з циліндричними електродами.....	39
3 АВТОГЕНЕРАТОРНІ ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ НАФТОПРОДУКТІВ.....	45
3.1 Дослідження та вибір автогенераторних засобів контролю вологості нафтопродуктів .....	45
3.2 Дослідження характеристик автогенераторного засобу контролю вологості нафтопродуктів на основі структури р-п-р біполярного і двозатворного польового транзисторів .....	52
3.3 Дослідження характеристик автогенераторного засобу контролю вологості нафтопродуктів на основі структури п-р-п біполярного і двозатворного польового транзисторів .....	69
3.4 Дослідження характеристик автогенераторного засобу контролю вологості нафтопродуктів на основі структури біполярного і польового транзисторів.....	83

3.5 Дослідження характеристик автогенераторного засобу контролю вологості нафтопродуктів на основі структури з двох польових транзисторів .....	96
3.6 Порівняння розроблених автогенераторних засобів контролю вологості нафтопродуктів .....	110
<b>4 ЗАСТОСУВАННЯ АВТОГЕНЕРАТОРНОГО ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ НАФТОПРОДУКТІВ В НАФТОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ .....</b>	<b>112</b>
4.1 Система вимірювання та контролю кількості і показників якості сирової нафти.....	112
4.2 Розробка мікропроцесорної системи контролю вологості нафтопродуктів .....	117
4.3 Розрахунок похибок автогенераторних засобів контролю вологості нафтопродуктів .....	127
4.4 Оцінювання вірогідності контролю вологості нафтопродуктів .....	135
<b>ЛІТЕРАТУРА .....</b>	<b>139</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АВН – автогенераторний засіб контролю вологості нафтопродуктів;  
АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;  
БВЛ – блок вимірювальних ліній;  
БВЯ – блок вимірювання показників якості;  
БЕ – блок електронний;  
БЕЗ – блок еталонних засобів;  
БФ – блок фільтрів;  
ЕОМ – електронна обчислювальна машина;  
КЦС – конденсаторна циліндрична структура;  
НВЧ – надвисокочастотний;  
ПВП – пробовідбірний пристрій;  
ПК – персональний комп'ютер;  
ПП – первинний перетворювач;  
СВКНС – система вимірювання кількості та параметрів якості сировини нафти;  
СОІ – система обробки інформації;  
ТПУ – трубопоршнева установка;  
ЧГВО – частотний генератор на основі від'ємного опору.

## ВСТУП

Паливно-енергетичний комплекс нашої країни не обходиться без таких речовин, як нафта та газ. При переробці нафти отримують бензини, мазут, масла та інші нафтопродукти, які при транспортуванні трубопроводом можуть спотворювати покази витратомірів при наявності в них навіть малих домішок води. Контроль вологості нафти та нафтопродуктів дозволяє забезпечити їхню якість.

Одне з провідних місць у вимірювальній техніці займають прилади для вимірювання та контролю вологості. Розробка та вдосконалення цього класу вимірювальних приладів зумовлені підвищенням вимог точності до них при одночасному поліпшенні експлуатаційних умов.

На сьогоднішній день відомо чимало різноманітних приладів для вимірювання та контролю вологості [1–39]. Розробками теорії та практичного застосування сенсорів в Україні займаються такі наукові заклади, як НТУУ «Київський політехнічний інститут» (м. Київ), Інститут Кібернетики НАН України (м. Київ), Інститут теплофізики НАН України (м. Київ), Київський національний університет імені Тараса Шевченка (м. Київ), Інститут фізики напівпровідників НАН України (м. Київ), Інститут метрології (м. Харків), Національний технічний університет «Львівська політехніка» (м. Львів), Харківський національний технічний університет (м. Харків), ВАТ «Український науково-дослідний інститут аналітичного приладобудування» України (м. Київ), Вінницький національний технічний університет (м. Вінниця).

Подальші наукові дослідження цього напрямку розвинуті в науковій школі Вінницького національного технічного університету, а саме: дослідження теоретичних основ реактивних властивостей і від'ємного опору у напівпровідникових приладах подано у монографіях професора В. С. Осадчука [9, 10, 40, 41], розвиток теорії від'ємного опору і оцінки ефективності пристроїв з його використанням розглянуто в працях професора М. А. Філінюка [42–44], розробка теорії мікроелектронних частотних приладів на основі транзисторних структур з від'ємним опором і її використання подано у працях професора О. В. Осадчука [9, 10, 16, 45].

Визначення вологості у нафті та нафтопродуктах, а саме в маслах завжди було однією з головних проблем для фахівців. Вода, яка присутня в гідравлічних і мастильних рідинах, навіть в дуже малих кількостях може викликати значні пошкодження технологічних вузлів, які потребують змащування деталей. Волога, присутня в мастильних матеріалах, зменшує міцність плівки, що спричиняє зменшення міцності при стиранні і збільшенні корозії. Вода здатна вступати в реакцію з іншими домішками, присутніми в нафті та нафтопродуктах, і при цьому отримані продукти реакції можуть бути небезпечні для деяких металів. Також вода, наявна в нафтопродуктах, збільшує всмоктування повітря та ймовірність кавітації, а в ізоляційних маслах волога в кількості, що перевищує допустиму норму, може призвести до передчасного зносу масла та електричного пробою. Вода, наявна у нафті, сприяє корозії, при її транспортуванні може спотворювати покази витратомірів, а також призводить до передчасного зношення обладнання та виникнення аварійних ситуацій. Без відповідних пристроїв та засобів контролю залишені без уваги перераховані негативні ефекти можуть швидко призвести до серйозних аварій. Точність і надійність систем управління і регулювання технологічними процесами та безпека роботи промислових установок в нафтовій промисловості визначається за допомогою приладів для вимірювання та контролю вологості нафтопродуктів. Неперервний контроль вологості нафти та нафтопродуктів необхідний для прийняття правильного рішення для забезпечення якості нафтопродуктів і підтримки вологості в допустимих межах.

У нафтовій промисловості вологоміри використовуються: під час індивідуальних вимірювань у свердловинах, групових виробничих вимірюваннях, а також під час контролю зневоднювання сировини нафти в нафтосховищах, і мають відповідати низці вимог, а саме: бути економічними, мати малу вагу, габарити та енергоспоживання, бути сумісними з сучасними ЕОМ. Також одним з важливих факторів є те, що при віддаленості (іноді на великі відстані) об'єкта контролю від системи контролю вологоміри мають забезпечувати передачу сигналу на відстань. Але найголовніше – вони мають забезпечувати високу точність та чутливість вимірювання. Тому виникає задача підвищення чутливості визначення вмісту вологості нафтопродуктів. Значного підвищення чутливості можна досягнути через перетворення інформа-

тивного сигналу в частотний. В частотних приладах для вимірювання вологості забезпечується можливість досягнення значно більших точностей вимірювання, ніж при використанні амплітудних сенсорів. Так, зразкові міри частоти можна виконати зі значно більшою стабільністю, ніж зразкові міри електричної напруги або струму. Перевага використання частотної форми вихідного інформативного сигналу пояснюється його простотою та точністю перетворення в цифровий код, можливістю бездротової передачі на відстань, зручністю при комутації в багатоканальних інформаційно-вимірювальних системах, а головне – завадостійкістю.

Виходячи з вищесказаного, перспективним науковим напрямком є розробка та створення автогенераторних засобів контролю вологості нафтопродуктів, в яких у якості первинного датчика використовується ємнісний датчик. В залежності від чутливості ємнісного датчика та коефіцієнта перетворення автогенератора, до якого він підключається, залежить вірогідність контролю. Для цього підходять конденсаторні циліндричні структури, чутливість і точність яких залежить від конструкції, а застосування автогенераторів з від'ємним опором дозволяє компенсувати активні втрати, тобто підвищити коефіцієнт передачі. Тому стає очевидною необхідність розробки принципів роботи і теоретичних засад створення автогенераторних засобів контролю вологості нафтопродуктів на основі конденсаторних циліндричних структур з частотним виходом, а також необхідність розробки схем, конструкцій, експериментального дослідження параметрів, оцінювання їх метрологічних характеристик, розробки мікропроцесорної системи для контролю вологості нафтопродуктів в промисловості та впровадження їх у виробничий процес.



# 1 СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ ВОЛОГОСІ

На сьогодні існує чимало різноманітних приладів для вимірювання фізичних величин [1, 36, 46, 47], але одне із провідних місць у цьому довгому списку займають прилади для вимірювання вологості [9, 35, 48]. Необхідність створення такого класу приладів виникає, насамперед, через залежність багатьох технологічних процесів від вологості, в таких галузях промислової індустрії, як металургія, енергетика, авіаційна та космічна техніка, хімічна та нафтогазова промисловість [37]. Оскільки сучасний стан науки та техніки висуває підвищені вимоги до засобів вимірювання та контролю вологості, тому проблема розробки та дослідження різноманітних приладів вологості, принцип дії яких базується на зміні електрофізичних параметрів [9], є актуальною на сьогоднішній день.

Останнім часом спостерігається високий рівень розвитку сучасних контрольних-вимірювальних приладів і систем для вимірювання вологості, що включають в себе засоби обчислювальної техніки з використанням мікропроцесорних засобів вимірювань з вбудованими цифровими блоками опрацювання і керування. Такі досягнення стали можливими через інтенсивний розвиток за останні десятиріччя технологій мікроелектроніки для виробництва сенсорів.

Перспективним напрямом в розробці приладів для визначення вологості є створення автогенераторних засобів контролю вологості нафтопродуктів на основі конденсаторних циліндричних структур. При цьому існує перевага використання в якості інформативного сигналу приладу частоти над його аналоговою формою, у вигляді напруги або струму, що обумовлена простотою та точністю перетворення частоти в цифровий код, його високою завадостійкістю при передачі та ефективністю комутації в багатоканальних вимірювальних системах [10]. Саме проблематика цих питань розглядається в цьому розділі.

## 1.1 Особливості об'єкта вимірювання

Вода є складовою частиною багатьох органічних та неорганічних матеріалів. Присутність води в матеріалах навіть в невеликій кількості суттєво впливає на фізико-хімічні та електричні властивості. Для вимірювання вологи важливо знати, в якому виді зв'язку перебуває вода з матеріалом. В залежності від форми енергії зв'язку і виду матеріалу волога може бути у вигляді вільної води, капілярно зв'язаної (фізико-механічний зв'язок), адсорбційно зв'язаної (фізико-хімічний зв'язок) та хімічно зв'язаної [37].

Найбільш міцно утримується хімічно зв'язана вода. Її молекули входять до складу матеріалу і відділяються лише за допомогою хімічних реакцій. Адсорбційно зв'язана вода утворюється в результаті впливу молекулярного силового поля. На початковому етапі сорбції на поверхні матеріалу утворюється мономолекулярний шар, що найбільш міцно зв'язаний з поверхнею адсорбенту. Цей шар сорбує наступні шари, які є менш зв'язаними. Капілярно зв'язана вода утворюється в мікрокапілярах поглинанням води з вологого повітря або безпосередньо взаємодією речовини з водою. Причиною виникнення такої форми зв'язку є капілярний тиск, обумовлений кривизною поверхні рідини в капілярах. Така вода отримала назву гігроскопічної. В низці процесів одна форма зв'язку поступово може переходити в іншу.

Існують різноманітні одиниці вимірювання для визначення вмісту вологи в газоподібних, рідких та твердих середовищах. Так, в парогазовій суміші вміст вологи вимірюють в одиницях абсолютної вологості, парціального тиску пари води, об'ємного вологовмісту, відносної вологості, температури точки роси, масовому вологовмісту та молярної частки водяного пару [9, 35, 37, 46].

Абсолютна вологість  $W_A$  показує, яка маса водяного пару міститься в  $1 \text{ м}^3$  газу, вимірюється зазвичай в  $\text{г/м}^3$  [9]:

$$W_A = \frac{m_{H_2O}}{V_G}, \quad (1.1)$$

де  $m_{H_2O}$  – маса водяного пару;  $V_G$  – об'єм газу.

Парціальний тиск водяного пару  $p_U$  вимірюється в гектопаскалях ( $1 \text{ ГПа} = 100 \text{ Па}$ ) – це тиск, який міг би мати водяний пар, що входить до складу газової суміші, якщо б він один займав весь об'єм суміші.

Об'ємний вологовміст  $x$  (або об'ємна концентрація парів води) визначається як відношення об'єму водяного пару до об'єму газу.

Під масовим вологовмістом  $r$  розуміють відношення маси водяного пару до маси сухого газу [9]:

$$r = \frac{m_{H_2O}}{m_G}, \quad (1.2)$$

де  $m_G$  – маса сухого газу.

Об'ємний та масовий вологовмісти вимірюються в ppm, використовуються для дуже малих концентрацій вологи ( $1 \text{ ppm} = 10^{-4} \%$ ).

Відносна вологість  $U$  – це відношення парціального тиску водяного пару  $p_U$  при температурі  $T$  до тиску насиченого пару  $p_S$  при цій же температурі [35]:

$$U = \frac{p_U}{p_S} \cdot 100\% . \quad (1.3)$$

Молярна частка водяного пару  $S$  дорівнює відношенню числа молей водяного пару до загального числа молей вологого газу [37].

Під температурою точки роси  $T_p$  розуміють таку температуру, при ізобарному охолодженні з якої починається конденсація пари води, що міститься в газі [9].

Для визначення вмісту вологи в рідких та твердих матеріалах використовують такі величини, як вологість та вологовміст. Існує масовий та об'ємний вологовміст, а також масова та об'ємна вологість.

Під масовим вологовмістом  $u$  розуміють відношення маси вологи  $M$ , що міститься в матеріалі до маси абсолютно сухого матеріалу  $M_0$  [37]:

$$u = \frac{M}{M_0} . \quad (1.4)$$

Під масовою вологістю  $W$  розуміють відношення маси вологи  $M$ , що міститься в матеріалі, до маси вологого матеріалу  $M_1$  [37]:

$$W = \frac{M}{M_1} = \frac{M}{M_0 + M} . \quad (1.5)$$

Перехід від масового вологовмісту до масової вологості може бути здійснений за виразом [37]

$$W = \frac{u}{1 + u} . \quad (1.6)$$

В деяких випадках користуються величинами, що характеризують вміст вологи в одиниці об'єму матеріалу.

Так, об'ємна вологість визначається за виразом [37]

$$W_{об} = \frac{M}{V} = \frac{V_B}{V} \rho_B = W \rho , \quad (1.7)$$

а об'ємний вологовміст – за виразом [37]

$$u_{об} = \frac{M}{V_0} = \frac{V_B}{V_0} \rho_B = u \rho_0, \quad (1.8)$$

де  $V, V_0, V_B$  – об'єм вологого, абсолютно сухого матеріалу та води, відповідно;  $\rho, \rho_0, \rho_B$  – густина вологого, абсолютно сухого матеріалу та води, відповідно.

Далі в роботі при проведенні вимірювань буде використовуватись така одиниця вимірювання, як масова вологість.

## 1.2 Сучасні засоби і пристрої для вимірювання та контролю вологості

Всі існуючі засоби для вимірювання вологості можна поділити на три великих групи, в залежності від того, в яких речовинах має вимірюватись вологість: твердих, рідких чи газоподібних. Кількісне визначення та контроль вологості твердих матеріалів, рідин та газів є необхідним майже у всіх галузях промисловості.

Важливе практичне значення має вимірювання вологості повітря, газів та газових сумішей. Вологість повітря є одним із основних технологічних параметрів у засобах для кондиціонування повітря та вентиляції. Контроль вологості повітря необхідний для створення штучного клімату на робочих місцях та в побуті.

В роботах [2–6, 49–62] наведені різноманітні засоби для вимірювання і контролю вологості повітря. Так, в роботі [49] описано резистивний сенсор вологості, оснований на нанокристалах  $BaNbO_3$ . Сенсор має добру чутливість до вологості. Опір зменшується від 932,4 МОм до 2,2 МОм при збільшенні відносної вологості від 10 % до 80 %. Час реакції і час відновлення сенсора складають 12 с та 32 с при зміні відносної вологості від 20 % до 60 %, відповідно. Дослідження нанокристалів  $BaNbO_3$  показали, що вони є чудовим матеріалом для застосування у високоточних засобах для вимірювання вологості. В роботі [50] показано розробку і виробництво керамічного товстоплівкового сенсора вологості, що оснований на  $MnZn$  фериті, сенсор на основі плівок нанопористого оксиду алюмінію описаний в роботі [51].

У емнісних сенсорах вологості вологочутливим шаром, в основному, є органічні полімери, що змінюють свої фізико-хімічні властивості при сорбції вологи. Органічна полімерна плівка в таких сенсорах може служити або самостійним вологочутливим шаром, або з добавками неорганічних вологочутливих сполук (звичайно солей хлористо-

го літію чи хлористого кальцію) чи негігроскопічних провідних частинок (дрібнодисперсного вуглецю, золота, срібла, паладію та інших).

На рис. 1.1 зображено конструкцію ємнісного сенсора вологості [2], який складається з діелектричної підкладки, на якій розташовані електроди з шаром вологочутливого матеріалу між ними, причому верхній електрод виготовлений з вологочутливого матеріалу та електропровідних мікрочастинок.

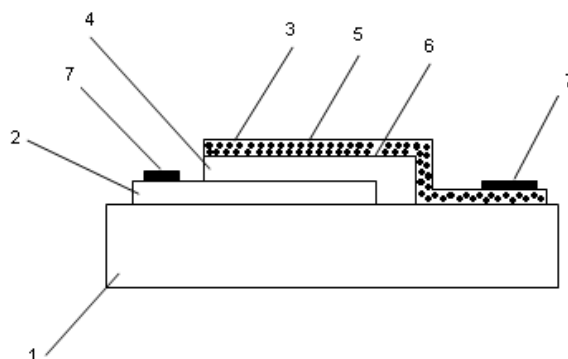


Рисунок 1.1 – Сенсор вологості [2]: 1 – діелектрична підкладка; 2 – електрод; 3 – верхній електрод; 4 – шар вологочутливого матеріалу; 5 – вологочутливий матеріал; 6 – електропровідні мікрочастинки; 7 – виводи

При відсутності вологи в середовищі стан сенсора вологості залишається незмінним, оскільки відстань між електропровідними частинками 6 така, що робить неможливим їх безпосередній контакт. При наявності в середовищі вологи молекули води спершу абсорбуються вологочутливим матеріалом 5 верхнього електрода 3, внаслідок чого стає можливим електричний контакт між електропровідними мікрочастинками 6, введеними в об'єм вологочутливого матеріалу 5. Залежно від кількості абсорбованої вологи, яка пропорційна вологості середовища, змінюється кількість електропровідних мікрочастинок 6, які контактують між собою. На початку процесу вимірювання переважатиме зміна кількості таких електропровідних мікрочастинок 6 по площі поверхні верхнього електрода 3. Це еквівалентно зміні площі верхнього електрода 3 конденсатора, утвореного електродом 2 та верхнім електродом 3, і діелектричними шарами вологочутливого матеріалу 4 і вологочутливого матеріалу 5 верхнього електрода 3. Зміна площі електрода конденсатора приводить до зміни його ємності, величина якої показує вологість середовища. Після того, як волога буде абсорбована всією поверхнею вологочутливого матеріалу 5 верхнього електрода 3, переважатиме об'ємна абсорбція вологи, при якій буде відбуватися

електричний контакт електропровідних мікрочастинок 6 в об'ємі вологочутливого матеріалу 5. В цьому випадку ємність утвореного конденсатора змінюватиметься за рахунок зміни товщини діелектричного шару конденсатора утвореного шаром вологочутливого матеріалу 4 і тією частиною вологочутливого матеріалу 5, до якого волога ще не проникла. При достатньому рівні вологості середовища волога абсорбується вологочутливим матеріалом 5 і проникатиме в шар вологочутливого матеріалу 4. В цьому випадку ємність утвореного конденсатора змінюється за рахунок зміни діелектричних властивостей шару вологочутливого матеріалу 4, які змінюються внаслідок абсорбції ним вологи [2].

Для вимірювання та контролю вологості газів використовують засоби [11, 12, 15, 28, 29, 47, 63–71]. На рис. 1.2 [65] зображена конструкція гігрометра.

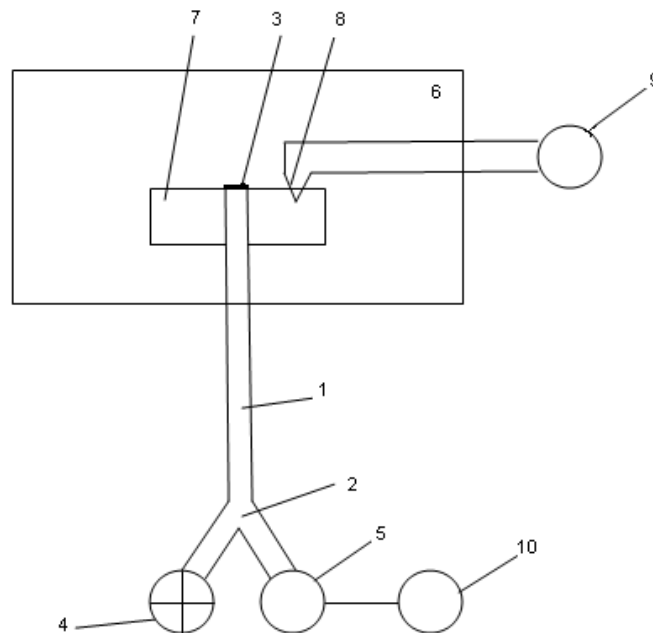


Рисунок 1.2 – Гігрометр [65]: 1 – світловод; 2 – відгалужувач; 3 – торець; 4 – джерело світла; 5 – фотоелемент; 6 – обмежений об'єм контрольованого газу; 7 – охолоджувач; 8 – термопара; 9 – гальванометр; 10 – амперметр

Гігрометр працює таким чином. Світло по світловоду 1 від джерела світла 4 через спрямований відгалужувач 2 направляють до торця світловода 3. При цьому сам світловод поміщають в обмежений об'єм контрольованого газу так, щоб його торець перебував у тепловому контакті з охолоджувачем 7. Якщо поверхня торця чиста, то світло виходить у навколишній простір і розсіюється. Якщо ж на поверхню

торця в результаті його охолодження осяде роса, то частина світла з оптичного волокна розсіється у зворотному напрямку й по світловоду частково потрапить через зворотне плече спрямованого відгалужувача на фотоелемент 5, струм у ланцюзі фотоелемента зростає, що зафіксує амперметр 10. У цей момент одночасно за допомогою термопари 8 і гальванометра 9 вимірюють температуру пари охолоджувач–торець оптичного волокна в області їхнього теплового контакту – це й буде температура точки роси контрольованого газу. Далі за величиною температури точки роси газу та наявними табличними даними визначають вологість газу.

Вимірювання вологості широко використовується і в сільському господарстві. Контроль вологості ґрунтів потрібний для правильного визначення термінів оранки та внесення добрив, а також тривалості поливу [31, 72]. Контроль вологості зерна [18, 25–27, 38, 73–76] та інших сільськогосподарських культур дає змогу правильно організувати технологічний процес зберігання і переробки та запобігти збиткам.

На рис. 1.3 [25] наведено структурну схему перетворювача вологості зерна, яка передбачає визначення параметрів досліджуваного матеріалу на двох частотах  $f_1$  і  $f_2$ . Досліджуваний матеріал розміщують в ємнісний перетворювач, який в свою чергу під'єднують до первинного перетворювача (ПП), що дозволяє неелектричний параметр – вологість – перетворити в електричний сигнал (напругу або струм).

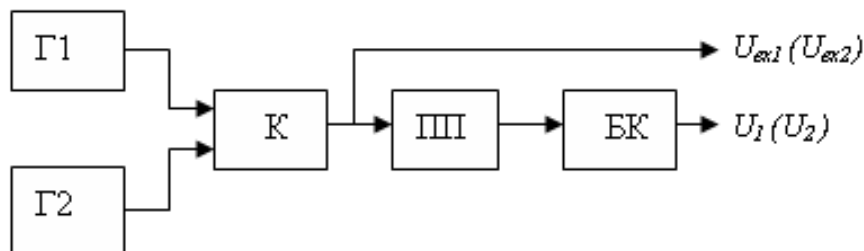


Рисунок 1.3 – Структурна схема вимірювального перетворювача вологості [25]

Отримані значення електричних величин дозволяють визначити вологість досліджуваного матеріалу за виразом [25]

$$W = a + b \cdot \left( \frac{U_1}{U_{вх1}} - \frac{U_2}{U_{вх2}} \right),$$

де  $a$  і  $b$  – коефіцієнти, що визначаються шляхом багатofакторного експерименту і для різних матеріалів різні;  $U_{ex1}$  і  $U_{ex2}$  – значення напруги на вході ПП на частотах  $f_1$  і  $f_2$ , відповідно;  $U_1$  і  $U_2$  – значення напруги на виході ПП на частотах  $f_1$  і  $f_2$ , відповідно.

Гармонічні сигнали  $f_1$  і  $f_2$  однакової амплітуди від генераторів  $\Gamma_1$  і  $\Gamma_2$  за допомогою комутатора  $K$  по чергово подаються на первинний перетворювач ПП. З виходу ПП через буферний каскад (БК) знімається вихідна напруга  $U_1$  або  $U_2$  (в залежності від того, який із генераторів живить первинний перетворювач).

В будівництві від контролю вологості залежать основні властивості будівельних матеріалів, теплофізичні, теплозахисні характеристики, а, відповідно, і довговічність, міцність та надійність будівель та конструкцій [7].

У промисловості вологість сировини і напівфабрикатів дуже впливає на якість продукції і продуктивність устаткування. У низці галузей промисловості (текстильній, легкій, харчовій, хімічній та інших) основні технологічні процеси тісно зв'язані зі змінами вологості оброблюваних матеріалів.

На рис. 1.4 [77] показано засіб для вимірювання вологості матеріалів хімічної промисловості.

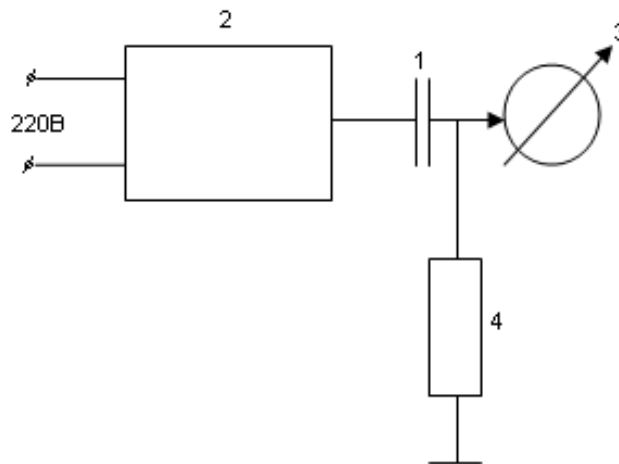


Рисунок 1.4 – Засіб для вимірювання вологості матеріалів хімічної промисловості [95]: 1 – ємнісна комірка; 2 – джерело живлення; 3 – вольтметр; 4 – вхідний опір вольтметра

В основі вимірювання вологості таким засобом лежить ємнісний метод. Ємнісна комірка являє собою кварцову ампулу, поміщену між щільно прилягаючими електродами конденсатора.



В роботах [78–80] наведені конструкції пристроїв вологості, що використовуються для текстильної галузі промисловості.

В харчовій промисловості використовують вологоміри, описані в роботах [48, 81]. На рис. 1.5 [48] зображено двохвилевий вологомір для сипучих матеріалів, який складається з первинного вимірювального тракту та вторинного засобу вимірювання.

На модуляторі 4, який приводиться в рух синхронним двигуном 3, встановлено два світлофільтри. Довжини хвиль опорного та вимірювального каналів складають 1,9 мкм (вимірювальна) та 1,7 мкм (опорна). При обертанні модулятора світловий промінь від джерела випромінювання 7 (лампи розжарення), з частотою 100 Гц переривається і на дзеркало 2 по чергово попадають потоки випромінювання, які пройшли через перший та другий світлофільтри, відповідно, на опорній та вимірювальній довжині хвилі. Поворотне дзеркало направляє потоки, що чергуються в часі, на контрольований об'єкт 8. Відбиті від обох потоків частки випромінювання збираються ввігнутим дзеркалом 5 і фокусуються на світлочутливу поверхню фотоприймача 7. Сигнал з виходу фотоприймача подається на попередній підсилювач 6. Наявність попереднього підсилювача у первинному вимірювальному тракті дозволяє отримати сигнал, достатній для передачі по кабелю на відстань до 100 м [48].

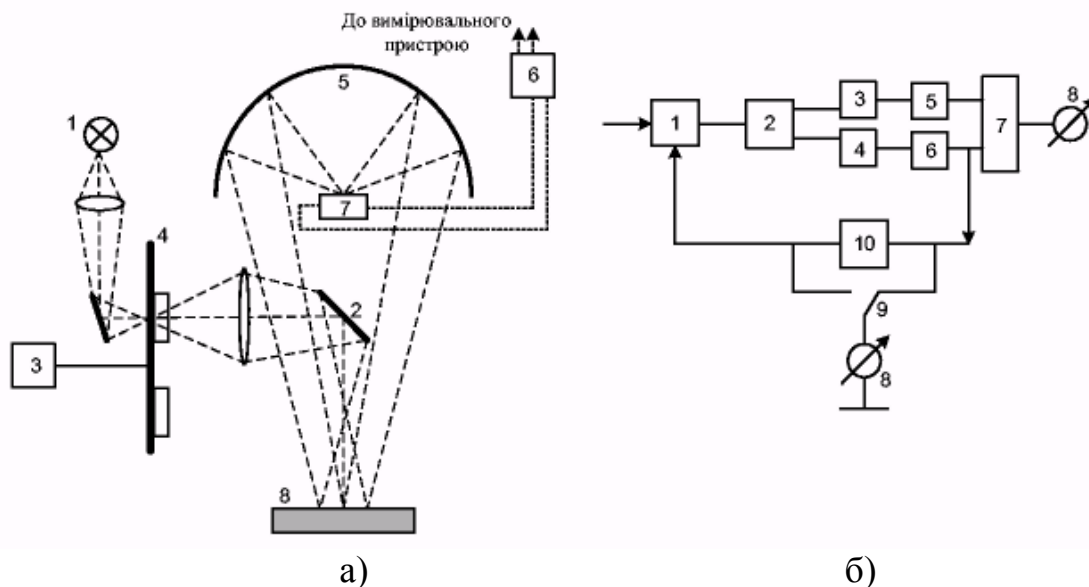


Рисунок 1.5 – Схема вологоміра [48]: а) з первинним вимірювальним трактом, б) з вторинним засобом вимірювання

Вторинний тракт вимірювання складається з підсилювача 7, електронного перемикача 2 для розподілу сигналів від опорного і вимірювального потоків, підсилювачів з регульованим коефіцієнтом пі-

дсилення 3 і 4, випрямлячів 5, 6, кінцевого підсилювача 7, реєструвальних приладів 8, перемикача виду робіт 9 і блока автоматичного регулювання 10. Сигнал від потоків опорного і вимірювального каналів з виходу первинного вимірювального тракту надходить на вхід вимірювального пристрою. Сигнал вимірювального каналу менший. Сигнал підсилювачем 7 доводиться до значення, зручного для обробки, і електронним перемикачем 2 розділяється в часі на опорний та вимірювальний сигнали, які після детектування подаються на диференціальний підсилювач 7. Далі сигнал подається на реєструвальний прилад 8. Перемикач роду робіт 9 дозволяє вести контроль за роботою пристрою. Вихідний струм вимірювального пристрою знаходиться в межах від 0 до 20 мА, вихідна напруга – від 0 до 1 В для навантаження більшого 50 кОм.

Перевагами описаного вологоміра є проста структура та принципи роботи. До недоліків можна віднести низьку точність через залежність опорного потоку випромінювання від вологості, низьку чутливість приладу, зумовлену використанням ввігнутих дзеркал, а отже, втраченою частиною відбитого випромінювання [48].

При дослідженні матеріалів органічного походження (деревина й інші рослинні матеріали, тваринна сировина) контроль вологості необхідний майже на всіх етапах технологічного процесу: при збереженні, прийомі, транспортуванні сировини та готової продукції [37].

Найважливіше практичне значення має визначення вологості неводних рідин – вуглеводнів, рослинних і мінеральних масел, нафти і нафтопродуктів, авіаційних і ракетних палив. Контроль вологості нафти необхідний у процесах її видобутку, зберігання, транспортування і переробки. Інформація про вміст пластової води в сирій нафті потрібна для керування процесами її відкачки. У паливах для реактивних двигунів вміст вологи не повинний перевищувати тисячних часток відсотка, щоб уникнути небезпек, зв'язаних з утворенням льоду в комунікаціях двигуна [37]. Необхідність контролю вологості рідких палив для ракет, що містять сильні окислювачі, викликана небезпекою корозії деталей, що контактують з паливом.

### **1.3 Засоби і пристрої для вимірювання та контролю вологості нафтопродуктів та їх класифікація**

Підвищення якості продукції, більш повне та раціональне використання сировини відносяться до найбільш актуальних завдань, які стоять перед нафтогазовою промисловістю України. Нафта у чистому вигляді як паливо майже не використовуються, тому що економічно більш вигідно отримувати з нафти бензин, керосин, мазут, масла та інші нафтопродукти. При цьому необхідно контролювати цілу низку

параметрів, потрібних для раціонального використання сировини. Так, наприклад, основними параметрами, що характеризують якість масел, є: в'язкість, кислотне число, температура замерзання та загорання, вміст механічних домішок, здатність протидіяти корозії, стабільність до окислення, густина та вміст вологи [82–85]. Саме наявність вологи в маслах викликає зміну фізико-хімічних параметрів масел і тим самим зменшує строк їхньої служби. На сьогодні існує велика кількість різноманітних засобів для вимірювання та контролю вологості нафтопродуктів [19–22, 32–34, 39, 86–97], деякі з них вражають своєю високою собівартістю, інші застарілістю технологій вимірювання. Так, наприклад, в умовах багатьох виробництв вологість в маслах визначають у лабораторіях термогравіметричним та дистиляційним методами, що вимагає значних затрат часу, а отже, робить неможливим автоматизацію технологічного процесу.

Методи визначення вологості бувають прямі та непрямі [48, 98]. В прямих методах відбувається безпосереднє розділення досліджуваного матеріалу на суху речовину та вологу. В непрямих методах відбувається вимірювання величини, що функціонально зв'язана з вологістю [36, 46].

Серед засобів для вимірювання вологості нафтопродуктів, основаних на прямих методах, можна виділити [1]: термогравіметричні, екстракційні, дистиляційні та хімічні. Найбільш поширеними є термогравіметричні, що базуються на висушуванні зразка в повітряному середовищі до повного видалення вологи. В дистиляційних засобах відбувається підігрів певної кількості досліджуваного зразка в посудині з наступною конденсацією парів вологи та підрахунку її кількості. Екстракційні – засновані на використанні реагентів, які взаємодіють з вологою, що міститься в матеріалі. Хімічні – базуються на обробці нафтопродукту реагентом, який вступає в хімічну реакцію лише з водою та забезпечує зневоднення нафтопродукту за рахунок руйнування емульсії, яка утворена водою та нафтопродуктом [98].

Так, в роботі [86] розглянуто спосіб кількісного визначення масової та об'ємної часток води за допомогою дистиляційного методу, але нагрів проби в цьому випадку відбувається не зовнішнім нагрівальним пристроєм, як це описано в роботі [99], а за рахунок енергії поглинання інфрачервоних променів водою на довжині хвилі, рівній 2,76 мкм. При цьому волога, що випарувалась, виноситься за допомогою продувки. Масову або об'ємну частку вологи у нафтопродукті в цьому випадку розраховують за формулами [86]

$$X = \frac{V_0}{m} \cdot 100 \%, \quad (1.9)$$

$$X_1 = \frac{V_0}{V} \cdot 100 \%, \quad (1.10)$$

де  $X$  – масова частка води у відсотках;  $X_1$  – об’ємна частка води у відсотках;  $V_0$  – об’єм води виділений із проби;  $V$  – об’єм проби;  $m$  – маса проби.

На відміну від дистиляційного методу зневоднення нафтопродуктів термохімічний метод [87, 88], окрім процесу нагрівання проби, включає в себе також і процес введення в нафтопродукт деемульгаторів, які забезпечують зневоднення нафтопродукту за рахунок руйнування емульсії, яка утворена водою та нафтопродуктом.

Загальними недоліками засобів для вимірювання вологості, що основані на прямих методах вимірювання, є необхідність відбору та спеціальної підготовки проб матеріалу, періодичність і значна тривалість процесу контролю, тому вони використовуються, головним чином, у лабораторних дослідженнях.

Засоби для вимірювання вологості на основі непрямих методів вимірювання потребують значно менших затрат часу при визначенні вологості проби на відміну від прямих методів вимірювання вологості, тому їм віддають перевагу, оскільки з їх допомогою можна автоматизувати контроль вологості. На основі непрямих методів вимірювання вологості нафтопродуктів побудовані прилади, що описані в роботах [19–24, 32–34, 89–97]. В цьому класі приладів можна виділити такі види, як механічні, оптичні, радіаційні, частотні, діелькометричні і кондуктометричні.

Так, наприклад, механічні прилади для вимірювання вологості засновані на вимірюванні механічних характеристик матеріалів, що змінюються зі зміною його вологості.

Перспективним напрямком на цей час у визначенні вологості нафтопродуктів є оптична вологометрія, основою якої є здатність вологи поглинати інфрачервоне випромінювання певної довжини хвилі [89, 90, 98]. Найчастіше оптичні прилади для вимірювання та контролю вологи створюються за двохвильовою схемою, тобто сигнал, що вимірюється, фіксує різницю інтенсивності випромінювання двох хвиль: еталонної та досліджуваної [31].

Принцип дії оптичних вологомірів базується на виборчому поглинанні вологою інфрачервоного випромінювання певної довжини хвилі, відбитого від поверхні досліджуваної речовини або випромінювання, яке пройшло через досліджуваний зразок (речовину) [100]. Перевагою таких приладів є висока чутливість до вимірювального параме-

тра, низька залежність від температури навколишнього середовища, можливість неперервного контролю та безконтактний спосіб аналізу. Незважаючи на вищеперераховані переваги, оптичні вологоміри мають і низку недоліків, а саме високу собівартість, складність конструкцій, але основний недолік полягає в тому, що вологість вимірюється в поверхневому шарі, коли неоднорідність розподілення вологи по поверхні та в досліджуваній речовині може стати причиною значних помилок вимірювання.

Існує чимало модифікацій засобів вологості, принцип дії яких базується на використанні взаємодії іонізованих випромінювань з об'єктом контролю. В роботах [31, 98] ці прилади описані більш детально. Радіаційні прилади для вимірювання вологості використовують різноманітні види ядерних випромінювань (гама-промені, бета-частки, швидкі нейтрони). Серед радіаційних приладів для вимірювання вологості виділяють: рентгенівські, нейтронні та на основі методу ядерного магнітного резонансу (ЯМР). Рентгенівські вологоміри володіють високою чутливістю через сильне поглинання вологою рентгенівських променів. Принцип дії нейтронних вологомірів ґрунтується на здатності атомів водню уповільнювати рух швидких нейтронів при їх пружному зіткненні. У приладах на основі ЯМР відбувається резонансне поглинання радіочастотної енергії ядрами атомів водню (протонами), що містяться у воді при введенні вологого матеріалу в постійне магнітне поле.

Основними недоліками радіаційних вологомірів є шкідлива дія випромінювання, висока собівартість, а також складність конструкції.

Досить поширеними є кондуктометричні прилади для вимірювання вологості, в яких відбувається зміна питомої провідності (питомого опору) досліджуваного матеріалу при постійному струмі від зміни вологості [32], та дієлькометричні вологоміри нафтопродуктів [101], дія яких ґрунтується на залежності діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат від вологості досліджуваного матеріалу. Оскільки діелектрична проникність нафтопродуктів  $\varepsilon_H = 2,0 \dots 6,0$ , а для води  $\varepsilon_B = 81,0$ , то незначна зміна вологості нафтопродукту призводить до значної зміни результативної діелектричної проникності. Дієлькометричні, або ємнісні, вологоміри в більшості випадків використовуються в якості первинних сенсорів у системах вимірювання і контролю вологості.

Більш детально ємнісні вологоміри нафтопродуктів описані в роботах [19–24, 33, 34, 91, 92, 96, 97]. Так, в роботі [20] ємнісний сенсор вологості нафтопродуктів складається з системи V-подібних та трапецієподібних електродів з гідрофобним покриттям, яка закріплена між двома діелектричними кільцями. Причому пластини трапецієподібної

форми дозволяють створити жорстку конструкцію системи електродів, тому що з'єднані парами таким чином, щоб у місці прилягання пластин кожної пари зазор між пластинами був відсутній. На рис. 1.6 показано переріз ємнісного сенсора вологості нафтопродуктів [20, 70].

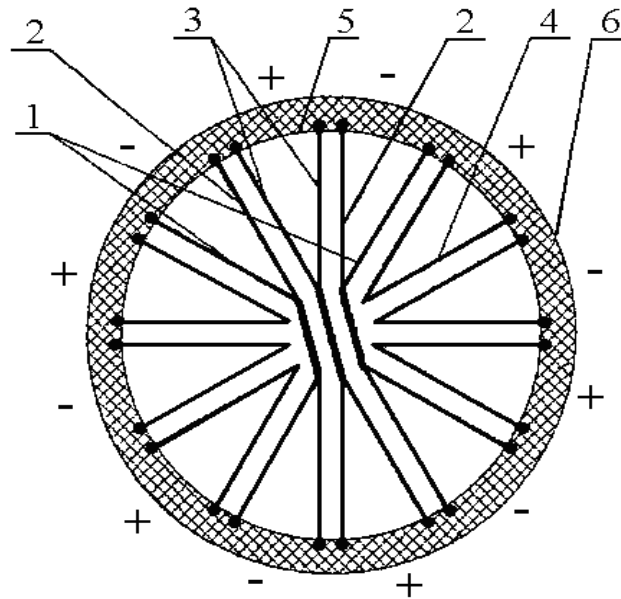


Рисунок 1.6 – Ємнісний сенсор вологості [20]: 1–3 – трапецієподібні електроди; 4 – V-подібні електроди; 5 – внутрішнє діелектричне кільце; 6 – зовнішнє діелектричне кільце

Під час руху потоку рідини через ємнісний сенсор вона заповнює простір між електродами позитивної та негативної полярності. Це викликає зміну діелектричної проникності, що приводить до зміни ємності сенсора вологості [70].

На відміну від ємнісного сенсора вологості, запропонованого в роботі [20], сенсор вологості, що запропонований в роботі [21], має більшу чутливість до вимірювального параметра за рахунок використання більшої площі активної поверхні електродів. Він являє собою систему електродів з гідрофобним покриттям, закріплену всередині двох однакових діелектричних кілець, розміщених на різних кінцях системи електродів. Причому система електродів складається з плоских пластин однакової довжини та різної ширини, де кожна пластина жорстко закріплена на двох діелектричних перемичках. На рис. 1.7 показано переріз ємнісного сенсора вологості нафтопродуктів [21]. Робота цього пристрою реалізується за рахунок зміни діелектричної проникності ємнісного сенсора вологості під час руху потоку нафтопродукту через сенсор.

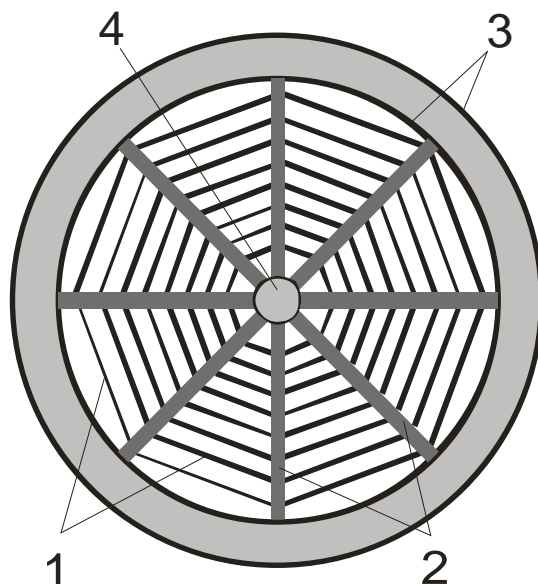


Рисунок 1.7 – Ємнісний сенсор вологості [21]: 1 – система електродів; 2 – перемички; 3 – діелектричні кільця; 4 – вісь малого радіусу

Довжина системи електродів ємнісного сенсора складає 100 мм, відстань між електродами – 5 мм. Зовнішній діаметр діелектричних кілець – 98,5 мм, а внутрішній – 85 мм. Початкова ємність сенсора, заповненого повітрям, складає 220 пФ [21].

Ємнісні вологоміри нафтопродуктів, описані в роботах [19–24, 33, 34, 91, 92, 96, 97], можуть бути використані в якості первинних сенсорів у системах вимірювання і контролю вологості. Широке використання первинних перетворювачів вологості ємнісного типу пояснюється їх простотою у використанні та низькою собівартістю.

На відміну від вищеперерахованих приладів частотні прилади для вимірювання вологості нафтопродуктів поєднують як простоту, так і універсальність, які властиві аналоговим пристроям, а також точність і завадостійкість, характерні для пристроїв з кодовим виходом. Перетворення частотно-модульованого сигналу зводиться, в основному, до підрахунку періодів сигналу протягом певного часу.

Надвисокочастотні (НВЧ) прилади для вимірювання вологості так само, як і оптичні, досліджують відбиту, чи прохідну, хвилю випромінювання. В роботах [39, 93, 95] наведено приклади конструкції НВЧ приладів для вимірювання вологості нафтопродуктів. На рис 1.8 показано схему одного з таких пристроїв для вимірювання вологості [95].

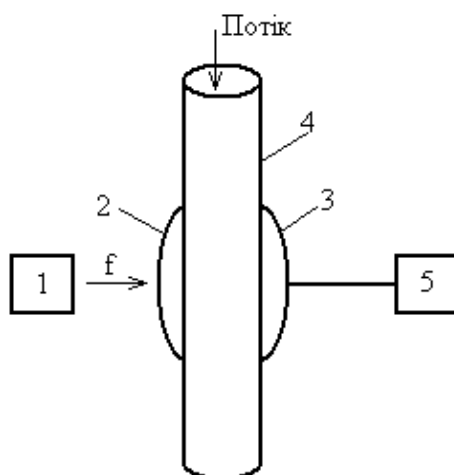


Рисунок 1.8 – Пристрій для вимірювання вологості [95]:  
 1 – НВЧ–генератор віркаторного типу; 2 – передавальна антена;  
 3 – приймальна антена; 4 – трубопровід; 5 – частотомір

Робота цього пристрою для вимірювання вологості здійснюється за рахунок того, що мікрохвильовий сигнал електромагнітних коливань НВЧ–генератора потрапляє на передавальну параболічну антену, за допомогою якої потрапляє в потік контрольованого нафтопродукту, що протікає трубопроводом. Далі, після взаємодії з контрольованим середовищем сигнал проходить через нього і уловлюється приймальною параболічною антеною. Сигнал з приймальної параболічної антени потрапляє на частотомір, за допомогою якого оцінюють величину частоти електромагнітних коливань, яка пройшла через потік контрольованої рідини. За значенням цієї частоти визначають рівень вологості контрольованого нафтопродукту. Вологість потоку нафтопродукту  $W$  описується виразом [39]

$$W = \frac{\lambda^2 f_{\text{ПП}}^2 - C^2 \varepsilon_H}{3C^2 \varepsilon_H},$$

де  $f_{\text{ПП}}$  – частота коливань, що пройшли через потік нафтопродукту;  
 $\lambda$  – довжина хвилі електромагнітних коливань у вільному просторі;  
 $C$  – швидкість хвилі електромагнітного коливання у вільному просторі;  
 $\varepsilon_H$  – діелектрична проникність нафтопродукту.

Високочастотні прилади для вимірювання вологості нафтопродуктів можуть гідно конкурувати з НВЧ–вологомірами. Так, в роботі [94] описано пристрій для визначення та контролю вмісту води у нафті. На рис. 1.9 зображено структурну схему такого пристрою. Робота пристрою базується на тому, що суміш води і нафти протікає по трубі з



діелектричного матеріалу. На трубу накладають дві металічні пластини, що утворюють конденсатор. Оскільки у нафти і води різні діелектричні проникності, то ємність конденсатора залежить від їх співвідношення. Конденсатор є складовою частиною керованого генератора. Керований генератор змінює свою частоту при зміні ємності конденсатора. Опорний генератор налаштований на частоту, яка виникає в керованому генераторі при 100 % вмісті води. Сигнали обох генераторів надходять на змішувач, де утворюється різницева частота, що фільтрується фільтром нижніх частот. Ця частота вимірюється частотоміром, що працює в режимі вимірювання відношення частот. Результат відразу вказує на процентний вміст води в нафті. Цей прилад придатний також для визначення вологості інших сполучень рідин з різними значеннями діелектричних проникностей.

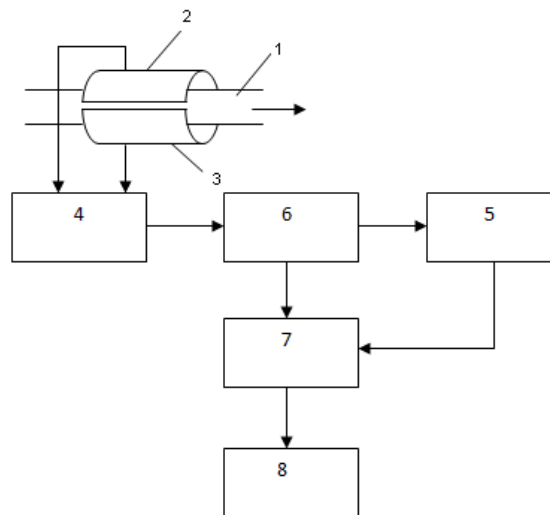


Рисунок 1.9 – Пристрій для визначення води в нафті [94]: 1 – трубопровід; 2, 3 – електроди конденсатора; 4 – керований генератор; 5 – опорний генератор; 6 – змішувач; 7 – фільтр нижніх частот; 8 – частотомір

В частотних приладах для вимірювання вологості забезпечується можливість досягнення значно більших точностей вимірювання, ніж при використанні амплітудних сенсорів, а також цифрових пристроїв [10]. Так, зразкові міри частоти можна виконати зі значно більшою стабільністю, ніж зразкові міри електричної напруги або струму. Перевага використання частотної форми вихідного інформативного сигналу пояснюється його простотою та точністю перетворення в цифровий код, зручністю при комутації в багатоканальних інформаційно-вимірювальних системах, підвищеною заводостійкістю внаслідок слабкої чутливості частотно-модульованого сигналу до наводок та завад [102].

З вищесказаного можна легко зробити висновок, що поєднання переваг перетворювачів вологості ємнісного типу (конденсаторних циліндричних структур) з перевагами частотних засобів контролю вологості є перспективним на сьогоднішній день і дозволяє значно підвищити точність та чутливість вологомірів нафтопродуктів.

Новим напрямком в розробці та створенні вологомірів нафтопродуктів є дослідження в області автогенераторних засобів контролю вологості нафтопродуктів на основі конденсаторних циліндричних структур, з використанням в якості автогенераторів транзисторних структур з від'ємним опором.

Цей напрямок поєднує в собі багатofункціональність і простоту радіoeлектронних пристроїв на основі структур з від'ємним опором [10, 103] та переваги ємнісних первинних сенсорів вологості нафтопродуктів над іншими первинними сенсорами вологості. На рис. 1.10 зображено запропоновану структурну схему приладу для вимірювання та контролю вологості нафти та нафтопродуктів, яка складається з автогенераторного засобу визначення та контролю вологості нафтопродуктів (АВН), блока цифрової обробки інформації та блока виведення інформації. АВН в свою чергу складається з вологочутливої КЦС та частотного генератора на основі від'ємного опору (ЧГВО).

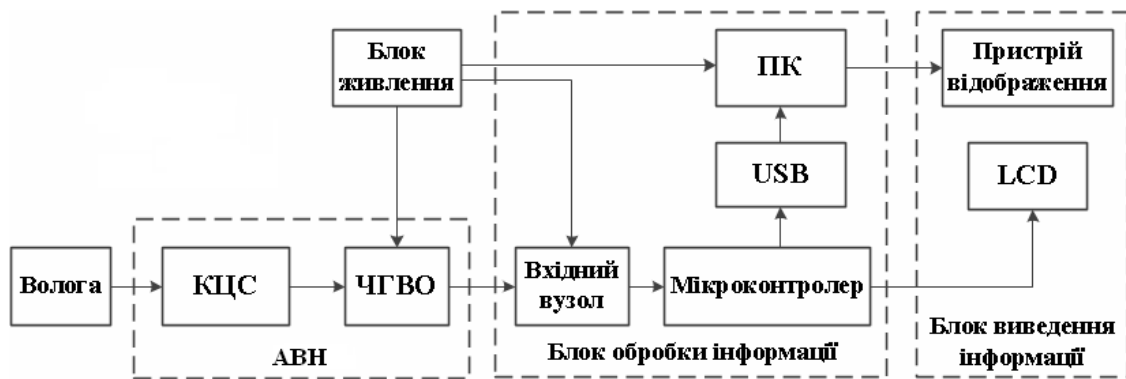


Рисунок 1.10 – Структурна схема приладу для вимірювання та контролю вологості нафти та нафтопродуктів

КЦС використовуються в якості первинного вологочутливого сенсора ємнісного типу для можливості здійснення вимірювання вологості в потоці нафтопродукту, що протікає трубопроводом [56, 57].

В якості вторинного приладу обробки для вологочутливих КЦС можуть використовуватись різноманітні вимірювальні ланцюги. Проте, оскільки величина ємності при вимірюванні малих значень вологості є досить мала – стає очевидним необхідність застосування високочутливих вторинних приладів. Одним з таких приладів, що дозволя-

ють досягнути високої чутливості при збереженні низької собівартості, є ЧГВО.

В якості вторинного приладу обробки можна було б також використовувати класичні аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП), однак останні мають низку недоліків. Так, АЦП ускладнюють конструкцію, суттєво знижують собівартість систем контролю та управління, не завжди задовольняють висунуті вимоги з точності та надійності. Відмова від використання АЦП дозволяє уникнути похибок класичного аналогово-цифрового перетворення (похибок вибірки та квантування).

Таким чином, пропонується прилад (див. рис. 1.10) з таким принципом роботи: зміна вологості вимірювального розчину приводить до зміни сумарної діелектричної проникності вологочутливої КЦС, що впливає на її ємність, яка в свою чергу змінює еквівалентну ємність ЧГВО, що і приводить до зміни частоти вихідних коливань. Таким чином, отримується залежність між вимірюваним параметром – вологістю нафтопродуктів – та вихідною частотою вимірювального приладу. Сигнал з вимірювального приладу «оцифровується» у блоці цифрової обробки інформації. Також в блоці цифрової обробки відповідному значенню частоти присвоюється відповідне значення вологості, що передається на блок виведення інформації. При перевищенні контрольованого значення вологості нафтопродукту на блоці виведення інформації відображається повідомлення про збільшення вмісту вологості. Особливо хочеться підкреслити, що застосування такого приладу дає змогу отримати частотний сигнал, що при необхідності може бути ефективно переданий по безпроводному каналу на відстань, наприклад, з середини технологічного приміщення до операторної.

На основі проведеного аналізу літературних джерел можна зробити висновок, що розробка та створення автогенераторних засобів контролю вологості нафтопродуктів на основі КЦС забезпечить високу стабільність та точність, малі габаритні розміри, масу та енергоспоживання, високу чутливість до вимірювального параметра, технологічну сумісність з мікроелектронними засобами обробки інформації та низьку собівартість.

На рис. 1.11 [102] зображено уточнену класифікацію приладів для вимірювання вологості нафтопродуктів. З цієї класифікації видно, що одне із провідних місць займають автогенераторні вимірювальні прилади вологості нафтопродуктів на основі КЦС, але поведінка таких структур в широкому діапазоні частот від зміни режимів живлення, впливу вологості, температури та інших факторів навколишнього середовища недостатньо досліджені, тому вони потребують подальшого теоретичного та експериментального дослідження.

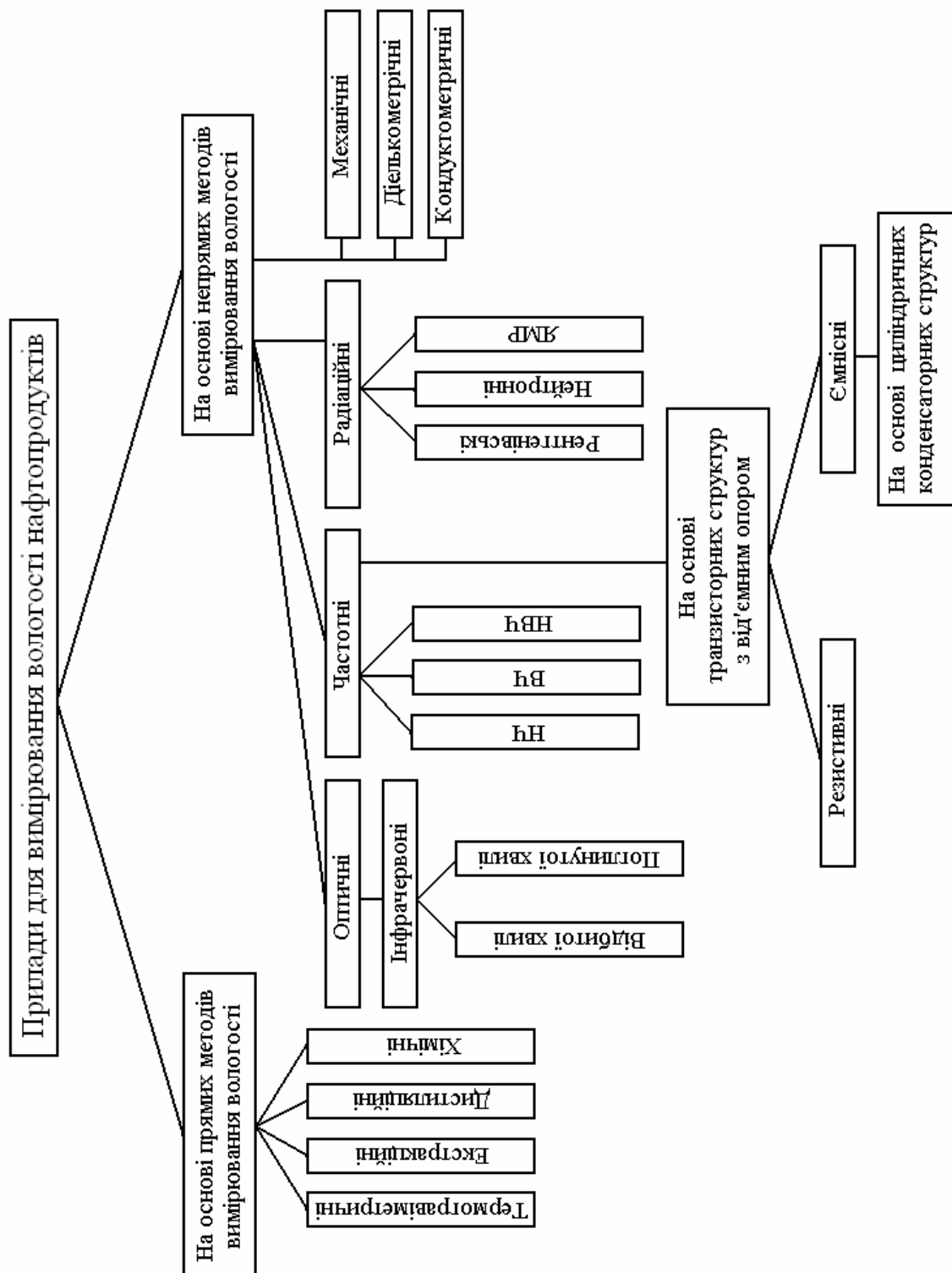


Рисунок 1.11 – Класифікація приладів для вимірювання вологості нафтопродуктів [102]

## **2 ПЕРВИННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ВОЛОГОСТІ НАФТОПРОДУКТІВ НА ОСНОВІ КОНДЕНСАТОРНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ СТРУКТУР**

Швидкий розвиток науково-технічного прогресу та безперервне удосконалення технології потребує швидкого розвитку контрольно-вимірювальних систем, основою яких є сенсори для вимірювання параметрів навколишнього середовища [104], одне з провідних місць серед яких займають автогенераторні засоби контролю вологості нафтопродуктів на основі конденсаторних циліндричних структур. Необхідність вимірювання та контролю вологості нафти та нафтопродуктів зробила актуальною проблему розробки і дослідження цього різновиду приладів. Досить актуальним в розробці автогенераторних засобів контролю вологості нафтопродуктів є створення первинних перетворювачів (вологочутливих ємнісних сенсорів), що являють собою конденсаторні циліндричні структури, та розробка їх математичних моделей, які надають можливість підвищити точність вимірювання, забезпечити великий строк служби та високу чутливість до вимірювального параметра. Широке використання первинних перетворювачів вологості ємнісного типу пояснюється їх простотою у використанні та низькою собівартістю.

З метою вивчення властивостей первинних перетворювачів вологості нафтопродуктів насамперед необхідно розробити математичні моделі, за допомогою яких можна отримати аналітичні залежності електричної вологочутливої ємності від впливу вологості нафтопродуктів та виконати експериментальні дослідження, які б підтвердили справедливність теоретичних положень. Саме ці питання і будуть розглянуті у розділі.

### **2.1 Модель вологочутливої конденсаторної циліндричної структури з сіткоподібними електродами**

На сьогодні час вимірювання вологості є одним із найпоширеніших напрямків вимірювань. Це обумовлено потужним промисловим та науково-технічним потенціалом країни з переважним розвитком таких галузей, як металургія, енергетика, машинобудування, авіаційна та космічна техніка, хімічна та нафтогазова промисловість, ефективність яких значною мірою залежить від точності вимірювань вологості. Тому створення такого класу приладів є актуальною технічною задачею. Суттєве значення має вимірювання та контроль вологості нафти, масел та нафтопродуктів. Контроль вологості нафти необхідний у

процесах її видобування, зберігання, транспортування та переробки [37]. Саме наявність вологи в нафтопродуктах викликає зміну їх фізико-хімічних параметрів і тим самим зменшує строк їхньої служби.

На рис. 2.1 показано запропоновану конструкцію вологочутливої КЦС, яка складається з сіткоподібних електродів, які розміщені один навпроти одного таким чином, що розташування отворів у першому електроді збігається з отворами в другому електроді [97]. Електроди 1 та 2 міцно закріплені до діелектричної труби 3, причому вони вкриті шаром полімеру 4 і містять отвори 5 для руху потоку рідини, що має діелектричні властивості. Зовнішній діаметр діелектричної труби дорівнює 50 мм, а відстань між електродами складає 1,5 мм [105].

Вологочутлива КЦС працює таким чином. Під час руху потоку рідини через діелектричну трубу, в якій знаходиться вологочутлива КЦС із сіткоподібними електродами, рідина через отвори 5 заповнює простір між електродами 1 і 2, які вкриті шаром полімеру 4 і жорстко закріплені в діелектричній трубці 3. Це викликає зміну діелектричної проникності вологочутливої КЦС. В залежності від зміни вологості вимірювальної рідини змінюється її діелектрична проникність, отже, змінюється і ємність вологочутливої КЦС [105].

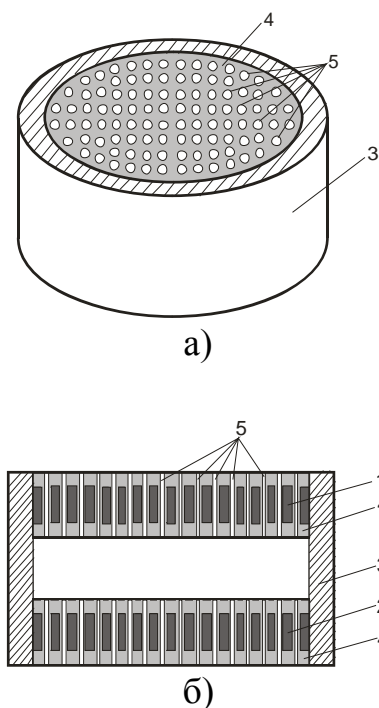


Рисунок 2.1 – Вологочутлива КЦС із сіткоподібними електродами для вимірювання вологості нафтопродуктів [97]: а) загальний вигляд, б) поперечний переріз: 1, 2 – електроди; 3 – діелектрична труба; 4 – шар полімеру; 5 – отвори

Якщо матеріал складається із суміші компонентів з різною діелектричною проникністю, то загальну поляризацію матеріалу можна знайти як суму поляризацій компонентів [106]. У нашому випадку для знаходження загальної діелектричної проникності  $\varepsilon_{заг}$  потрібно врахувати діелектричну проникність гетерогенної суміші води та нафтопродукту  $\varepsilon_c$ , у якій частинки розміщені хаотично та діелектричну проникність полімеру  $\varepsilon_n$ .

Для цього визначимо спочатку діелектричну проникність гетерогенної суміші води та нафтопродукту  $\varepsilon_c$ . Молекули води виступають як дисперсна фаза, а дисперсним середовищем, відповідно, є нафтопродукт. Для проведення оцінки діелектричної проникності гетерогенної суміші води та нафтопродукту  $\varepsilon_c$  запропоновано емпіричне рівняння Бруггемана [37]:

$$\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} = (1 - \alpha) \cdot \sqrt[3]{\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_2}}, \quad (2.1)$$

де  $\varepsilon_1$  – діелектрична проникність води;  $\varepsilon_2$  – діелектрична проникність нафтопродукту;  $\alpha$  – об’ємна концентрація води;  $\varepsilon_c$  – діелектричну проникність гетерогенної суміші води та нафтопродукту.

Вода належить до речовин, які здатні поляризуватись, тому для визначення значення діелектричної проникності води скористаємось комплексною діелектричною проникністю води [107]:

$$\varepsilon_1^* = \varepsilon_1' - j(\varepsilon_1' \cdot \operatorname{tg} \delta_1), \quad (2.2)$$

де  $\varepsilon_1^*$  – комплексна діелектрична проникність води;  $\varepsilon_1'$  – дійсна складова комплексної діелектричної проникності води;  $\operatorname{tg} \delta_1$  – тангенс кута діелектричних втрат води.

Дійсна складова комплексної діелектричної проникності води  $\varepsilon_1'$  та тангенс кута діелектричних втрат  $\operatorname{tg} \delta_1$ , в свою чергу, розраховуються з рівнянь [107]

$$\varepsilon_1' = \varepsilon_{O1} + \frac{\varepsilon_{C1} - \varepsilon_{O1}}{1 + (\omega\tau_1)^2}; \quad (2.3)$$

$$\operatorname{tg} \delta_1 = \frac{(\varepsilon_{C1} - \varepsilon_{O1}) \cdot \omega\tau_1}{\varepsilon_{C1} + \varepsilon_{O1} \cdot (\omega\tau_1)^2}, \quad (2.4)$$

де  $\varepsilon_{O1}$  – оптична діелектрична проникність води;  $\varepsilon_{C1}$  – статична діелектрична проникність води;  $\omega$  – частота електричного поля, Гц;  $\tau_1$  – час релаксації молекул води, с.

Релаксаційні втрати води визначаються з рівняння [107]

$$\tau_1 = \frac{4\pi\eta_1 a_1^3}{kT}, \quad (2.5)$$

де  $\eta_1$  – коефіцієнт динамічної в'язкості води, Па·с;  $a_1$  – радіус молекули води, м;  $k$  – стала Больцмана, Дж/К;  $T$  – температура, К.

Коефіцієнт динамічної в'язкості води визначається як добуток коефіцієнта кінематичної в'язкості на густину води [107]:

$$\eta_1 = \nu_1 \cdot \rho_{H_2O}, \quad (2.6)$$

де  $\nu_1$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості води, м<sup>2</sup>/с;  $\rho_{H_2O}$  – густина води, кг/м<sup>3</sup>.

Коефіцієнт кінематичної в'язкості води та густина води, в свою чергу визначаються з емпіричних рівнянь [108]

$$\nu_1 = \frac{\nu_{01}}{1 + 0,0337 \cdot (T - T_0) + 0,000221 \cdot (T - T_0)^2}; \quad (2.7)$$

$$\rho_{H_2O} = \frac{995,7}{0,984 + 0,483 \cdot 10^{-3} (T - T_0)}, \quad (2.8)$$

де  $\nu_{01}$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості води при температурі  $T_0$ , м<sup>2</sup>/с;  $T_0$  – температура, рівна 273 К.

Знайдемо модуль комплексної діелектричної проникності води:

$$\varepsilon_1 = \sqrt{(\varepsilon_1')^2 + (\varepsilon_1' \cdot tg \delta_1)^2}. \quad (2.9)$$

Для визначення значення діелектричної проникності нафтопродукту скористаємось комплексною діелектричною проникністю нафтопродукту [107]:

$$\varepsilon_2^* = \varepsilon_2' - j(\varepsilon_2' \cdot tg \delta_2), \quad (2.10)$$



де  $\varepsilon_2^*$  – комплексна діелектрична проникність нафтопродукту;  $\varepsilon_2'$  – дійсна складова комплексної діелектричної проникності нафтопродукту;  $tg\delta_2$  – тангенс кута діелектричних втрат нафтопродукту.

Дійсна складова комплексної діелектричної проникності нафтопродукту  $\varepsilon_2'$  та тангенс кута діелектричних втрат  $tg\delta_2$ , в свою чергу розраховуються з рівнянь [107]

$$\varepsilon_2' = \varepsilon_{O2} + \frac{\varepsilon_{C2} - \varepsilon_{O2}}{1 + (\omega\tau_2)^2}; \quad (2.11)$$

$$tg\delta_2 = \frac{(\varepsilon_{C2} - \varepsilon_{O2}) \cdot \omega\tau_2}{\varepsilon_{C2} + \varepsilon_{O2} \cdot (\omega\tau_2)^2}, \quad (2.12)$$

де  $\varepsilon_{O2}$  – оптична діелектрична проникність нафтопродукту;  $\varepsilon_{C2}$  – статична діелектрична проникність нафтопродукту;  $\tau_2$  – час релаксації нафтопродукту, с.

Релаксаційні втрати нафтопродукту визначаються з рівняння [107]

$$\tau_2 = \frac{4\pi\eta_2 a_2^3}{kT}, \quad (2.13)$$

де  $\eta_2$  – коефіцієнт динамічної в'язкості нафтопродукту, Па·с;  $a_2$  – радіус молекули нафтопродукту, м.

Коефіцієнт динамічної в'язкості нафтопродукту визначається як добуток коефіцієнта кінематичної в'язкості на густину нафтопродукту [107]

$$\eta_2 = \nu_2 \cdot \rho, \quad (2.14)$$

де  $\nu_2$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості нафтопродукту, м<sup>2</sup>/с;  $\rho$  – густина нафтопродукту, кг/м<sup>3</sup>.

Коефіцієнт кінематичної в'язкості нафтопродукту та густина нафтопродукту, в свою чергу, визначаються з емпіричних рівнянь [105]

$$\nu_2 = \frac{\nu_{02}}{\left(1 + 0,0337 \cdot (T - T_0) + 0,000221 \cdot (T - T_0)^2\right) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^2}; \quad (2.15)$$

$$\rho = \frac{874,2}{0,984 + 0,483 \cdot 10^{-3} (T - T_0)}, \quad (2.16)$$

де  $\nu_{02}$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості нафтопродукту при температурі  $T_0$ , м<sup>2</sup>/с.

Знайдемо модуль комплексної діелектричної проникності нафтопродукту:

$$\varepsilon_2 = \sqrt{\left(\varepsilon_2'\right)^2 + \left(\varepsilon_2' \cdot \operatorname{tg} \delta_2\right)^2}. \quad (2.17)$$

Для визначення об'ємної концентрації води  $\alpha$  скористаємось виразом

$$\alpha = \frac{V_{H_2O}}{V_{\text{суміші}}}; \quad (2.18)$$

$$V_{\text{суміші}} = V_{H_2O} + V, \quad (2.19)$$

де  $V_{H_2O}$ ,  $V$ ,  $V_{\text{суміші}}$  – об'єми води, нафтопродукту та суміші, відповідно, м<sup>3</sup>.

Визначимо об'єм води  $V_{H_2O}$ :

$$V_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}, \quad (2.20)$$

де  $m_{H_2O}$  – маса води, кг.

Підставивши вирази (2.19) і (2.20) у (2.18), отримаємо:

$$\alpha = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O} \cdot \left( \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} + V \right)}. \quad (2.21)$$

Запишемо вираз для масової вологості  $W$  [37]:

$$W = \frac{m_{H_2O}}{m_{\text{суміші}}} \cdot 100 \% = \frac{m_{H_2O}}{m + m_{H_2O}} \cdot 100 \% ; \quad (2.22)$$

$$m_{H_2O} = \frac{W \cdot m}{100\% - W}, \quad (2.23)$$

де  $m$ ,  $m_{\text{суміші}}$  – маси нафтопродукту та суміші, відповідно, кг.

Підставивши значення  $m_{H_2O}$  з виразу (2.23) в (2.21), отримаємо [105]

$$\alpha = \frac{W \cdot \rho}{(100\% - W) \cdot \rho_{H_2O} + W \cdot \rho}. \quad (2.24)$$

З врахуванням усіх вищенаведених розрахунків підставимо вираз (2.9), (2.17) та вираз (2.24) у рівняння (2.1). Виразивши з рівняння (2.1)  $\varepsilon_c$ , отримаємо вираз для визначення діелектричної проникності гетерогенної суміші води та нафтопродукту.

Загальна діелектрична проникності вологочутливої КЦС  $\varepsilon_{\text{заг}}$  визначається з емпіричного рівняння Ліхтенекера [107] як діелектрична проникність двошарової структури, у якій першим шаром виступає полімер, а другим гетерогенна суміш води та нафтопродукту:

$$\varepsilon_{\text{заг}} = \frac{\varepsilon_n \varepsilon_c}{\beta_1 \varepsilon_c + \beta_2 \varepsilon_n}, \quad (2.25)$$

де  $\beta_1$  – об'ємна концентрація шару полімеру між електродами;  $\beta_2$  – об'ємна концентрація гетерогенної суміші води та нафтопродукту.

Знайдемо об'ємні концентрації  $\beta_1$  та  $\beta_2$ :

$$\beta_1 = \frac{2Sh}{2Sh + \pi R^2 (d - 2h)}; \quad (2.26)$$

$$\beta_2 = 1 - \beta_1, \quad (2.27)$$

де  $S$  – активна площа електроду, м<sup>2</sup>;  $h$  – товщина шару полімеру, м;  $R$  – радіус електрода, м;  $d$  – відстань між електродами, м.

Для розрахунку ємності вологочутливої КЦС з сіткоподібними електродами скористаємось виразом

$$C_w(W, T) = \frac{\varepsilon_{\text{заг}} \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}. \quad (2.28)$$

З врахуванням активної площі електродів  $S$ , а також усіх вищенаведених виразів рівність (2.28) матиме вигляд [105]

$$C_w(W, T) = \frac{\varepsilon_n \varepsilon_c \varepsilon_0 (\pi R^2 - p \pi R_0^2)}{d (\beta_1 \varepsilon_c + \beta_2 \varepsilon_n)}, \quad (2.29)$$

де  $\varepsilon_0$  – діелектрична проникність вакууму, Ф/м;  $R_0$  – радіус отвору, м;  $p$  – кількість отворів у електроді.

Згідно з виразом (2.29) була розрахована залежність ємності вологочутливої КЦС з сіткоподібними електродами від вологості нафтопродуктів. За допомогою пакету математичного моделювання *Maple* було написано програму для розрахунку ємності вологочутливої КЦС з сіткоподібними електродами. На рис. 2.2 показано результати математичного моделювання у *Maple*, а саме теоретичну залежність ємності вологочутливої КЦС з сіткоподібними електродами від вологості нафтопродуктів у діапазоні від 0 % до 30 % масової вологості.

Для перевірки адекватності розробленої математичної моделі на рис. 2.3–рис. 2.7 зображено теоретичні та експериментальні залежності ємності вологочутливої КЦС з сіткоподібними електродами від вологості нафтопродуктів.

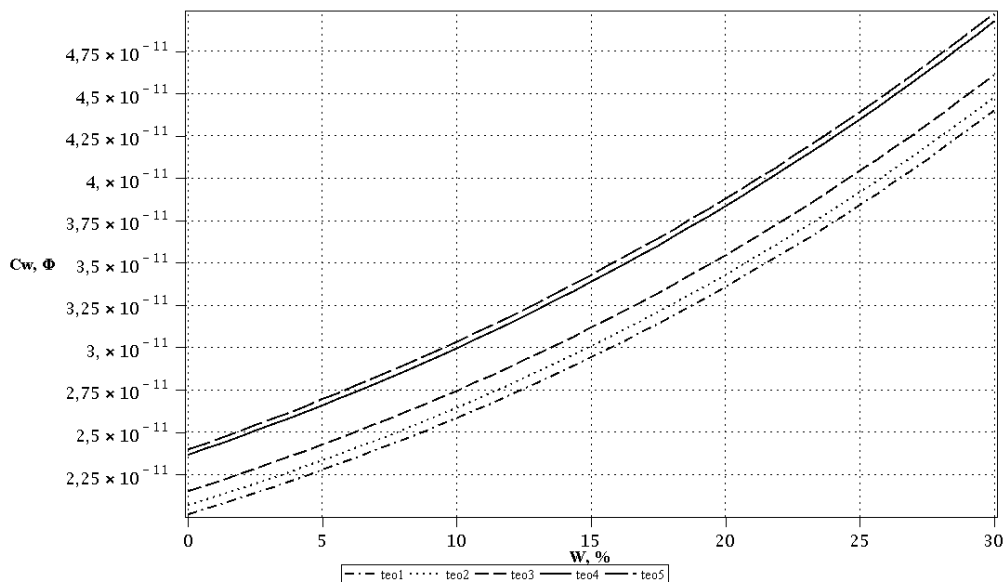


Рисунок 2.2 – Теоретична залежність ємності вологочутливої КЦС з сіткоподібними електродами від вологості нафтопродуктів:  
 1 – напівсинтетичне моторне масло 5W40; 2 – мінеральне моторне масло M8V; 3 – трансформаторне масло T-1500; 4 – нафта з туркменського родовища; 5 – нафта з Сургутського родовища

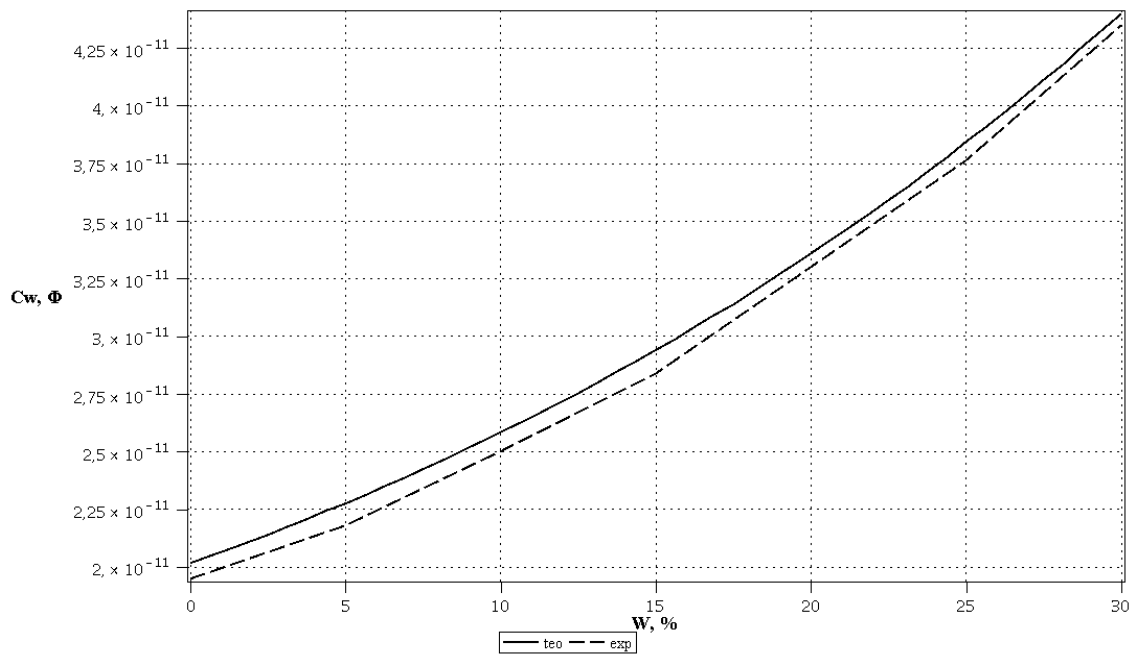


Рисунок 2.3 – Теоретична та експериментальна залежності ємності вологочутливої КЦС з сіткоподібними електродами від вологості напівсинтетичного моторного масла 5W40

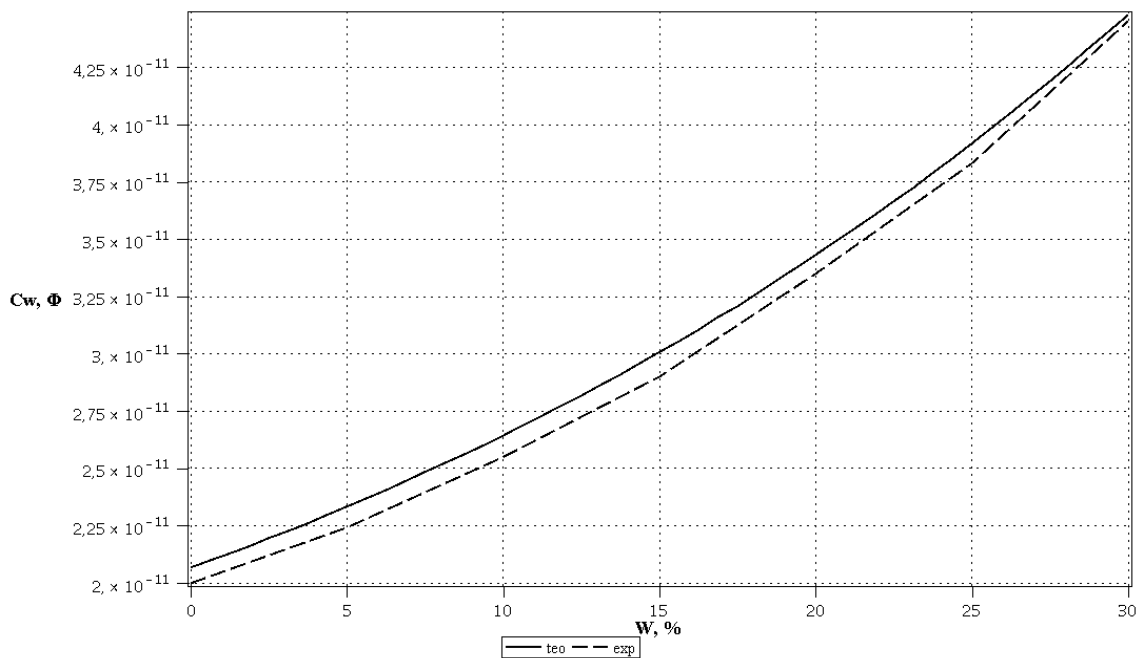


Рисунок 2.4 – Теоретична та експериментальна залежності ємності вологочутливої КЦС з сіткоподібними електродами від вологості мінерального моторного масла M8V

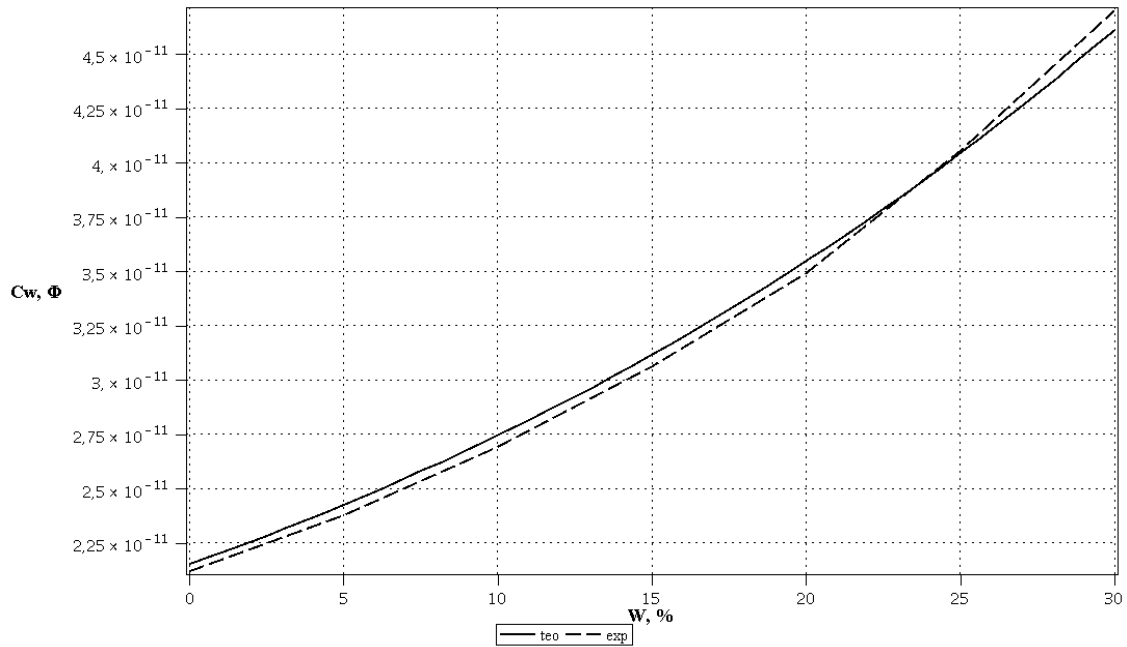


Рисунок 2.5 – Теоретична та експериментальна залежності ємності вологочутливої КЦС з сіткоподібними електродами від вологості трансформаторного масла Т-1500

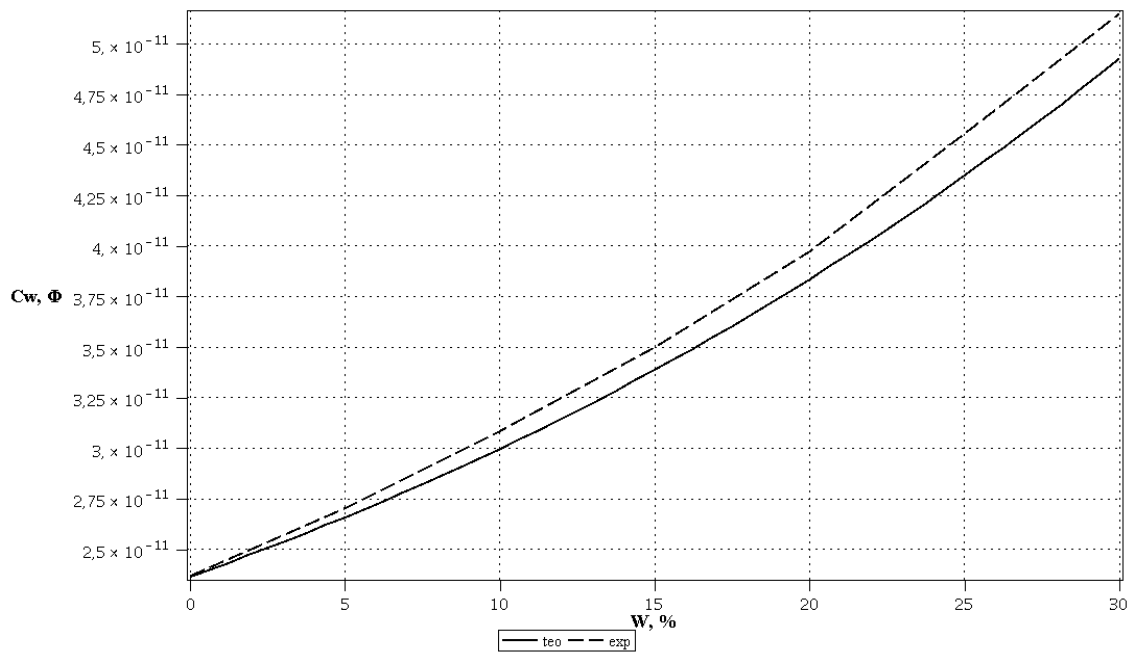


Рисунок 2.6 – Теоретична та експериментальна залежності ємності вологочутливої КЦС з сіткоподібними електродами від вологості нафти з туркменського родовища

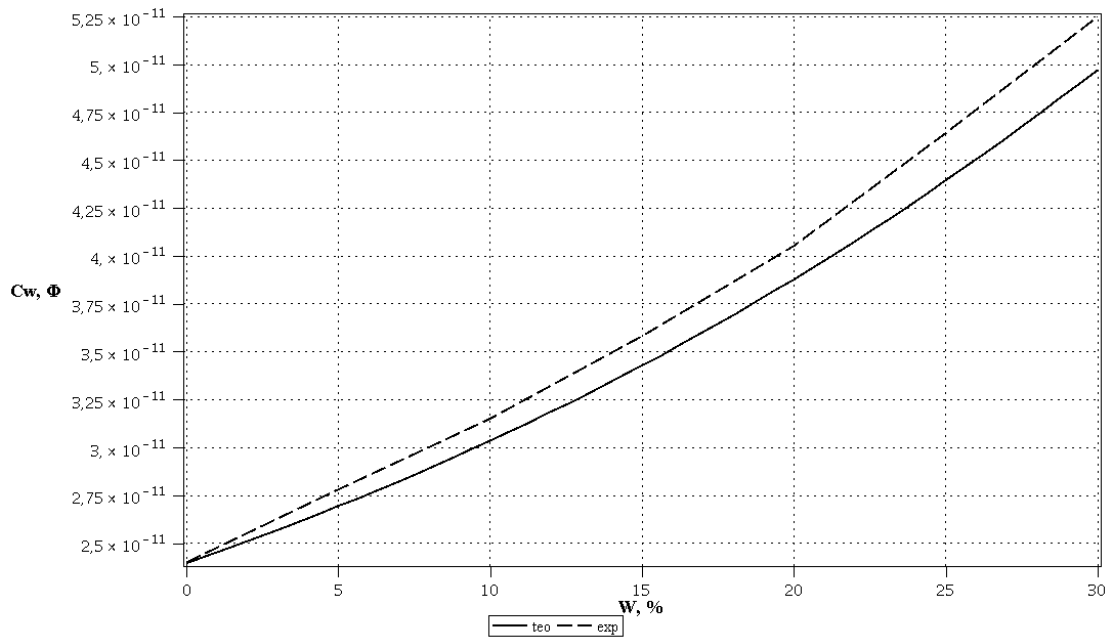


Рисунок 2.7 – Теоретична та експериментальна залежності ємності вологочутливої КЦС з сіткоподібними електродами від вологості нафти з Сургутського родовища

Як видно із рис. 2.3–рис. 2.7, теоретичні та експериментальні залежності мають добрий збіг. Так, наприклад, при зміні масової вологості трансформаторного масла Т-1500 від 0 до 30 % ємність збільшується від 21,5 до 47 пФ. Чутливість вологочутливої КЦС із сіткоподібними електродами для вимірювання зміни величини вологості нафтопродуктів в діапазоні від 0 до 30 % складає від 0,5 до 1,2 пФ/%. Адекватність математичної моделі можна оцінити за допомогою відносної похибки, яка складає 5 %.

## 2.2 Модель вологочутливої конденсаторної циліндричної структури з циліндричними електродами

Розглянемо вологочутливу конденсаторну циліндричну структуру для вимірювання вологості нафтопродуктів, що зображена на рис. 2.8. Вона являє собою систему електродів, які виконані у вигляді циліндричних пластин різного діаметру та закріплені у діелектричній трубі [96]. Система електродів 1 міцно з'єднана хрестоподібними діелектричними фіксаторами електродів 2 і 3, які прикріплено до діелектричної труби 4. Довжина системи електродів вологочутливої КЦС складає 40 мм. Зовнішній діаметр діелектричної труби має 50 мм [104].

Вологочутлива КЦС з циліндричними електродами працює таким чином. Під час руху потоку рідини через діелектричну трубу, в якій

знаходиться вологочутлива КЦС з циліндричними електродами, рідина заповнює простір між електродами позитивної та негативної полярності, які жорстко закріплені хрестоподібними діелектричними фіксаторами електродів. Це викликає зміну діелектричної проникності, що приводить до зміни ємності вологочутливої КЦС з циліндричними електродами.

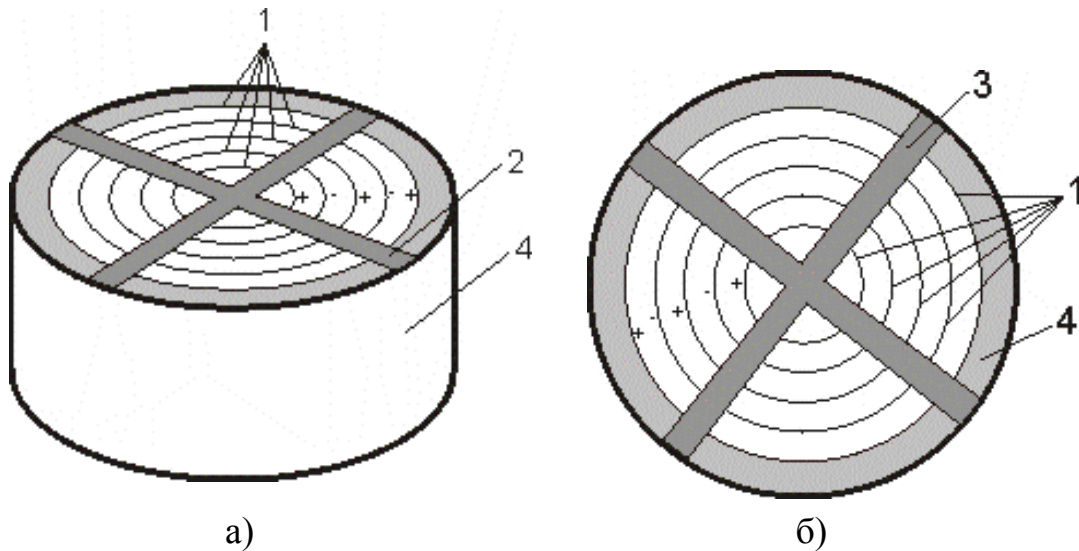


Рисунок 2.8 – Вологочутлива КЦС з циліндричними електродами для вимірювання вологості нафтопродуктів [96]: а) загальний вигляд, б) вид знизу: 1 – система електродів; 2, 3 – хрестоподібні діелектричні фіксатори електродів; 4 – діелектрична труба

Для проведення оцінки діелектричної проникності двокомпонентної суміші нафтопродукту та води  $\varepsilon_s$  запропоновано емпіричне рівняння Оделевського [107]:

$$\varepsilon_s = \frac{(3\alpha - 1)\varepsilon_1 + (3\chi - 1)\varepsilon_2}{4} + \sqrt{\left(\frac{(3\alpha - 1)\varepsilon_1 + (3\chi - 1)\varepsilon_2}{4}\right)^2 + \frac{\varepsilon_1\varepsilon_2}{2}}, \quad (2.30)$$

де  $\varepsilon_1$  – діелектрична проникність води;  $\varepsilon_2$  – діелектрична проникність нафтопродукту;  $\varepsilon_s$  – діелектрична проникність суміші;  $\alpha$  – об’ємна концентрація води;  $\chi$  – об’ємна концентрація нафтопродукту.

Об’ємна концентрація нафтопродукту визначається як

$$\chi = 1 - \alpha. \quad (2.31)$$



Підставивши у рівняння (2.30) вирази для об'ємних концентрацій води (2.24) та нафтопродукту (2.31), отримаємо рівняння для визначення діелектричної проникності гетерогенної суміші води та нафтопродукту для вологочутливої КЦС з циліндричними електродами [104]:

$$\varepsilon_s = \frac{(3\alpha - 1)\varepsilon_1 + (2 - 3\alpha)\varepsilon_2}{4} + \sqrt{\left(\frac{(3\alpha - 1)\varepsilon_1 + (2 - 3\alpha)\varepsilon_2}{4}\right)^2 + \frac{\varepsilon_1\varepsilon_2}{2}}. \quad (2.32)$$

Для розрахунку значень діелектричних проникностей води  $\varepsilon_1$  та нафтопродукту  $\varepsilon_2$  скористаємось виразами (2.9) та (2.17) з врахуванням вищенаведених розрахунків.

Для розрахунку ємності вологочутливої КЦС з циліндричними електродами скористаємось формулою [104]

$$C_w(W, T) = \varepsilon_s \cdot \varepsilon_0 \cdot 2\pi \cdot l \cdot z; \quad (2.33)$$

$$z = \frac{1}{\ln\left(\frac{R_4}{R_3 + d}\right)} + \frac{1}{\ln\left(\frac{R_3}{R_2 + d}\right)} + \frac{1}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1 + d}\right)} + \frac{1}{\ln\left(\frac{R_1}{R_0 + d}\right)},$$

де  $\varepsilon_0$  – діелектрична проникність вакууму, Ф/м;  $l$  – довжина системи електродів, м;  $d$  – товщина електроду, м;  $R_0, R_1, R_2, R_3, R_4$  – відповідно, радіуси електродів від найменшого до найбільшого, м.

З врахуванням виразу (2.32) рівняння (2.33) набуває вигляду [104]

$$C_w(W, T) = \frac{(3\alpha - 1) \cdot \varepsilon_1 + (2 - 3\alpha) \cdot \varepsilon_2}{4} \cdot \varepsilon_0 \cdot 2\pi \cdot l \cdot z + \sqrt{\left(\frac{(3\alpha - 1) \cdot \varepsilon_1 + (2 - 3\alpha) \cdot \varepsilon_2}{4}\right)^2 + \frac{\varepsilon_1\varepsilon_2}{2}} \cdot \varepsilon_0 \cdot 2\pi \cdot l \cdot z. \quad (2.34)$$

Згідно з виразом (2.34) була розрахована залежність ємності вологочутливої КЦС з циліндричними електродами від вологості нафтопродуктів. За допомогою пакету математичного моделювання *Maple* було написано програму для розрахунку ємності вологочутливої КЦС з циліндричними електродами. На рис. 2.9 показано результати математичного моделювання у *Maple*, а саме теоретичну залежність ємно-

сті вологочутливої КЦС з циліндричними електродами від вологості нафтопродуктів у діапазоні від 0 до 20 % масової вологості.

Для перевірки адекватності розробленої математичної моделі на рис. 2.10–рис. 2.14 зображено теоретичні та експериментальні залежності ємності вологочутливої КЦС з циліндричними електродами від вологості нафтопродуктів.

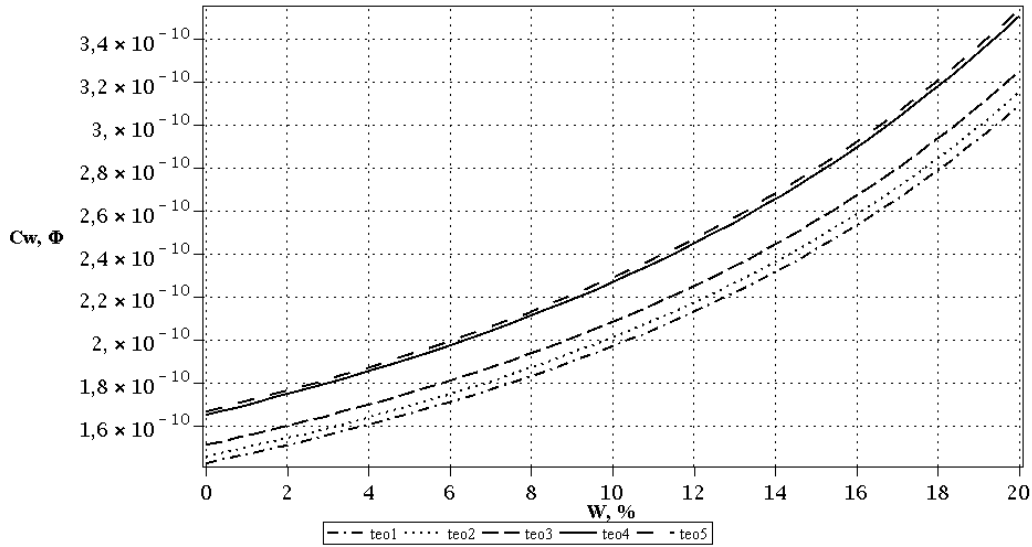


Рисунок 2.9 – Теоретична залежність ємності вологочутливої КЦС з циліндричними електродами від вологості нафтопродуктів: 1 – напівсинтетичне моторне масло 5W40; 2 – мінеральне моторне масло М8В; 3 – трансформаторне масло Т-1500; 4 – нафта з туркменського родовища; 5 – нафта з Сургутського родовища

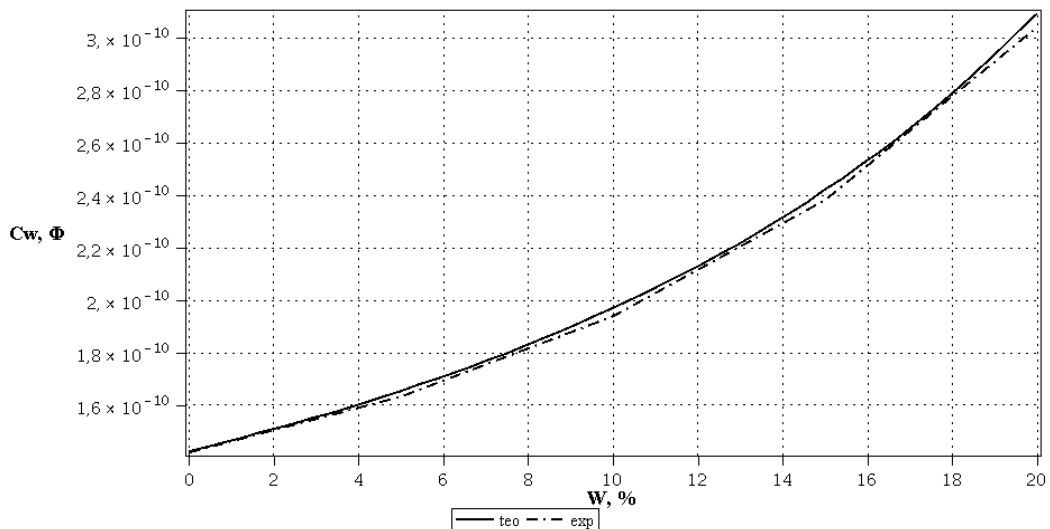


Рисунок 2.10 – Теоретична та експериментальна залежності ємності вологочутливої КЦС з циліндричними електродами від вологості напівсинтетичного моторного масла 5W40

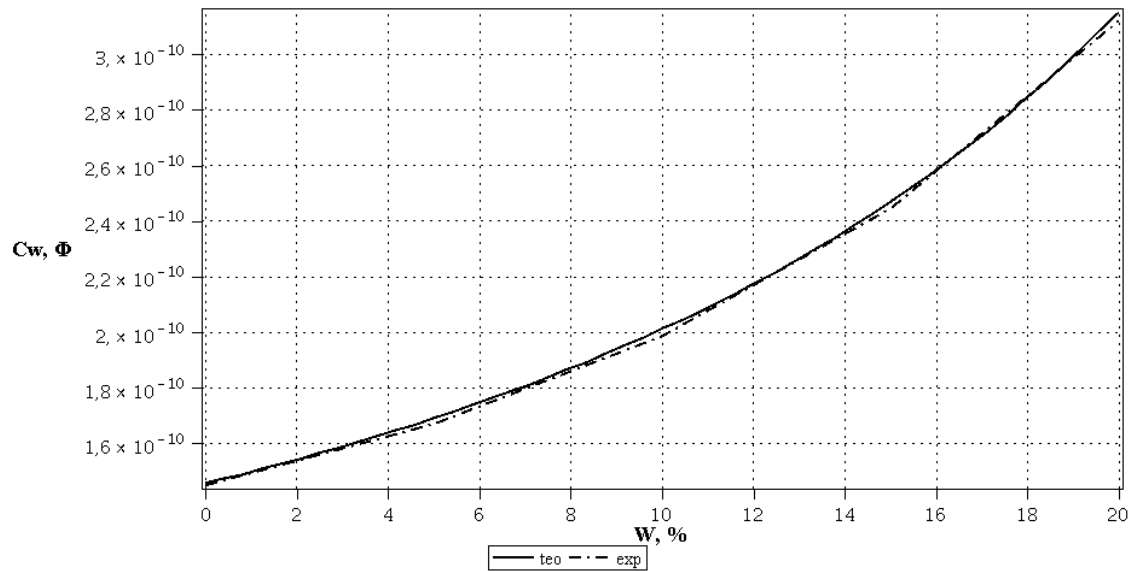


Рисунок 2.11 – Теоретична та експериментальна залежності ємності вологочутливої КЦС з циліндричними електродами від вологості мінерального моторного масла М8В

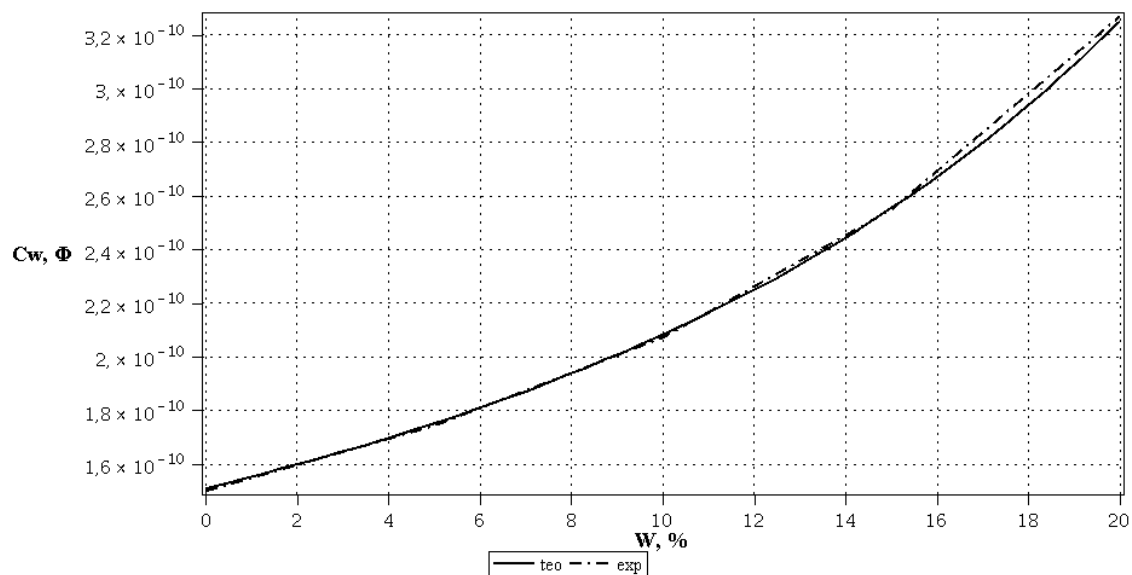


Рисунок 2.12 – Теоретична та експериментальна залежності ємності вологочутливої КЦС з циліндричними електродами від вологості трансформаторного масла Т-1500

Як видно із рис. 2.10–рис. 2.14, теоретичні та експериментальні залежності мають добрий збіг. Так, наприклад, при зміні масової вологості нафти з Сургутського родовища від 0 до 20 % ємність збільшується від 167 до 365 пФ. Чутливість вологочутливої КЦС із циліндричними електродами для вимірювання зміни величини вологості наф-

топродуктів в діапазоні від 0 до 20 % складає від 5,7 до 13,5 пФ/%. Адекватність математичної моделі можна оцінити за допомогою відносної похибки, яка складає 5 %.

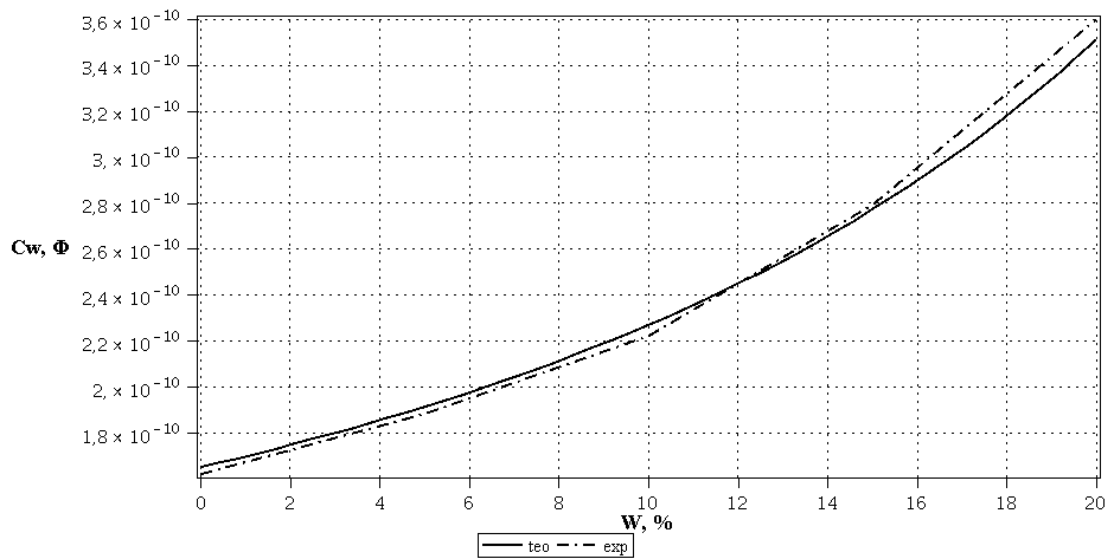


Рисунок. 2.13 – Теоретична та експериментальна залежності ємності вологочутливої КЦС з циліндричними електродами від вологості нафти з туркменського родовища

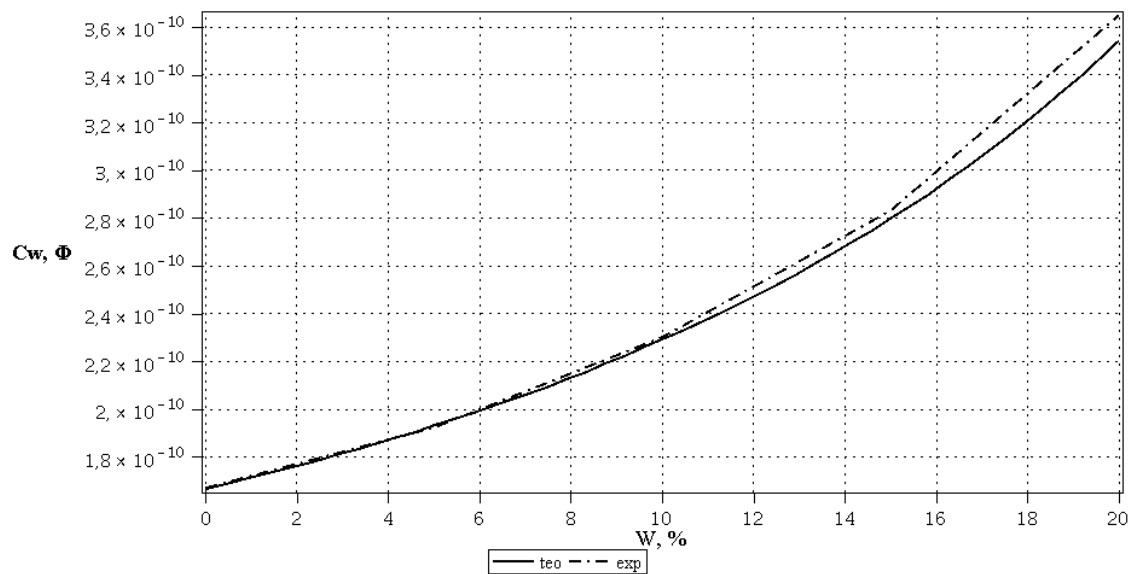


Рисунок 2.14 – Теоретична та експериментальна залежності ємності вологочутливої КЦС з циліндричними електродами від вологості нафти з Сургутського родовища

### **3 АВТОГЕНЕРАТОРНІ ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ НАФТОПРОДУКТІВ**

Сучасний рівень розвитку інформаційно-вимірювальної техніки, як видно з першого розділу, характеризується великою різноманітністю методів перетворення значення вологості нафтопродуктів в електричний сигнал. Представлення вимірювальної інформації в аналоговій формі струму чи напруги приводить до необхідності використання аналого-цифрових перетворювачів, вартість яких при високих вимогах до точності значно перевищує вартість самих приладів вологості. Крім того, аналого-цифрові перетворювачі потребують додаткових затрат, пов'язаних з забезпеченням захищеності системи від завад, що створює низку обмежень з використання традиційних вимірювальних приладів, сумісних з цифровими засобами обробки інформації.

Одним з нових напрямків в розробці та створенні приладів для визначення вологості нафтопродуктів є створення автогенераторних засобів контролю вологості нафтопродуктів на основі конденсаторних циліндричних структур.

Теоретичні дослідження показали, що використання транзисторних структур з від'ємним опором і реактивних властивостей напівпровідникових приладів суттєво підвищує чутливість і точність виміру досліджуваного сигналу, у нашому випадку вологості нафтопродуктів [16, 103]. З метою вивчення властивостей автогенераторних засобів контролю вологості нафтопродуктів, вологочутливими елементами яких є конденсаторні циліндричні структури (КЦС) [96, 97], необхідно розробити математичні моделі, які б дозволили визначити значення напруги та струму в будь-якій точці схеми в заданий момент часу та отримати аналітичні залежності функцій перетворення та рівнянь чутливості.

#### **3.1 Дослідження та вибір автогенераторних засобів контролю вологості нафтопродуктів**

При підключенні вологочутливих КЦС до автогенераторних засобів забезпечується можливість досягнення значно більших точностей визначення вологості нафтопродуктів. Існує чимало різноманітних автогенераторів, які можна було б використати для обробки аналогового сигналу вологочутливої ємності КЦС. Розглянемо деякі з них та оберемо засіб, який надасть можливість досягнути найбільшої чутливості до вимірювального параметра, а саме до вологочутливої ємності КЦС, яка в свою чергу залежить від значення вологості нафтопродуктів.

Так, на рис 3.1 показано електричну схему  $RC$ -автогенератора, яка складається з біполярного транзистора, включеного за схемою зі спільним емітером, фазозсувних  $RC$  ланцюгів та вологочутливої КЦС  $C_w$ .

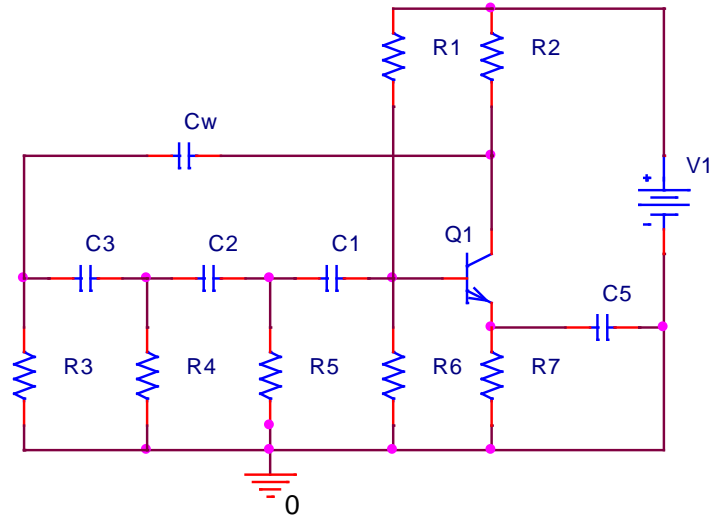


Рисунок 3.1 – Електрична схема  $RC$ -генератора [109]

За допомогою схемотехнічного моделювання в середовищі *Orcad Family Release* було отримано залежність вихідної частоти, а саме частоти колекторного струму біполярного транзистора від ємності КЦС, що зображена на рис. 3.2.

Як видно з рис. 3.2, даний автогенератор має досить малу чутливість та діапазон вимірюваної ємності, який лежить в межах від 80 до 225 нФ.

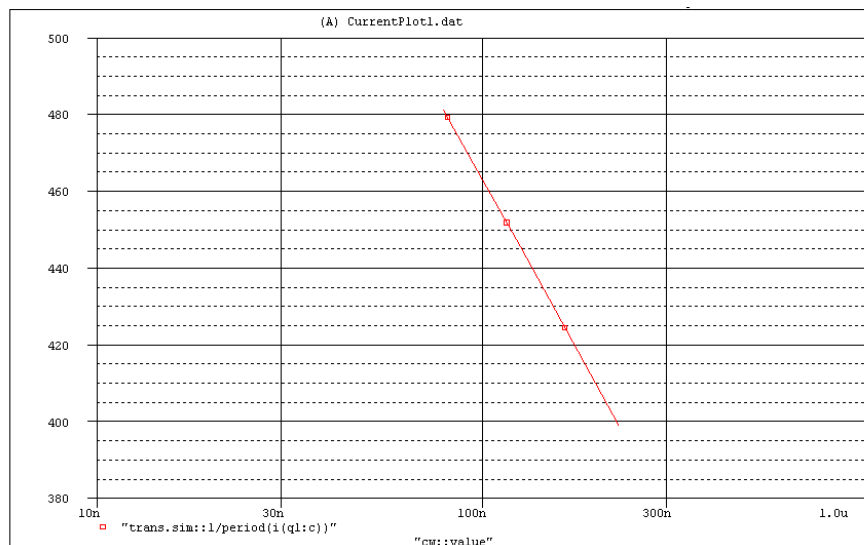


Рисунок 3.2 – Залежність вихідної частоти  $RC$ -генератора від ємності КЦС

RC-автогенератори є досить простими в реалізації, мають низьку собівартість, малі габарити та масу, але не дивлячись на перераховані переваги, мають низьку надійність, а саме стабільність частоти в них значно менша, ніж у LC-генераторів, форма коливань дещо відрізняється від синусоїдальної і суттєво змінюється при зміні параметрів активного елемента та кола зворотного зв'язку. Ці недоліки не дозволяють застосовувати їх у схемах, де необхідно досягати високої точності та стабільності частоти. Такі генератори мають низький ККД та невисоку добротність.

На рис 3.3 показано електричні схеми LC-автогенераторів [110], а саме автогенератора з ємнісним зворотним зв'язком (рис 3.3а) та індуктивним зворотним зв'язком (рис 3.3б).

В результаті схемотехнічного моделювання в середовищі *Orcad Family Release* було отримано залежності вихідної частоти LC-генераторів, а саме частоти колекторного струму біполярного транзистора від ємності КЦС для ємнісної триточки (рис. 3.4) та індуктивної триточки (рис 3.5).

З рис. 3.4 та рис. 3.5 видно, що індуктивна триточка має більшу чутливість, ніж ємнісна, але працює в меншому діапазоні зміни вологочутливої ємності КЦС. Так, робочий діапазон вологочутливої ємності КЦС для ємнісної триточки складає від 260 пФ до 2 нФ, а для індуктивної – від 180 пФ до 4,5 нФ.

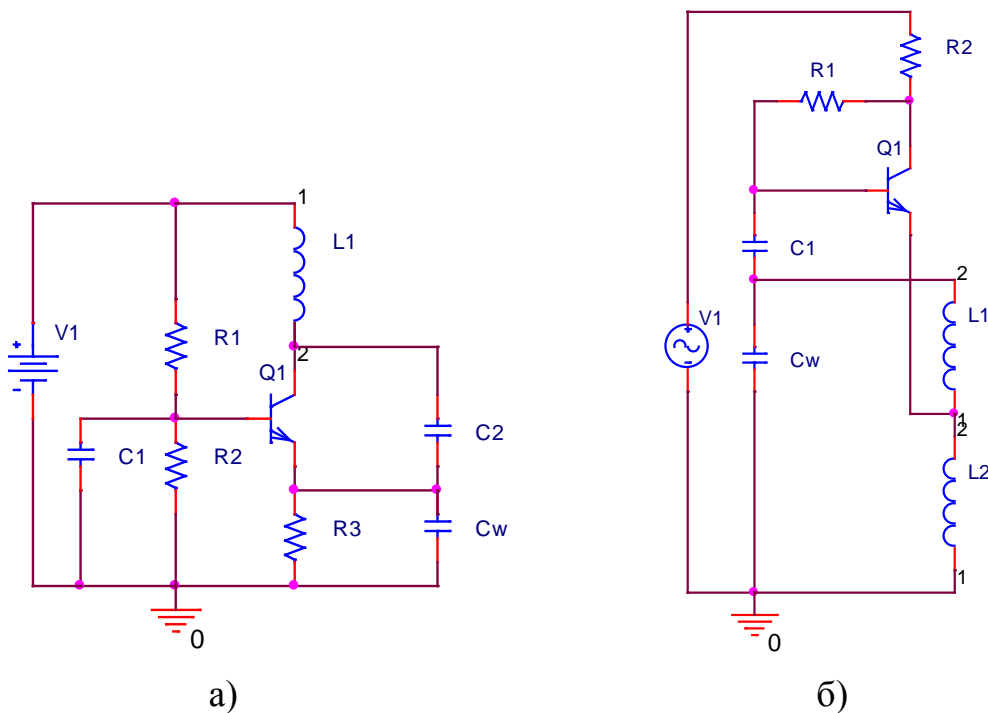


Рисунок 3.3 – Електрична схема LC-генератора:  
а) ємнісна триточка; б) індуктивна триточка

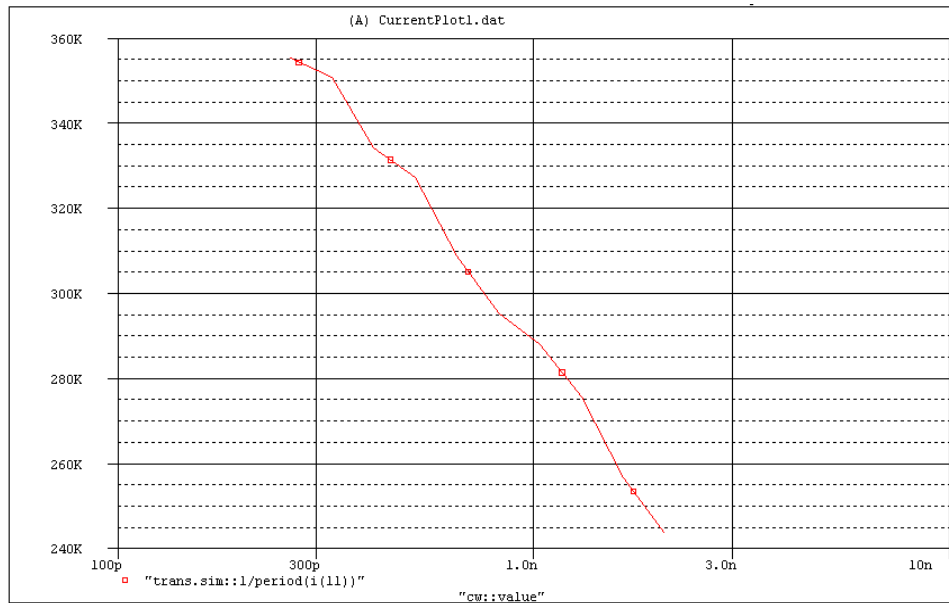


Рисунок 3.4 – Залежність вихідної частоти ємнісної триточки від ємності КЦС

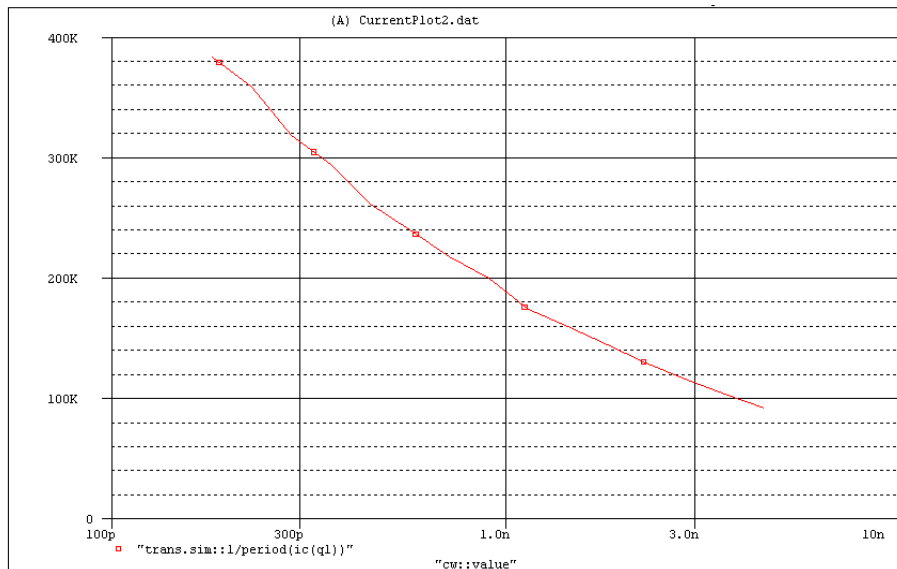


Рисунок 3.5 – Залежність вихідної частоти індуктивної триточки від ємності КЦС

*LC*-генератори мають більшу стабільність, ніж *RC*-генератори, коефіцієнт їх власної нестабільності складає близько  $10^{-4}$ , форма їхнього вихідного сигналу досить близька до синусоїдальної. Недоліками *LC*-генераторів є те, що на низьких частотах використання *LC*-генераторів є досить складним. Також до недоліків *LC*-генераторів можна віднести те, що вони мають труднощі виготовлення високо-



стабільних температурно-незалежних котушок індуктивності, які, в свою чергу, мають велику вартість та габарити.

В якості генератора розглянемо також електричну схему мультивібратора в автоколивальному режимі роботи [109], що зображена на рис. 3.6. Цей мультивібратор складається з джерела живлення, двох однакових біполярних транзисторів, індуктивностей та вологочутливої КЦС.

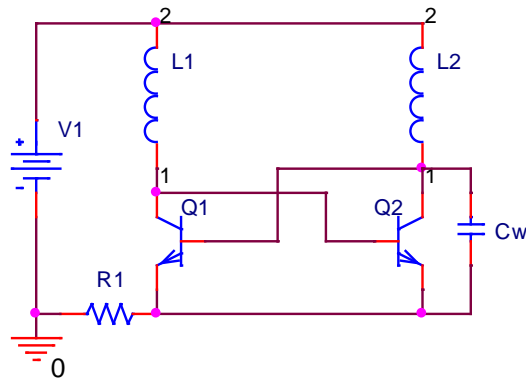


Рисунок 3.6 – Електрична схема мультивібратора

За допомогою схемотехнічного моделювання в середовищі *Orcad Family Release* отримано залежність вихідної частоти мультивібратора, а саме частоти колекторного струму біполярних транзисторів від ємності КЦС (рис 3.7).

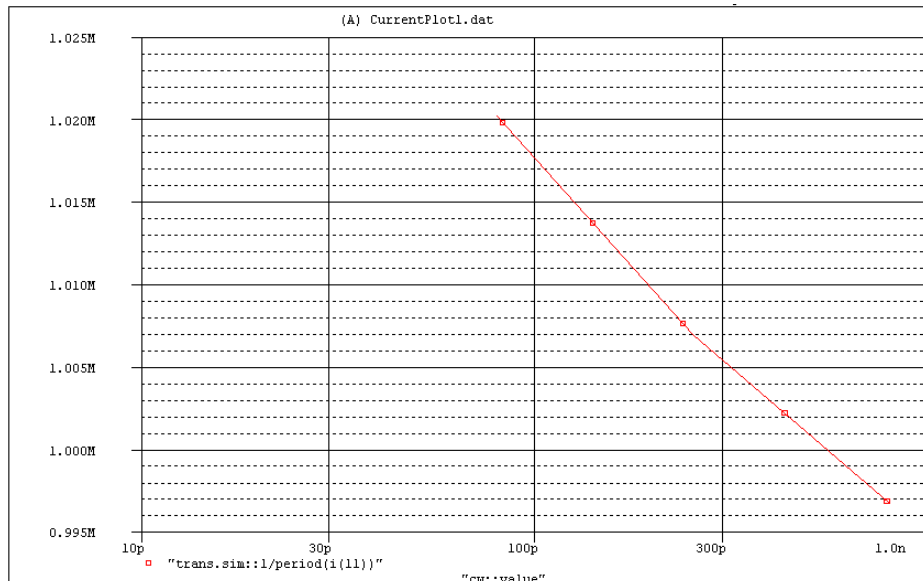


Рисунок 3.7 – Залежність вихідної частоти мультивібратора від ємності КЦС

З рис. 3.7 видно, що робочий діапазон вологочутливої ємності КЦС складає від 80 до 800 пФ, а також, що мультивібратор має найменшу чутливість серед розглянутих автогенераторів. Перевагою мультивібратора є висока стабільність частоти генерації, однак недоліком застосування такого генератора є низька чутливість та складність підбору однакових за параметрами транзисторів. Верхня межа частоти для такого генератора складає всього одиниці МГц, оскільки на більших частотах обидва транзистори закриваються і для відновлення роботи потрібно вимкнути і ввімкнути живлення знову.

Перспективним напрямком є використання автогенераторів на транзисторних структурах з від'ємним опором. Використання транзисторних структур з від'ємним опором і реактивних властивостей напівпровідникових приладів суттєво підвищує чутливість і точність вимірювання досліджуваного сигналу, у нашому випадку вологості нафтопродуктів. Розглянемо автогенератор на основі транзисторної структури на від'ємному опорі, що зображений на рис. 3.8 [40]. Генератор складається з джерела живлення, двох подільників напруги, біполярних транзисторів з різним типом провідності, котушки індуктивності та вологочутливої КЦС.

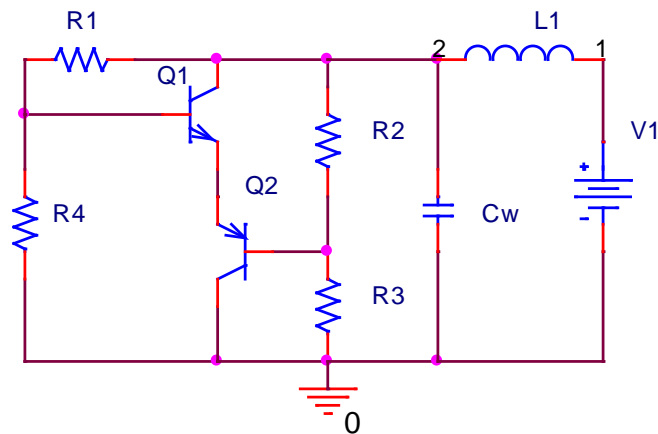


Рисунок 3.8 – Електрична схема автогенератора на транзисторній структурі з від'ємним опором

Для доведення існування ділянки від'ємного опорю на рис. 3.9 показано результати моделювання в середовищі *Orcad Family Release* вольт-амперної характеристики автогенератора.

З характеристики видно присутність ділянки з від'ємним опором при напрузі живлення  $U_1$  від 2,6 В до 6,7 В. Коливальний контур в автогенераторі (див. рис. 3.8) утворений паралельним включенням повного опорю з ємнісною складовою на електродах колектор–колектор транзисторів  $Q1$  та  $Q2$  та індуктивності  $L_1$ . При наступній дії вологи

на вологочутливий конденсатор  $C_W$  змінюється ємнісна складова повного опору на електродах колектор–колектор транзисторів  $Q1$  та  $Q2$ , що викликає ефективну зміну частоти коливального контуру.

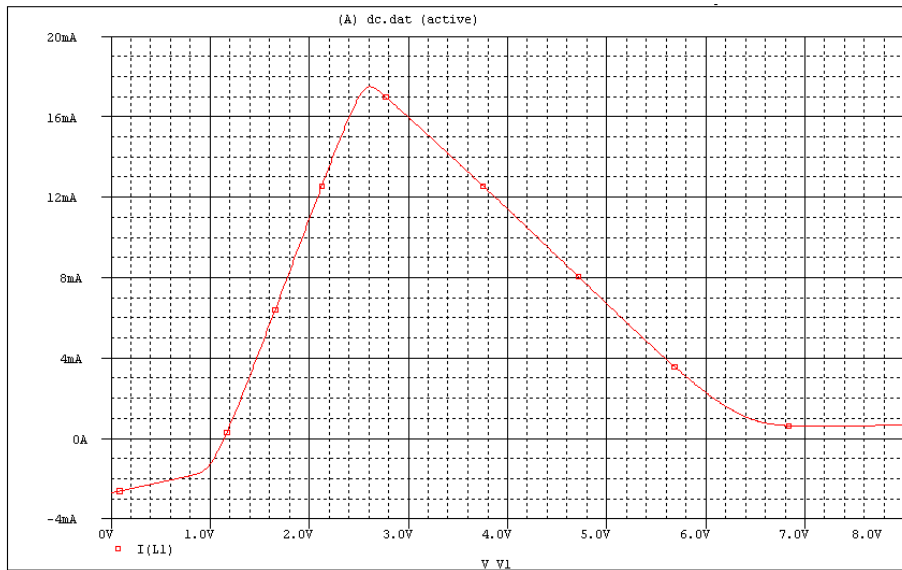


Рисунок 3.9 – ВАХ автогенератора на транзисторній структурі з від’ємним опором

На рис. 3.10 зображено залежність вихідної частоти автогенератора на від’ємному опорі від вологочутливої ємності КЦС. З цієї характеристики легко бачити, що автогенератор має найбільшу чутливість та робочий діапазон вологочутливої ємності КЦС, який складає від 20 пФ до 930 нФ серед розглянутих вище автогенераторів.

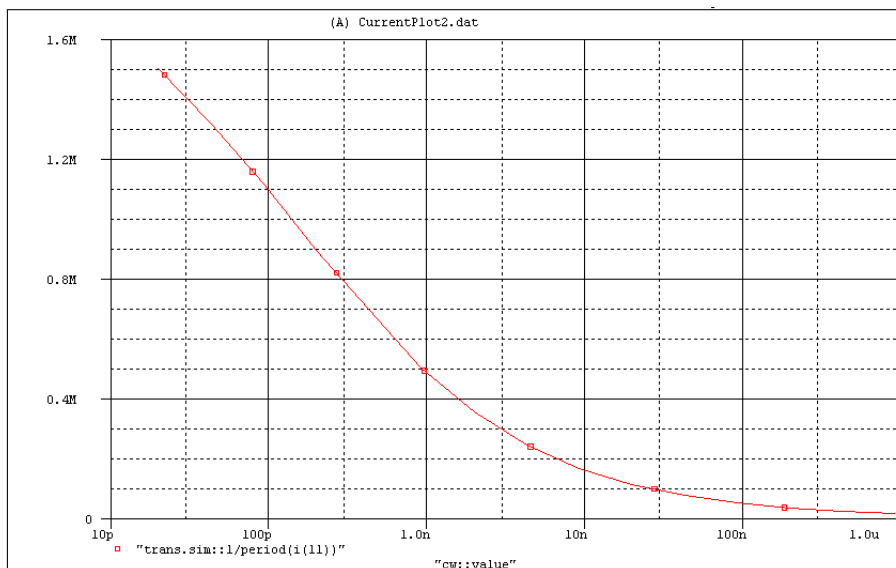


Рисунок 3.10 – Залежність вихідної частоти автогенератора на транзисторній структурі з від’ємним опором

Автогенератори на основі транзисторних структур з від'ємним опором мають такі переваги [111]: 1) висока короткострокова стабільність частоти генерованих коливань (відносна нестабільність частоти складає близько  $(1,5...2,1) \cdot 10^{-5}$ ); 2) широкий коефіцієнт перекриття по частоті генерованих коливань – у межах від 5 до 70 % відносно центральної частоти; 3) малі величини напруги живлення та керування  $U_{ж} = (2...10) \text{ В}$ ; 4) мала спожита потужність та високий ККД (45...95) % для різних діапазонів частот; 5) можливість отримання надширокопasmугової ЧМ з великим індексом модуляції ( $m > 20$ ); 6) сумісність з інтегральною технологією виготовлення напівпровідникових ІМС; 7) мала кількість пасивних елементів кіл живлення та налаштування, що підвищує надійність і довговічність. Для електричного перелаштування частоти генерації не потрібні додаткові елементи перестройки (варікапи, варістори, електрично керовані опори та ін.), при цьому основним є м'який режим генерації.

Враховуючи усі переваги автогенераторів на від'ємному опорі та їх високу чутливість до вхідного параметра, надалі в роботі будемо використовувати саме їх.

### 3.2 Дослідження характеристик автогенераторного засобу контролю вологості нафтопродуктів на основі структури р-п-р біполярного і двозатворного польового транзисторів

На рис. 3.11 зображено електричну схему АВН [112], в якому при дії вологи на вологочутливу КЦС  $C_w(W, T)$  змінюється ємнісна складова повного опору на електродах емітер–перший затвор транзисторів VT2 та VT1, що викликає ефективну зміну частоти коливального контуру [113]. Схема живиться від джерела живлення постійної напруги  $U_1$ .

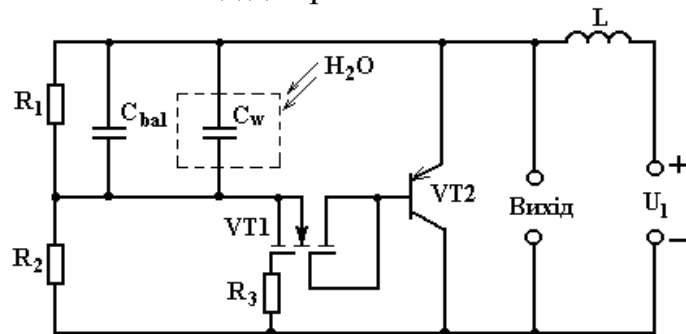


Рисунок 3.11 – Електрична схема АВН [112]

Для визначення функції перетворення та чутливості на рис. 3.12 показано еквівалентну схему АВН, яка реалізує залежність частоти генерації від зміни вологості нафтопродуктів.

Для зручності розрахунків, об'єднавши паралельні ємності  $C_w(W,T)$  і  $C_{bal}$  у  $C_i(W,T) = C_w(W,T) + C_{bal}$  та струми  $I_f$  і  $I_r$  у  $I_{bt} = (I_f - I_r) / QB$ , а також скориставшись методом змінних стану, на рис. 3.13 покажемо перетворену еквівалентну схему АВН [114].

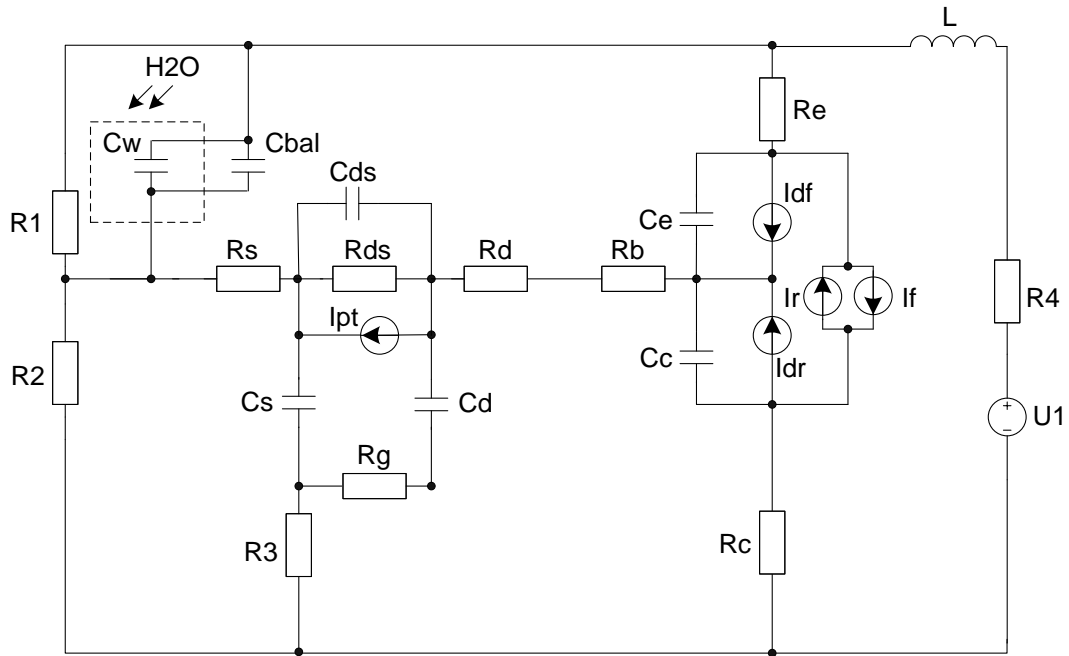


Рисунок 3.12 – Еквівалентна схема АВН

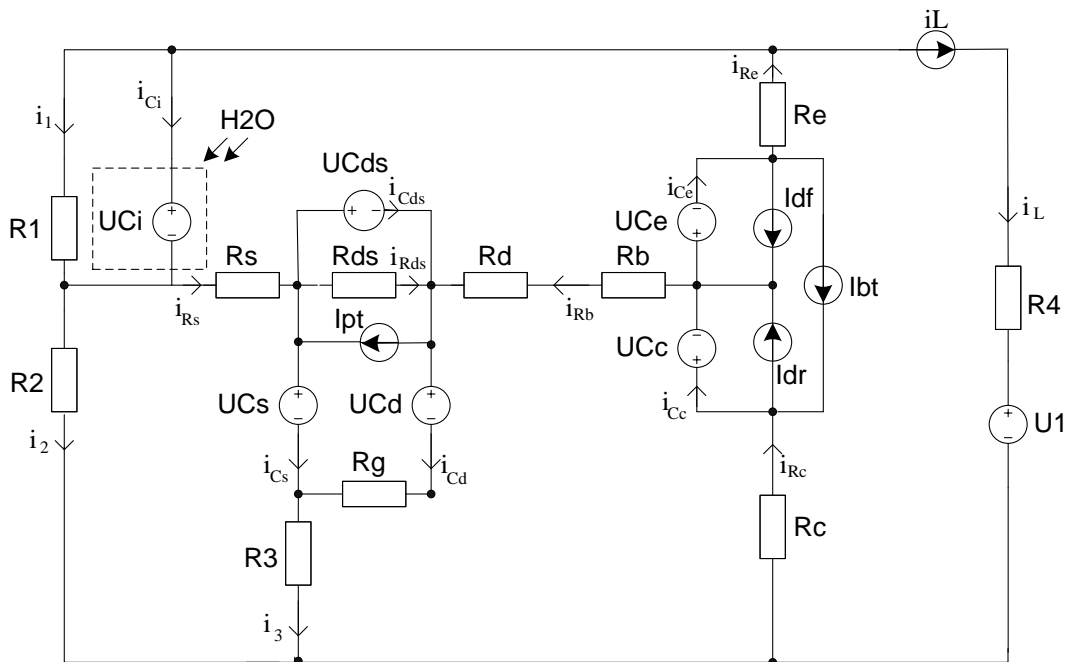


Рисунок 3.13 – Перетворена еквівалентна схема АВН [114]

На основі вибраних напрямків струмів було складено систему рівнянь Кірхгофа:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 U_L = -(U_{C_i}(W) + i_L R_4 + U_1 + i_{R_c} R_c + U_{C_e} + U_{C_c} + i_{R_e} R_e); \\
 i_{R_{ds}} = \frac{U_{C_{ds}}}{R_{ds}}; \\
 i_{C_d} = \frac{U_{C_s} - U_{C_{ds}} - U_{C_d}}{R_g}; \\
 i_{R_b} = \frac{U_{C_{ds}} + i_{R_s} R_s + U_{C_i}(W) + i_{R_e} R_e + U_{C_e}}{R_b + R_d}; \\
 i_{C_{ds}} = i_{R_s} + I_{pt} - i_{C_s} - i_{R_{ds}}; \\
 i_{R_c} = \frac{-(U_{C_d} + U_{C_c} + i_{R_b}(R_b + R_d) + i_{C_d} R_g + i_3 R_3)}{R_c}; \\
 i_{R_s} = \frac{i_2 R_2 - U_{C_s} - i_3 R_3}{R_s}; \\
 i_{R_e} = i_{R_c} - i_{R_b}; \\
 i_1 = \frac{U_{C_i}(W)}{R_1}; \\
 i_2 = i_1 + i_{C_i} - i_{R_s}; \\
 i_3 = i_{R_c} - i_L - i_2; \\
 i_{C_s} = i_{R_s} + I_{pt} - i_{C_{ds}} - i_{R_{ds}}; \\
 i_{C_i} = i_{R_e} - i_1 - i_L; \\
 i_{C_c} = i_{R_c} + I_{bt} - I_{dr}; \\
 i_{C_e} = i_{R_e} + I_{bt} + I_{df},
 \end{array} \right. \quad (3.1)$$

де  $R_1, R_2, R_3, R_4$  – навантажувальні опори;  $R_b, R_e, R_c, R_g, R_d, R_s$  – об’ємні опори бази, емітера, колектора, затвору, стоку та витоків;  $R_{ds}$  – опір стік–витік;  $C_e, C_c$  – ємності емітерного та колекторного переходів;  $C_d, C_s, C_{ds}$  – ємності затвор–стік, затвор–витік та стік–витік;  $C_{bal}$  – баластна ємність;  $C_w(W, T)$  – ємність вологочутливої КЦС;  $L$  –

індуктивність;  $U_1$  – джерело живлення постійної напруги;  $I_{pt}$  – струм польового транзистора;  $I_{dr}, I_{df}$  – струми внутрішніх переходів база–колектор та база–емітер;  $I_f, I_r$  – прямий та зворотній струми біполярного транзистора.

Вважаючи заданими значення відповідних напруг на ємностях та струм через індуктивність, розв’яжемо систему рівнянь (3.1) відносно  $U_L, i_{C_{ds}}, i_{C_d}, i_{C_s}, i_{C_i}, i_{C_e}, i_{C_c}$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} U_L = -(U_1 + U_{C_e} + U_{C_c} + i_L R_4 - D_5 + D_2 R_e); \\ i_{C_d} = \frac{D_7}{R_g}; \\ i_{C_{ds}} = -D_4 + \frac{D_7}{R_g} - \frac{U_{C_{ds}}}{R_{ds}} + I_{pt}; \\ i_{C_s} = \frac{C_5 R_2 - C_4 R_3 - U_{C_s}}{R_s} + \frac{D_1 - C_4 R_3}{R_b + R_d} - \frac{D_7}{R_g}; \\ i_{C_i} = -i_L - \frac{C_5 A_4 + C_4 A_3 + A_2}{A_1} - \frac{U_{C_i}(W)}{R_1}; \\ i_{C_c} = I_{bt} - \frac{U_{C_e} + U_{C_d} + D_1 + R_g D_6}{R_c} - I_{dr}; \\ i_{C_e} = I_{bt} - \frac{C_5 A_4 + C_4 A_3 + A_2}{A_1} + I_{df}, \end{array} \right. \quad (3.2)$$

де  $A_1 = R_{ds} \left( (R_c + R_e)(R_b + R_d) + R_e(R_c - R_g) \right)$ ;

$A_2 = R_{ds} R_g \left( I_{pt}(R_b + R_d) - U_{C_e} - U_{C_i}(W) - U_{C_{ds}} + U_{C_s} \right) + (R_b + R_d) \times$   
 $\times \left( R_{ds} (U_{C_e} + U_{C_c} + U_{C_i}(W)) - U_{C_{ds}} R_g \right) + R_{ds} R_c (U_{C_e} + U_{C_i}(W) + U_{C_{ds}} - U_{C_s})$ ;

$A_3 = R_{ds} R_3 (R_g - R_c)$ ;  $A_4 = R_{ds} R_2 (R_b + R_d + R_2 - R_g)$ ;

$B_1 = A_4 R_s + A_1 (R_s + R_2)$ ;  $B_2 = A_1 R_3 - R_s A_3$ ;  $B_3 = A_1 U_{C_s} - R_s A_2$ ;

$C_1 = B_1 (R_2 - R_3 - 2R_s)$ ;  $C_2 = R_s (A_1 (R_2 - R_s) + B_1)$ ;

$C_3 = B_3 (R_s - R_2) + B_1 U_{C_s}$ ;  $C_4 = \frac{i_L C_2 + C_3}{C_1}$ ;  $C_5 = \frac{C_4 B_1 - i_L A_1 R_s + B_3}{B_1}$ ;

$$\begin{aligned}
D_1 &= U_{C_e} + U_{C_i}(W) + U_{C_{ds}} - U_{C_s} + C_5 R_2 - \frac{R_e(C_5 A_4 + C_4 A_3 + A_2)}{A_1}; \\
D_2 &= -\frac{C_5 A_4 + C_4 A_3 + A_2}{A_1}; \quad D_3 = \frac{C_5 R_2 - C_4 R_3 - U_{C_s}}{R_s}; \\
D_4 &= \frac{U_{C_e} + U_{C_i}(W) + U_{C_{ds}} + D_2 R_e + D_3 R_s}{R_b + R_d}; \\
D_5 &= R_g \left( \frac{U_{C_s} - U_{C_{ds}} - U_{C_d}}{R_g} - D_4 - \frac{U_{C_{ds}}}{R_{ds}} + I_{pt} \right) + C_4 R_3 + U_{C_d} + U_{C_c} + \\
&+ D_4 (R_b + R_d); \\
D_6 &= -\frac{D_1 - C_4 R_3}{R_b + R_d} + \frac{U_{C_s} - U_{C_{ds}} - U_{C_d}}{R_g} - \frac{U_{C_{ds}}}{R_{ds}} + I_{pt}; \\
D_7 &= U_{C_s} - U_{C_{ds}} - U_{C_d}.
\end{aligned}$$

Проведемо заміну у лівій частині рівнянь системи рівнянь (3.2) у відповідності до виразів, які описують струми в ємностях  $i_C(t) = C \frac{dU_C(t)}{dt}$  і напруги у індуктивностях  $U_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$ , а також врахуємо, що всі напруги та струми в системі змінюються в часі [114]:

$$\left\{ \begin{aligned}
L \frac{di_L(t)}{dt} &= -(U_1 + U_{C_e}(t) + U_{C_c}(t) + i_L(t)R_4 - D_5 + D_2 R_e); \\
C_d \frac{dU_{C_d}(t)}{dt} &= \frac{D_7}{R_g}; \\
C_{ds} \frac{dU_{C_{ds}}(t)}{dt} &= -D_4 + \frac{D_7}{R_g} - \frac{U_{C_{ds}}(t)}{R_{ds}} + I_{pt}; \\
C_s \frac{dU_{C_s}(t)}{dt} &= \frac{C_5 R_2 - C_4 R_3 - U_{C_s}(t)}{R_s} + \frac{D_1 - C_4 R_3}{R_b + R_d} - \frac{D_7}{R_g}; \\
C_i \frac{dU_{C_i}(W,t)}{dt} &= -i_L - \frac{C_5 A_4 + C_4 A_3 + A_2}{A_1} - \frac{U_{C_i}(W,t)}{R_1}; \\
C_c \frac{dU_{C_c}(t)}{dt} &= I_{bt} - \frac{U_{C_c}(t) + U_{C_d}(t) + D_1 + R_g D_6}{R_c} - I_{dr}; \\
C_e \frac{dU_{C_e}(t)}{dt} &= I_{bt} - \frac{C_5 A_4 + C_4 A_3 + A_2}{A_1} + I_{df}.
\end{aligned} \right. \quad (3.3)$$



Система рівнянь (3.3) є нелінійною, оскільки містить в собі нелінійні елементи, а саме джерела струмів  $I_{pt}$ ,  $I_{dr}$ ,  $I_{df}$ ,  $I_{bt} = (I_f - I_r) / QB$  та ємності  $C_c$ ,  $C_e$ .

$$I_f = I_S \left( e^{\frac{V_{BE}}{VT \cdot NF}} - 1 \right); \quad (3.4)$$

$$I_r = I_S \left( e^{\frac{V_{BC}}{VT \cdot NR}} - 1 \right); \quad (3.5)$$

$$I_{df} = \frac{I_f}{BF}; \quad (3.6)$$

$$I_{dr} = \frac{I_r}{BR}; \quad (3.7)$$

$$I_{pt} = \begin{cases} 0, & V_{GS} - V_{TO} \leq 0; \\ \beta \cdot (V_{GS} - V_{TO})^2, & V_{GS} - V_{TO} \leq V_{DS}; \\ \beta \cdot V_{DS} \cdot [2 \cdot (V_{GS} - V_{TO}) - V_{DS}], & V_{GS} - V_{TO} > V_{DS}, \end{cases} \quad (3.8)$$

де  $I_S$  – струм насичення біполярного транзистора;  $V_{BE}, V_{BC}$  – напруги на внутрішніх точках база–емітер, база–колектор;  $VT$  – температурний потенціал;  $NF, NR$  – коефіцієнти неідеальності в нормальному та інверсному режимах;  $BF, BR$  – максимальні коефіцієнти передачі струму за схемою з загальним емітером в нормальному та інверсному режимах;  $QB$  – коефіцієнт неідеальності переходів біполярного транзистора;  $V_{TO}$  – порогова напруга;  $\beta$  – крутизна прохідної характеристики;  $V_{GD}, V_{GS}, V_{DS}$  – напруги на внутрішніх точках затвор–стік, затвор–витік та стік–витік.

Ємності біполярного транзистора мають дифузійну та бар’єрну складові. Розглянемо окремо ємність колекторного переходу  $C_c$ :

$$C_c = C_{c,dif} + C_{c,bar}; \quad (3.9)$$

$$C_{c,dif} = \frac{(I_r + I_S) \cdot TR}{VT \cdot NR}; \quad (3.10)$$

$$C_c bar = \begin{cases} \frac{CJC}{\left(1 - \frac{V_{BC}}{V_{JC}}\right)^{MJC}}, & V_{BC} < 0; \\ CJC, & V_{BC} \geq 0. \end{cases} \quad (3.11)$$

Ємність емітерного переходу  $C_e$  запишеться як:

$$C_e = C_e dif + C_e bar; \quad (3.12)$$

$$C_e dif = \frac{(I_f + I_s) \cdot TF}{VT \cdot NF}; \quad (3.13)$$

$$C_e bar = \begin{cases} \frac{CJE}{\left(1 - \frac{V_{BE}}{V_{JE}}\right)^{MJE}}, & V_{BE} < 0; \\ CJE, & V_{BE} \geq 0, \end{cases} \quad (3.14)$$

де  $C_c dif, C_c bar, C_e dif, C_e bar$  – дифузійні і бар’єрні ємності колекторного та емітерного переходів;  $V_{JE}, V_{JC}$  – контактна різниця потенціалів переходів;  $TF, TR$  – час переносу заряду через базу в нормальному та інверсному режимах;  $MJE, MJC$  – коефіцієнти плавності переходів;  $CJE, CJC$  – ємність емітерного і колекторного переходів при нульовому зміщенні.

Система рівнянь (3.3) є динамічною математичною моделлю АВН, яка дозволяє визначити значення напруги та струму в будь-якій точці схеми в заданий момент часу.

Для перевірки адекватності розробленої моделі написано програму для розрахунку параметрів схеми в середовищі *Maple*. Розрахунок показує, що на виході АВН дійсно будуть існувати періодичні коливання, частота яких буде змінюватись зі зміною ємності вологочутливої КЦС (рис. 3.14). Так, при  $C_w(W, T) = 25$  пФ частота  $F = 601$  кГц, при  $C_w(W, T) = 45$  пФ частота  $F = 585$  кГц, при  $C_w(W, T) = 60$  пФ частота  $F = 575$  кГц, при  $C_w(W, T) = 90$  пФ частота  $F = 560$  кГц, а при  $C_w(W, T) = 115$  пФ частота  $F = 552$  кГц, при цьому  $U_I = 1,7$  В.

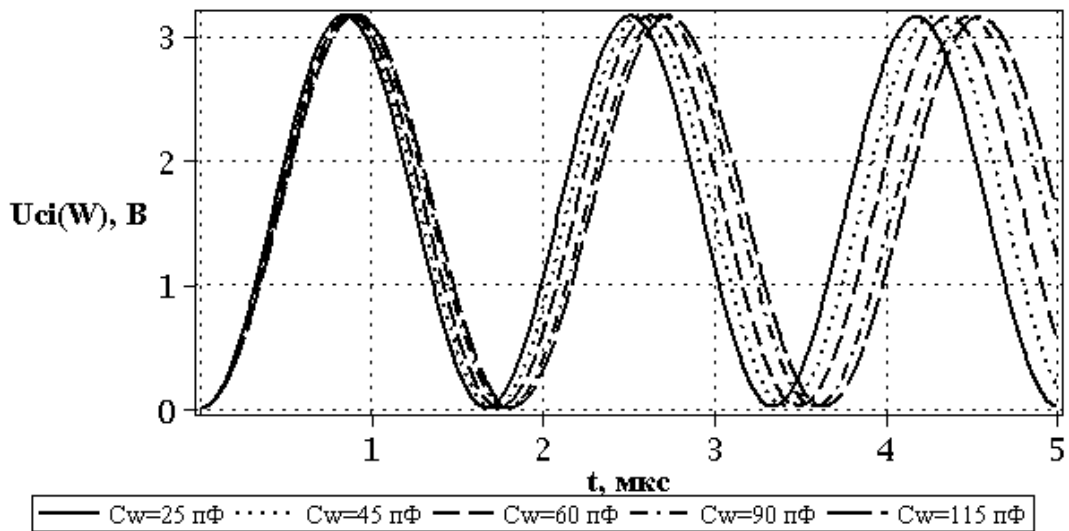


Рисунок 3.14 – Зміна напруги вихідного сигналу від часу при різних значеннях ємності вологочутливої КЦС

На рис. 3.15. показано зміну напруги вихідного сигналу від часу при різних значеннях вологості нафти з туркменського родовища при використанні КЦС із циліндричними електродами. З характеристики добре видно, що при збільшенні вологості частота вихідного сигналу буде зменшуватись.

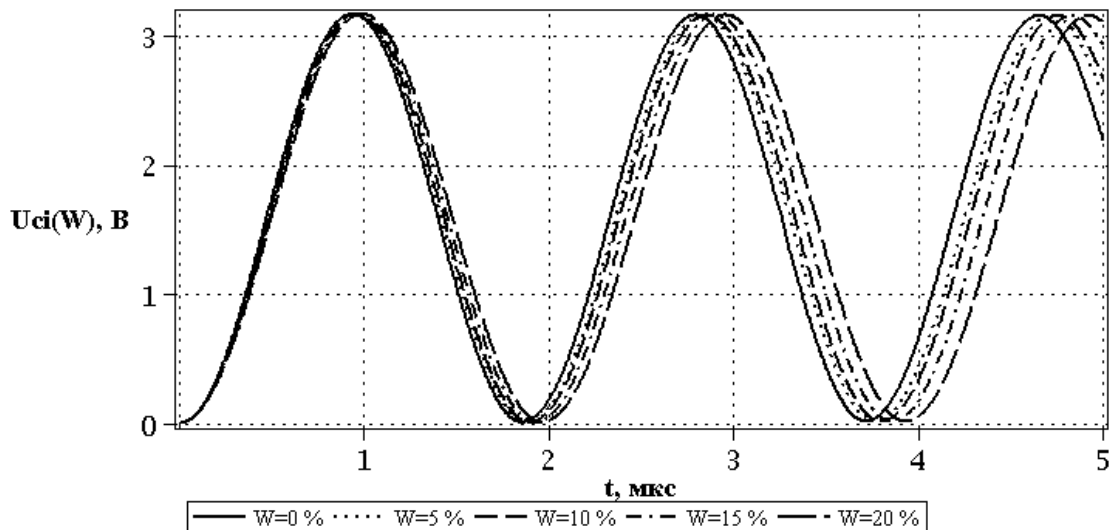


Рисунок 3.15 – Зміна напруги вихідного сигналу від часу при різних значеннях вологості нафти з туркменського родовища

Знаючи значення частоти вихідного сигналу  $F$  при різних значеннях вологочутливої ємності  $C_w(W, T)$  КЦС, можна отримати функцію перетворення для АВН в загальному вигляді (оскільки замість значень

вологості в ній використовуються значення вологочутливої ємності), при  $U_I = 1,7$  В. Так, на рис. 3.16 показано функцію перетворення АВН в загальному вигляді з використанням у якості вологочутливого елемента КЦС з сіткоподібними електродами, а на рис. 3.17 – з циліндричними електродами, при різних значеннях індуктивності  $L$ .

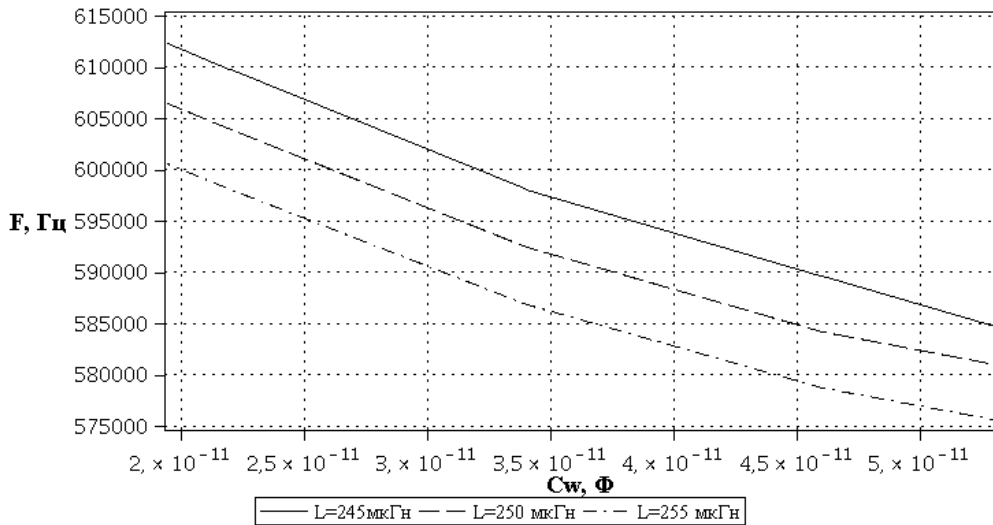


Рисунок 3.16 – Теоретична функція перетворення в загальному вигляді з використанням КЦС з сіткоподібними електродами

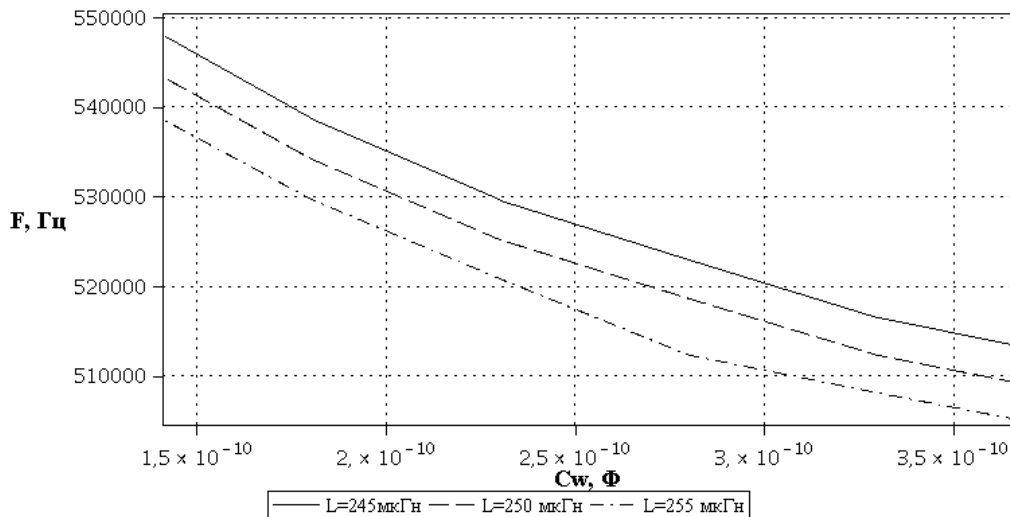


Рисунок 3.17 – Теоретична функція перетворення в загальному вигляді з використанням КЦС з циліндричними електродами

Для проведення експериментальних досліджень у схемі, що зображена на рис. 3.11 було використано транзистори КП350 та ВС557, в якості вологочутливого елемента було використано почергово КЦС: з сіткоподібними електродами [97] та з циліндричними електродами [96].

На рис. 3.18 для доведення існування ділянки від'ємного опору зображено експериментальну ВАХ досліджуваного АВН [115]. З характеристики видно присутність ділянки від'ємного опору при напрузі живлення  $U_1$  від 1,6 до 4,0 В.

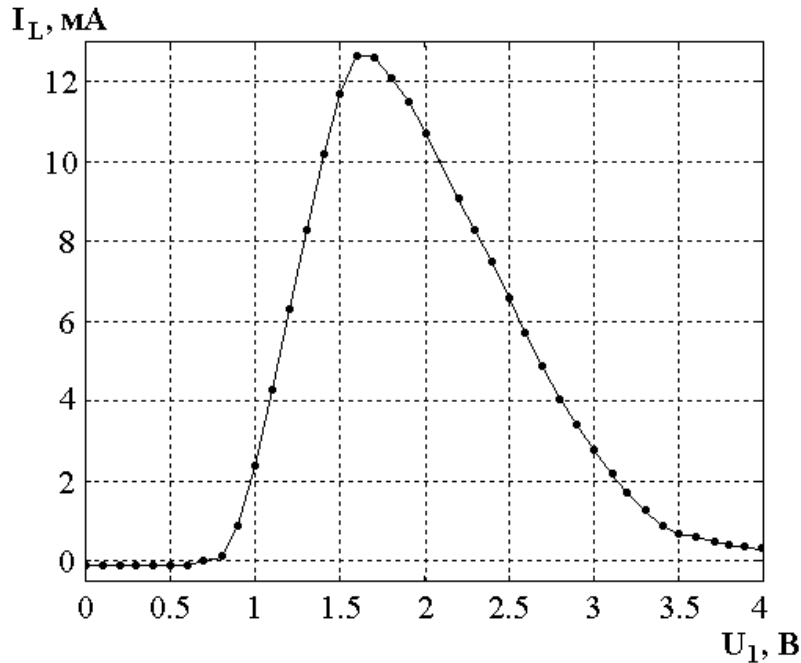


Рисунок 3.18 – Експериментальна ВАХ АВН [88]

Для більшого розуміння на рис. 3.19–3.23 наведено функції перетворення АВН для різних нафтопродуктів з використанням в якості вологочутливого елемента КЦС з сіткоподібними електродами та на рис. 3.24–3.28 – з циліндричними електродами.

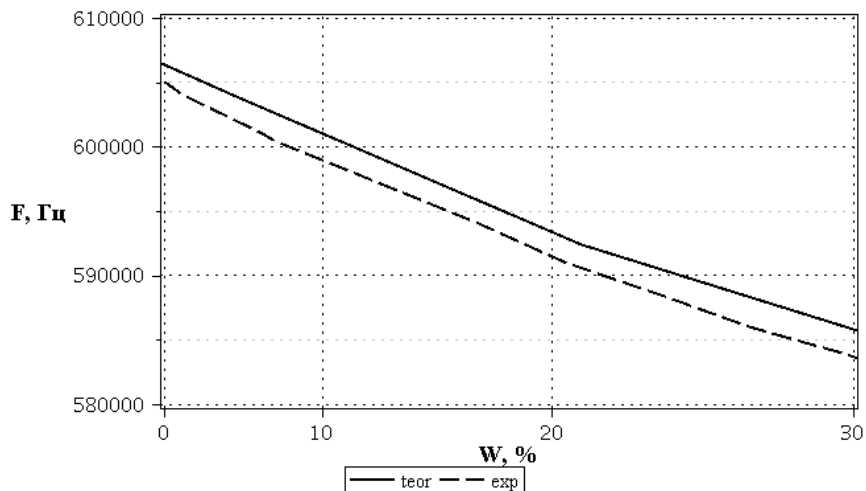


Рисунок 3.19 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із сіткоподібними електродами для напівсинтетичного моторного масла 5W40

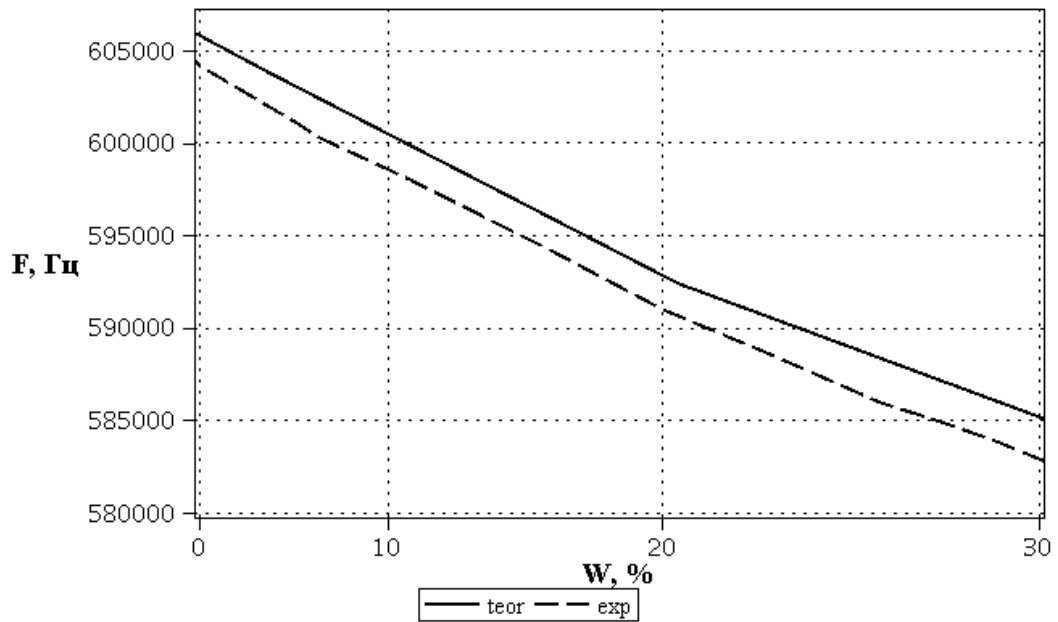


Рисунок 3.20 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із сіткоподібними електродами для мінерального моторного масла М8В

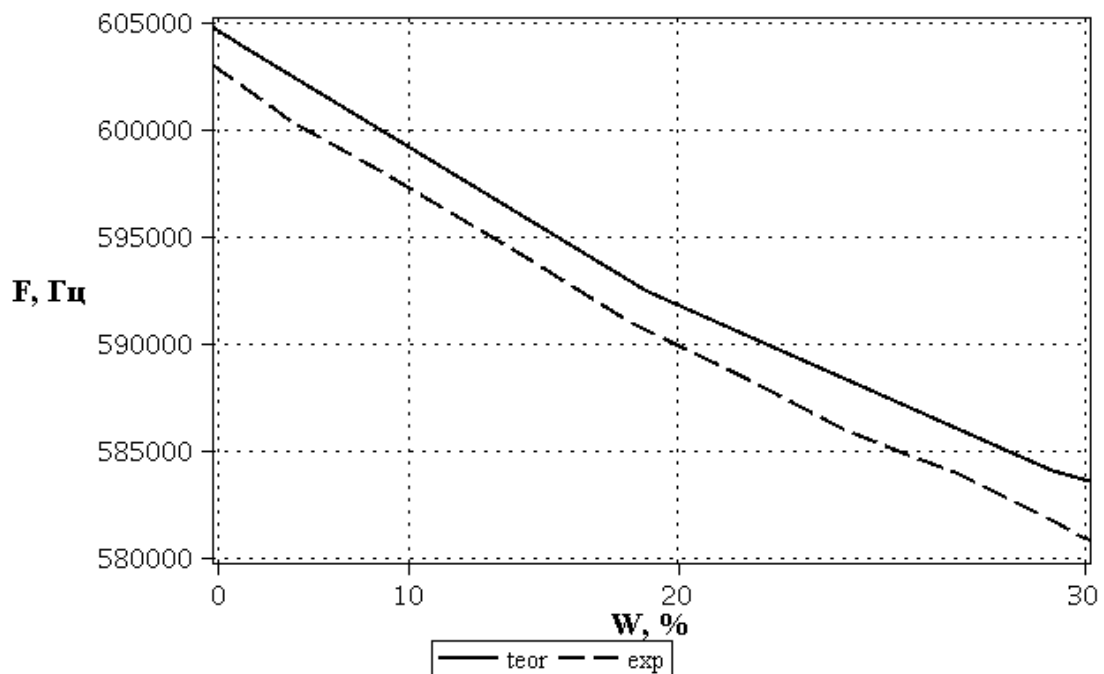


Рисунок 3.21 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із сіткоподібними електродами для трансформаторного масла Т-1500

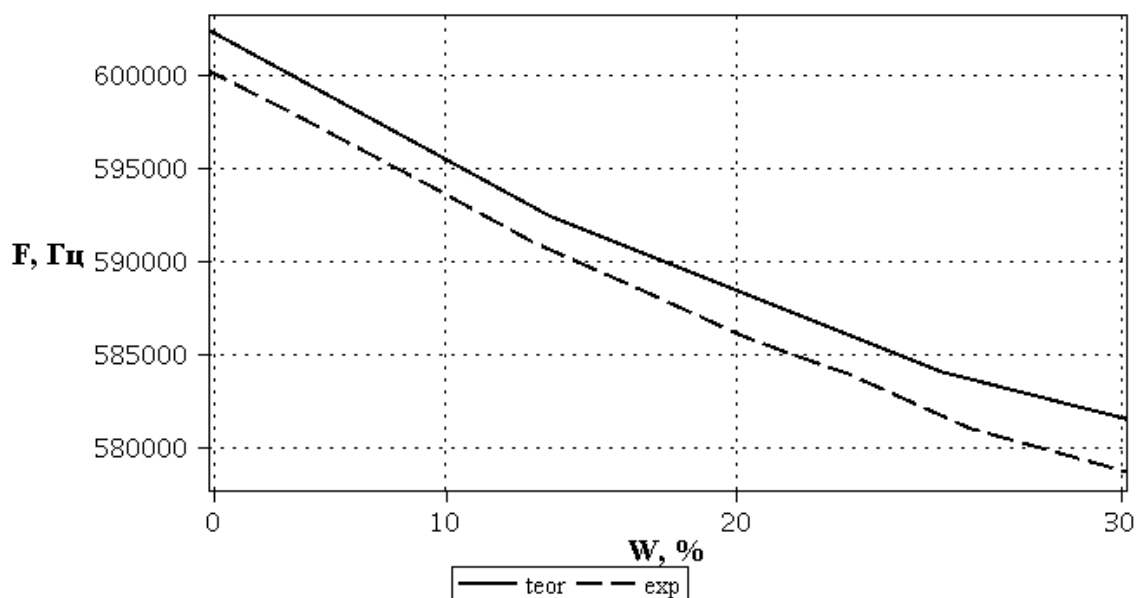


Рисунок 3.22 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із сіткоподібними електродами для нафти з туркменського родовища

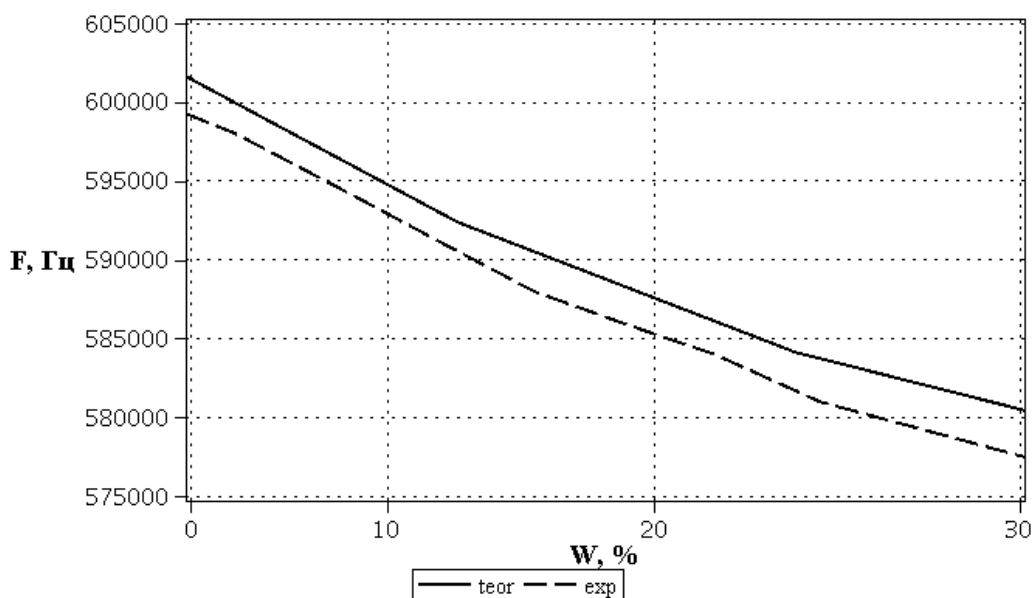


Рисунок 3.23 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із сіткоподібними електродами для нафти з Сургутського родовища

Як видно з рис. 3.19–3.23, функція перетворення АВН є нелінійною. Чутливість АВН з КЦС із сіткоподібними електродами в діапазоні зміни вологості нафтопродуктів від 0 до 30 % складає від 0,6 до 0,85 кГц/%.

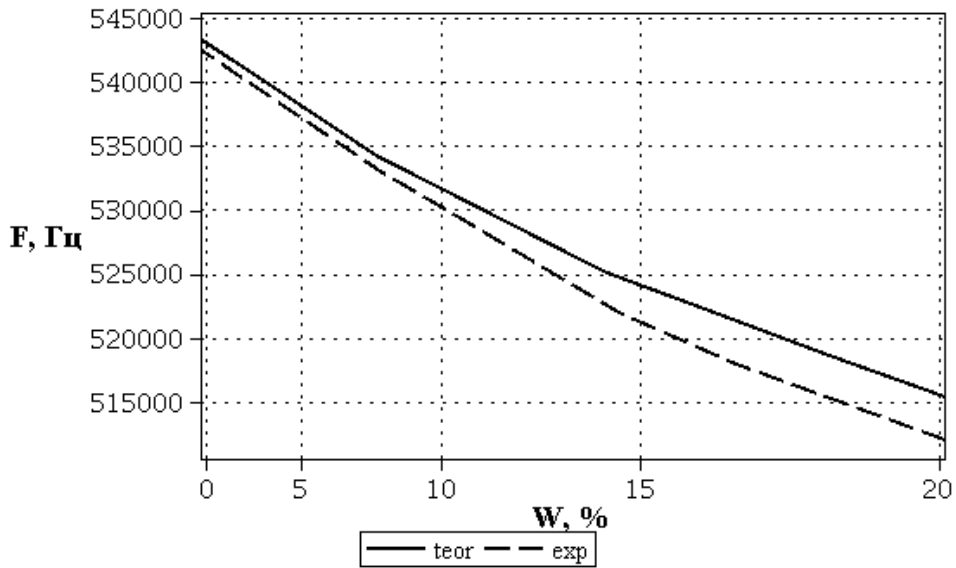


Рисунок 3.24 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами для напівсинтетичного моторного масла 5W40

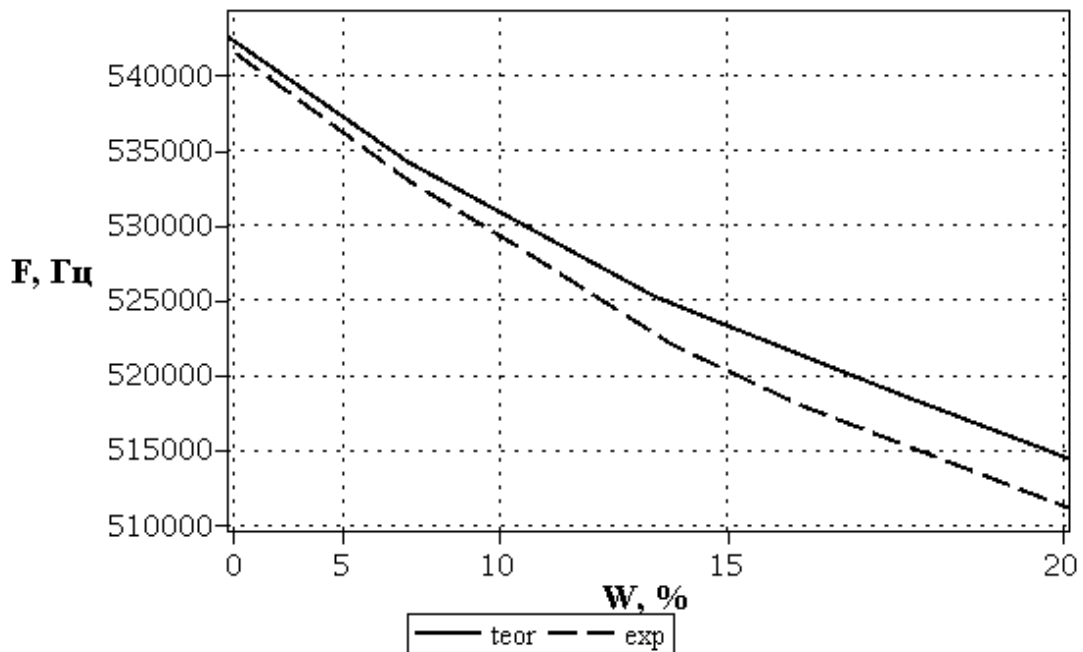


Рисунок 3.25 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами для мінерального моторного масла M8V



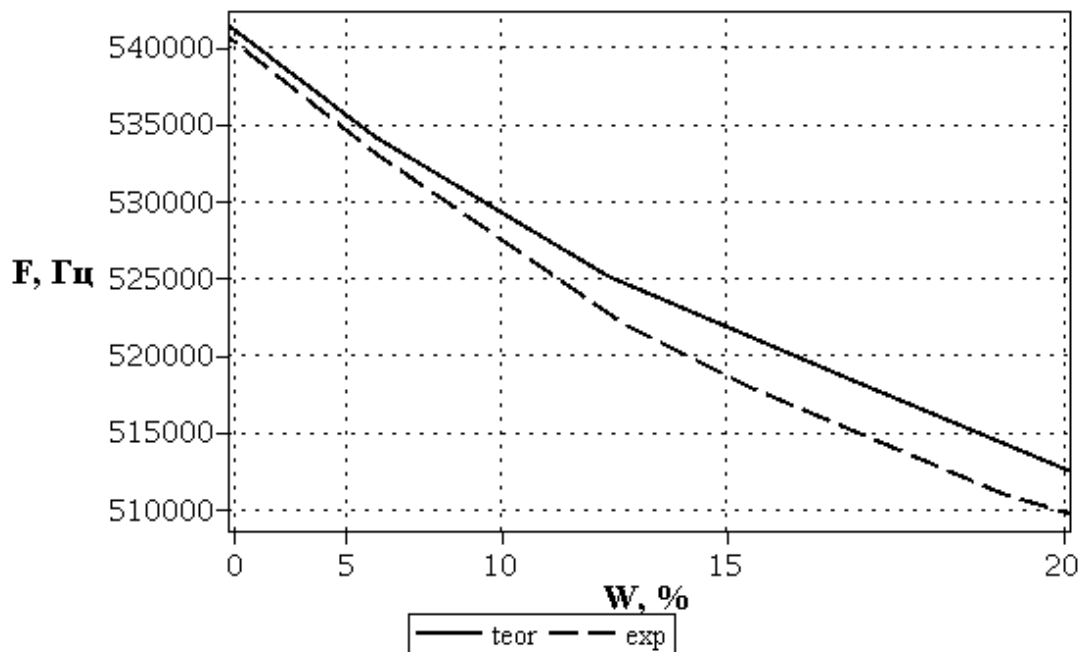


Рисунок 3.26 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами для трансформаторного масла Т-1500

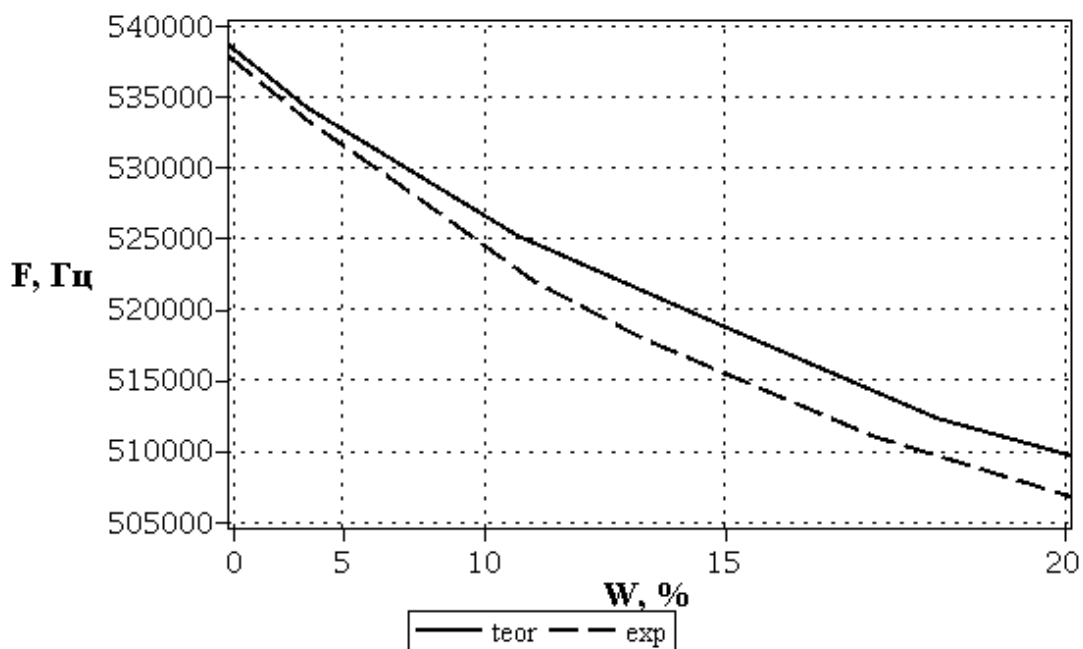


Рисунок 3.27 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами для нафти з туркменського родовища

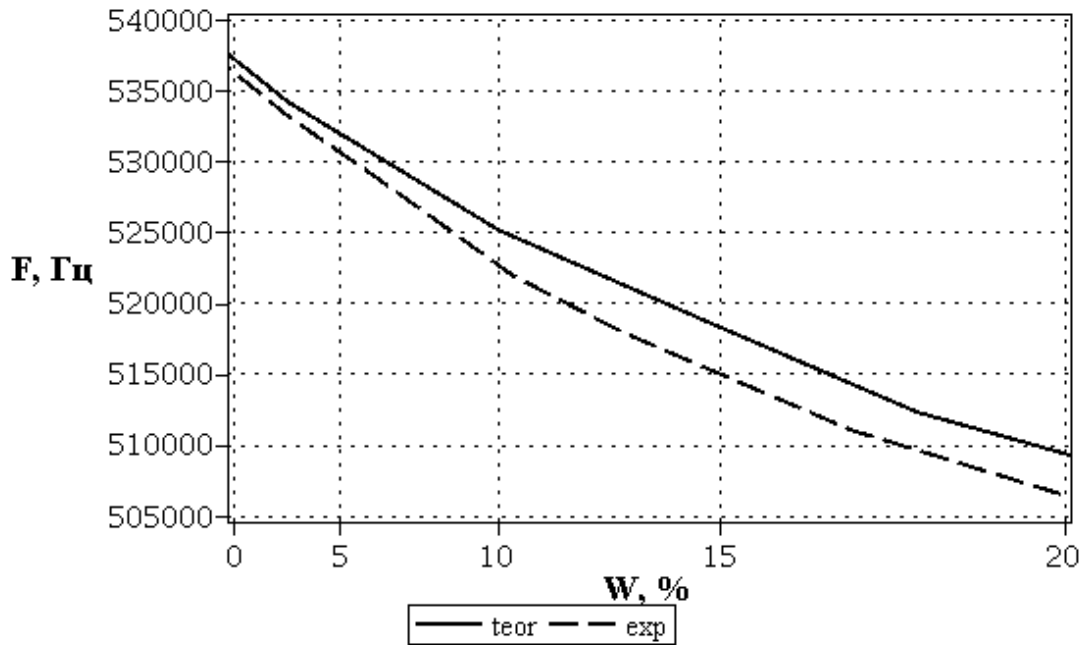


Рисунок 3.28 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами для нафти з Сургутського родовища

Як видно з рис. 3.24–3.28 функція перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами є нелінійною. Чутливість АВН в діапазоні зміни вологості нафтопродуктів від 0 до 20 % складає від 1,1 до 1,73 кГц/%.

З рис. 3.19–3.28 видно, що розбіжність теоретичних та експериментальних результатів для АВН є різною при різних значеннях вологості нафтопродуктів  $W$ , але не перевищує 2 %.

Залежність частоти генерації від вологості нафтопродуктів визначається по контуру зворотного струму згідно з еквівалентною схемою (рис. 3.12) на основі теорії стійкості Ляпунова.

Функція перетворення АВН на основі структури р-п-р біполярного і двозатворного польового транзисторів описується виразом (3.15)

$$F = \frac{\sqrt{2} \sqrt{LC_c C_i(W, T) \cdot \left( (R_{ds}^2 C_{ds} - L) \cdot C_c C_i(W, T) + R_{ds}^2 A_1 + \sqrt{A_2} \right)}}{4\pi LC_i(W, T) C_c R_{ds} C_{ds}}, \quad (3.15)$$

де  $A_1 = C_{ds}^2 (C_c + C_i(W, T))$ ;

$$\begin{aligned}
A_2 = & R_{ds}^4 C_{ds}^2 C_c^2 C_i^2(W, T) + 2R_{ds}^4 C_{ds}^3 C_c C_i(W, T)(C_c + C_i(W, T)) - \\
& - 2LR_{ds}^2 C_{ds}^2 C_c^2 C_i^2(W, T) + R_{ds}^4 C_{ds}^4 (C_c^2 + 2C_c + C_i^2(W, T)) + \\
& + 2LR_{ds}^2 C_{ds}^2 C_c C_i(W, T)(C_c + C_i(W, T)) + L^2 C_c^2 C_i^2(W, T).
\end{aligned}$$

На основі виразу (3.15) визначена чутливість АВН на основі структури р-п-р біполярного і двозатворного польового транзисторів:

$$\begin{aligned}
S_W^F = & \sqrt{2} \left( B_6 \frac{\partial C_i(W, T)}{\partial W} + LC_c C_i(W, T) \left( B_3 \frac{\partial C_i(W, T)}{\partial W} + \frac{B_4 \frac{\partial C_i(W, T)}{\partial W}}{B_2} \right) \right) \times \\
& \times \frac{1}{8 \cdot \left( B_5 \sqrt{LC_c C_i(W, T)(B_2 + B_1)} - \frac{\sqrt{2} \sqrt{B_6 C_i(W, T)} \frac{\partial C_i(W, T)}{\partial W}}{4B_5 C_i(W, T)} \right)},
\end{aligned} \tag{3.16}$$

$$\text{де } B_1 = R_{ds}^2 C_{ds}^2 (C_c + C_i(W, T)) + (C_c C_i(W, T))(R_{ds}^2 C_{ds} - L);$$

$$\begin{aligned}
B_2 = & \sqrt{R_{ds}^4 C_{ds}^2 C_c^2 C_i^2(W, T) + 2R_{ds}^4 C_{ds}^3 C_c C_i(W, T)(C_c + C_i(W, T)) - \\
& - 2LR_{ds}^2 C_{ds}^2 C_c^2 C_i^2(W, T) + R_{ds}^4 C_{ds}^4 (C_c^2 + 2C_c + C_i^2(W, T)) + \\
& + 2LR_{ds}^2 C_{ds}^2 C_c C_i(W, T)(C_c + C_i(W, T)) + L^2 C_c^2 C_i^2(W, T)};
\end{aligned}$$

$$B_3 = R_{ds}^2 C_{ds} C_c + R_{ds}^2 C_{ds}^2 - LC_c;$$

$$\begin{aligned}
B_4 = & R_{ds}^4 C_{ds}^2 C_c^2 (C_i(W, T) + C_{ds}) - 2LR_{ds}^2 C_{ds} C_c^2 C_i(W, T) + L^2 C_c^2 C_i(W, T) + \\
& + R_{ds}^2 C_{ds}^2 C_c (2C_i(W, T)(R_{ds}^2 C_{ds} + L) + LC_c) + R_{ds}^4 C_{ds}^4 (C_i(W, T) + C_c);
\end{aligned}$$

$$B_5 = \pi LR_{ds} C_{ds} C_c C_i(W, T);$$

$$B_6 = LC_c (B_2 + B_1).$$

Графік залежності чутливості від ємності вологочувливих КЦС показаний на рис. 3.29, а від вологості нафти з туркменського родовища з КЦС із циліндричними електродами – на рис. 3.30.

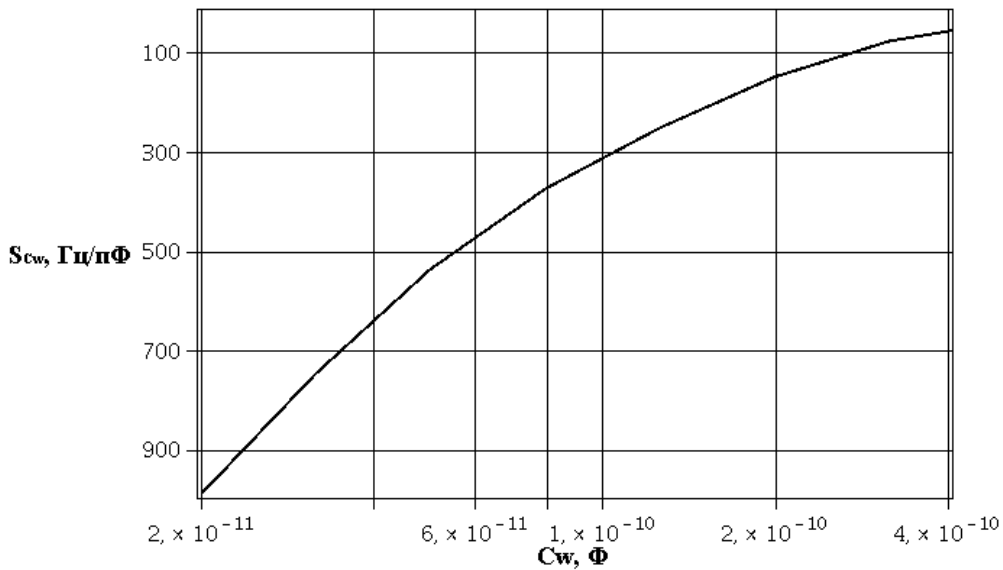


Рисунок 3.29 – Залежність чутливості АВН від зміни ємності вологочувливих КЦС

З рис. 3.30 видно, що зі зміною вологості нафти з туркменського родовища від 0 до 20 % чутливість змінюється від 1202 до 1720 Гц/%. На рис. 3.31 показано результати моделювання зміни нормованої чутливості  $S_H$  [116] від ємності вологочувливої КЦС. Ця безрозмірна величина дозволяє визначити діапазон зміни вологочувливої ємності, при якому використання АВН є найбільш ефективним, тобто досягається найбільше значення чутливості.

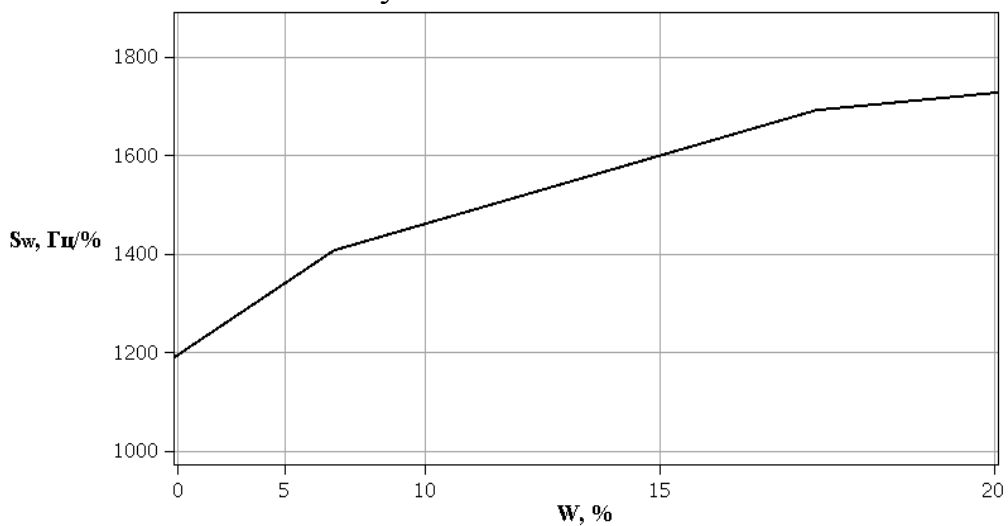


Рисунок 3.30 – Залежність чутливості АВН від зміни вологості нафти з туркменського родовища з КЦС із циліндричними електродами

Також за допомогою нормованої чутливості можна провести порівняння значень чутливості існуючих приладів вологості нафтопродуктів з розробленими із різними одиницями вимірювання (кГц/%, мВ/%, пФ/% тощо).

$$S_H = \frac{\Delta F \cdot C_w(W, T)}{\Delta C_w \cdot F_H}, \quad (3.17)$$

де  $F_H$  – нормована частота;  $\Delta C_w$  – мінімальна зміна  $C_w(W, T)$ ;  $\Delta F$  – зміна частоти при мінімальній зміні  $C_w(W, T)$ .

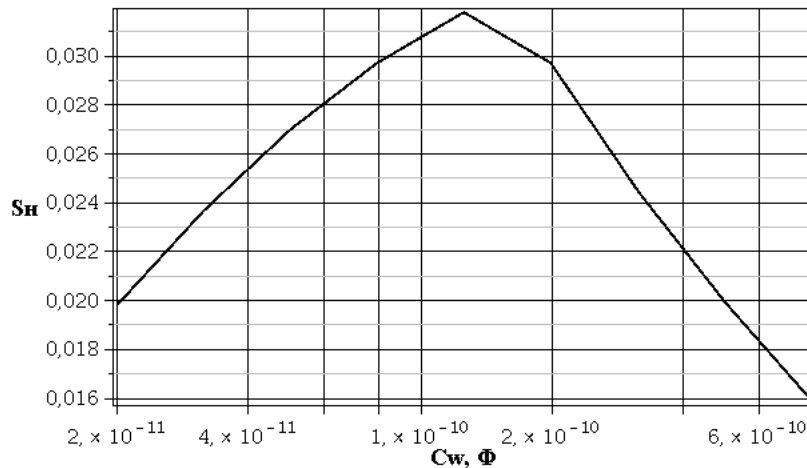


Рисунок 3.31 – Залежність нормованої чутливості АВН від ємності вологочутливої КЦС

Нормована частота  $F_H = 1$  МГц. З рис. 3.31 видно, що найбільше значення нормованої чутливості спостерігається в діапазоні від 60 до 250 пФ, що є оптимальним режимом роботи АВН. Отже, для досягнення більшої чутливості в схемі АВН краще використовувати КЦС з циліндричними електродами.

### 3.3 Дослідження характеристик автогенераторного засобу контролю вологості нафтопродуктів на основі структури n-p-n біполярного і двозатворного польового транзисторів

Для досягнення більших значень чутливості, ніж у схемі рис. 3.11, запропоновано електричну схему АВН [117] на (рис. 3.32), в якому при дії вологи на вологочутливу КЦС  $C_w(W, T)$  змінюється ємнісна складова повного опору на електродах емітер–перший затвор транзисторів  $VT1$  та  $VT2$ , що викликає ефективну зміну частоти коливального контуру. Для вибору оптимального режиму роботи АВН в схемі використовується два джерела живлення постійної напруги  $U_1$  та  $U_2$ , але

для зменшення собівартості АВН в подальшому буде використано лише одне джерело живлення.

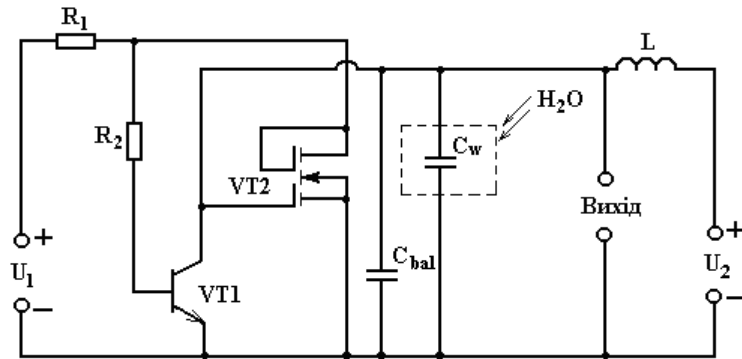


Рисунок 3.32 – Електрична схема АВН

Для визначення функції перетворення та чутливості на рис. 3.33 показано еквівалентну схему АВН, яка реалізує залежність частоти генерації від зміни вологості нафтопродуктів.

Для зручності розрахунків, об'єднавши паралельні ємності  $C_w(W, T)$  і  $C_{bal}$  у  $C_i(W, T) = C_w(W, T) + C_{bal}$ , та струми  $I_f$  і  $I_r$  у  $I_{bt} = (I_f - I_r) / QB$ , а також скориставшись методом змінних стану, на рис. 3.34 покажемо перетворену еквівалентну схему АВН.

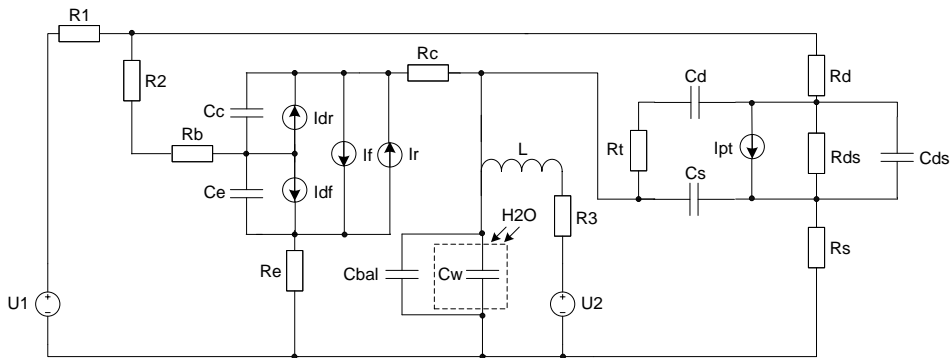


Рисунок 3.33 – Еквівалентна схема АВН [118]

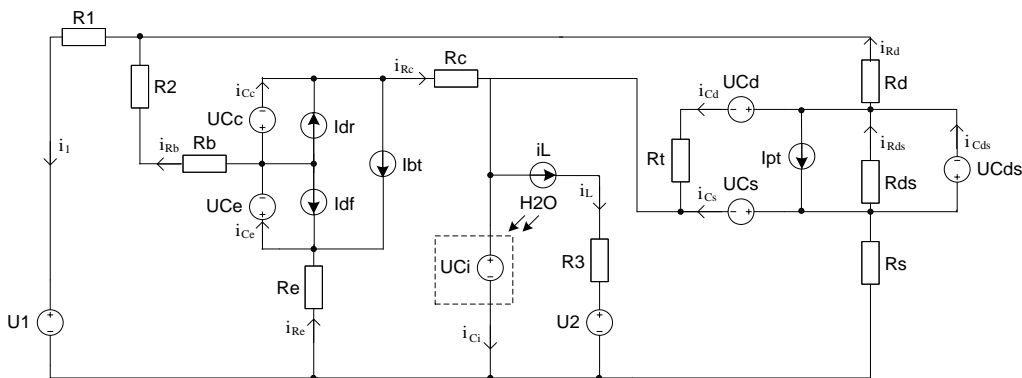


Рисунок 3.34 – Перетворена еквівалентна схема АВН [118]

На основі вибраних напрямків струмів було складено систему рівнянь Кірхгофа [53]:

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di_L(t)}{dt} = U_{C_i}(W, t) - (U_2 + i_L(t)R_3); \\ C_d \frac{dU_{C_d}(t)}{dt} = \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_d}(t)}{R_g}; \\ C_{ds} \frac{dU_{C_{ds}}(t)}{dt} = A_9 + \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_i}(W, t)}{R_d} + A_{11}; \\ C_s \frac{dU_{C_s}(t)}{dt} = -A_4 - A_9 + \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_d}(t)}{R_g}; \\ C_i \frac{dU_{C_i}(W, t)}{dt} = -i_L + A_8 + A_4 - A_9 + 2 \left( \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_d}(t)}{R_g} \right); \\ C_c \frac{dU_{C_c}(t)}{dt} = A_8 + I_{bt} - I_{dr}; \\ C_e \frac{dU_{C_e}(t)}{dt} = \frac{A_3 + R_e A_7 R_1}{A_2} + I_{bt} + I_{df} - A_{12}, \end{array} \right. \quad (3.18)$$

де  $R_1, R_2, R_3$  – навантажувальні опори;  $R_b, R_e, R_c, R_g, R_d, R_s$  – об'ємні опори бази, емітера, колектора, затвору, стоку та виток;  $R_{ds}$  – опір стік–витік;  $C_e, C_c$  – ємності емітерного та колекторного переходів;  $C_d, C_s, C_{ds}$  – ємності затвор–стік, затвор–витік та стік–витік;  $C_{bal}$  – баластна ємність;  $C_w(W, T)$  – ємність вологочутливої КЦС;  $L$  – індуктивність;  $U_1, U_2$  – джерела живлення постійної напруги;  $I_{pt}$  – струм польового транзистора;  $I_{dr}, I_{df}$  – струми внутрішніх переходів база–колектор та база–емітер;  $I_f, I_r$  – прямий та зворотній струми біполярного транзистора;

$$A_1 = R_e + R_b + R_2; \quad A_2 = R_c (R_e + R_b + R_2) + R_e (R_b + R_2);$$

$$A_3 = A_1 (-U_{C_i}(W) - U_{C_c}) - U_{C_e} (R_b + R_2) + R_e U_1;$$

$$A_4 = 2I_{pt} - 2 \frac{U_{C_{ds}}}{R_{ds}} + \frac{-U_{C_i}(W) - U_{C_s}}{R_s};$$

$$\begin{aligned}
A_5 &= (R_b + R_2)(U_{C_e} A_2 + R_e A_3) + R_c A_1 A_3 + \\
&+ A_2 \cdot (U_1 (R_b + R_2 - A_1) + A_1 (U_{C_c} - U_{C_{ds}} - U_{C_s})); \\
A_6 &= R_1 (A_2 A_1 + (-R_e^2 - A_2) \cdot (R_b + R_2) - R_e R_c A_1); \quad A_7 = \frac{A_5}{A_6}; \\
A_8 &= \frac{A_1 (-U_{C_i} (W) - U_{C_c}) - U_{C_e} (R_b + R_2) + R_e (U_1 + A_7 R_1)}{A_2}; \\
A_9 &= \frac{A_3 + R_e A_7 R_1}{A_2}; \\
A_{10} &= \frac{U_{C_s} - U_{C_{ds}} - U_{C_c} - A_9 R_c}{R_d} - \frac{U_1 + U_{C_e} + R_e A_9 + A_7 R_1}{A_1 R_d} (R_b + R_2); \\
A_{11} &= \frac{U_{C_s} (t) - U_{C_{ds}} (t) - U_{C_d} (t)}{R_g} - \frac{U_{C_{ds}} (t)}{R_{ds}} + I_{pt}; \\
A_{12} &= \frac{U_1 + U_{C_e} (t) + R_e \frac{A_3 + R_e A_7 R_1}{A_2} + A_7 R_1}{A_1}.
\end{aligned}$$

Система рівнянь (3.18) є нелінійною, оскільки містить в собі нелінійні елементи, а саме джерела струмів  $I_{pt}$ ,  $I_{dr}$ ,  $I_{df}$ ,  $I_{bt} = (I_f - I_r) / QB$  та ємності  $C_c$ ,  $C_e$  значення яких описані в підрозділі 3.2 у виразах (3.4) – (3.14).

Система рівнянь (3.18) є динамічною математичною моделлю АВН, яка дозволяє визначити значення напруги та струму в будь-якій точці схеми в заданий момент часу [118].

Для перевірки адекватності розробленої моделі написано програму для розрахунку параметрів схеми в середовищі *Maple*. Розрахунок показує, що на виході АВН дійсно будуть існувати періодичні коливання, частота яких буде змінюватись зі зміною ємності КЦС (рис. 3.35). Так, при  $C_w(W, T) = 50$  пФ частота  $F = 1290$  кГц, при  $C_w(W, T) = 75$  пФ частота  $F = 1252$  кГц, при  $C_w(W, T) = 100$  пФ частота  $F = 1203$  кГц, при  $C_w(W, T) = 120$  пФ частота  $F = 1181$  кГц, а при  $C_w(W, T) = 140$  пФ частота  $F = 1150$  кГц, при цьому  $U_1 = U_2 = 1,25$  В.



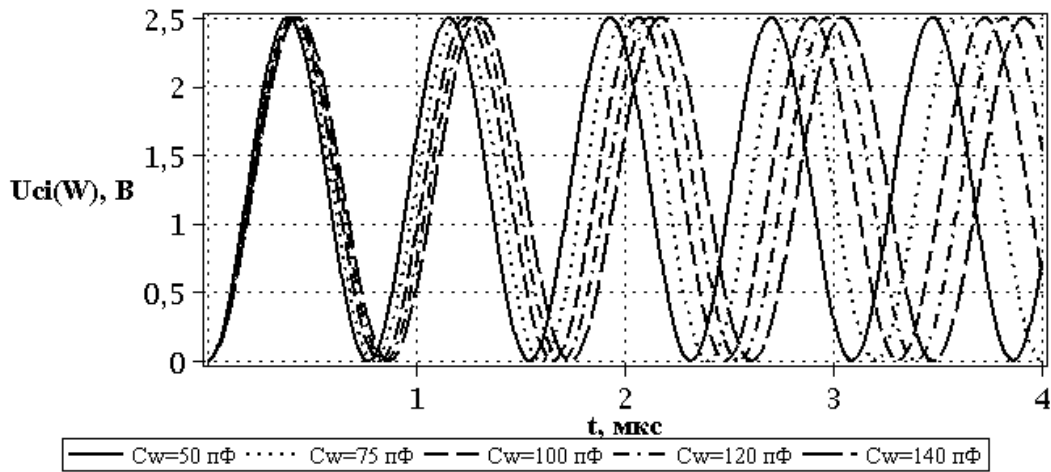


Рисунок 3.35 – Зміна напруги вихідного сигналу від часу при різних значеннях ємності вологочутливої КЦС

На рис. 3.36 показано зміну напруги вихідного сигналу від часу при різних значеннях вологості нафти з туркменського родовища при використанні КЦС із циліндричними електродами. З характеристики добре видно, що при збільшенні вологості частота вихідного сигналу буде зменшуватись.

Знаючи значення частоти вихідного сигналу  $F$  при різних значеннях вологочутливої ємності  $C_w(W, T)$  КЦС, можна отримати функцію перетворення для АВН в загальному вигляді (оскільки замість значень вологості в ній використовуються значення ємності вологочутливих КЦС), при  $U_1 = U_2 = 1,25$  В.

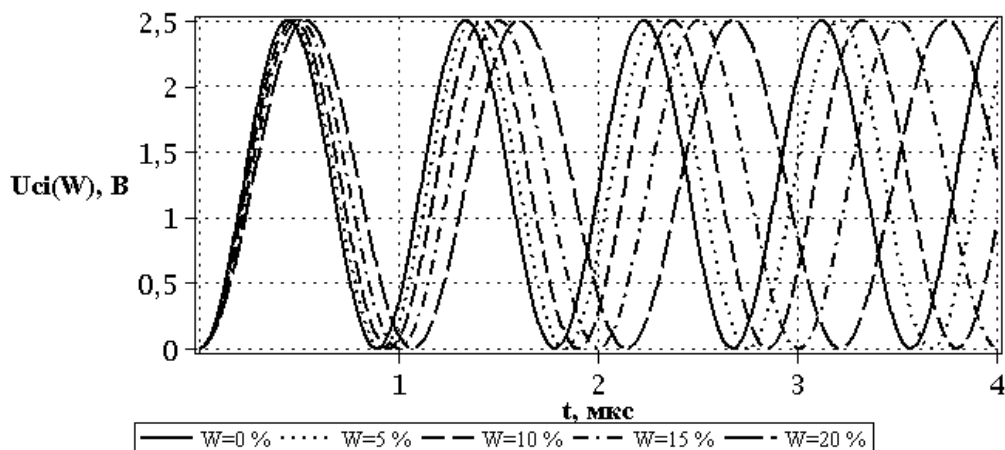


Рисунок 3.36 – Зміна напруги вихідного сигналу від часу при різних значеннях вологості нафти з туркменського родовища

Так, на рис. 3.37 наведено функцію перетворення АВН в загальному вигляді з використанням у якості вологочутливого елемента КЦС з

сіткоподібними електродами, а на рис. 3.38 – з циліндричними електродами, при різних значеннях індуктивності  $L$ .

Для проведення експериментальних досліджень у схемі, що зображена на рис. 3.32, було використано транзистори *BF240* та *BF998*, в якості вологочутливого елемента було використано почергово КЦС: з сіткоподібними [97] та з циліндричними електродами [96].

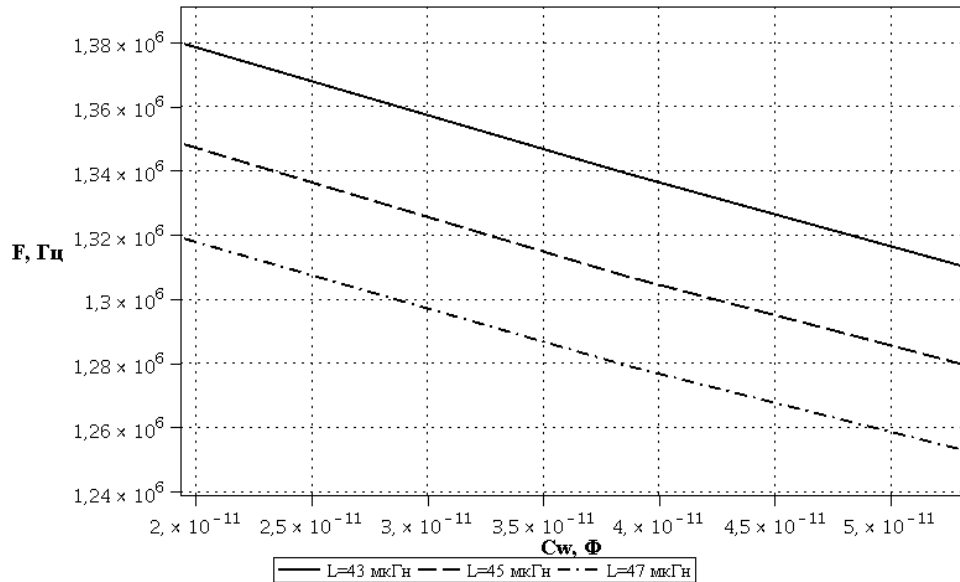


Рисунок 3.37 – Теоретична функція перетворення в загальному вигляді з використанням КЦС з сіткоподібними електродами

На рис. 3.39 для доведення існування ділянки від'ємного опору зображено експериментальні ВАХ досліджуваного АВН. З характеристик видно присутність ділянки від'ємного опору.

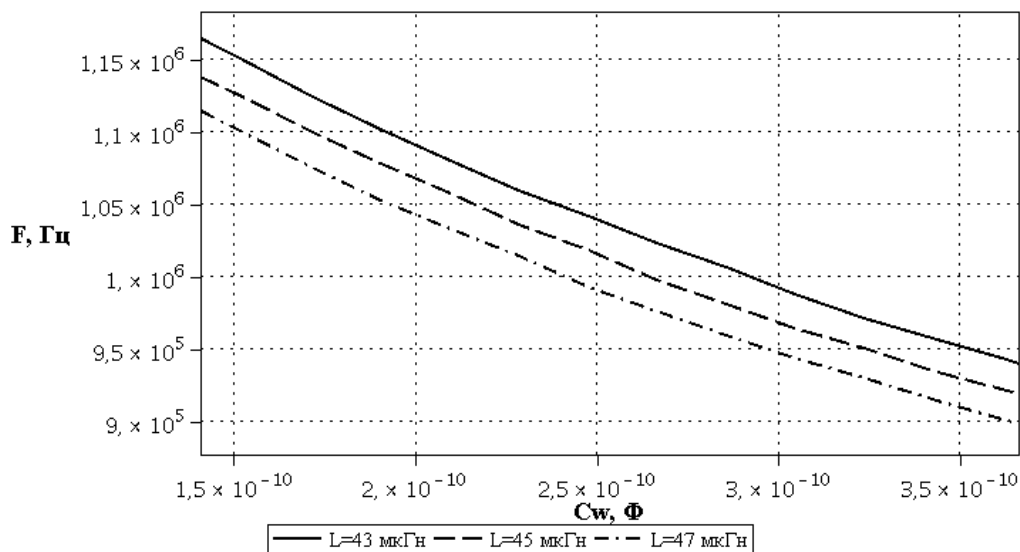


Рисунок 3.38 – Теоретична функція перетворення в загальному вигляді з використанням КЦС з циліндричними електродами

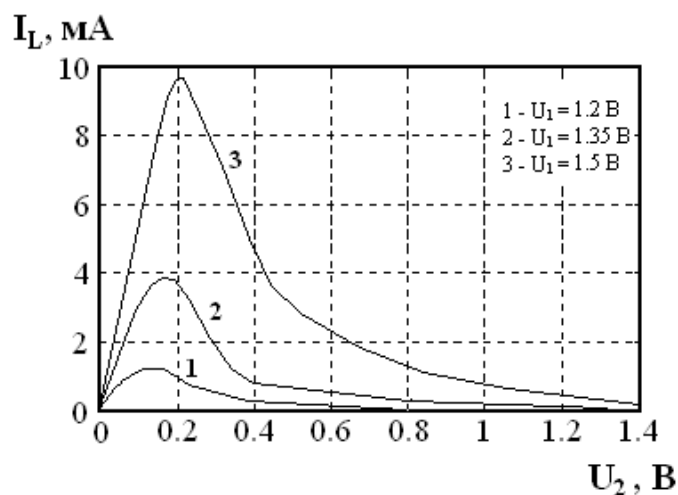


Рисунок 3.39 – Експериментальні ВАХ АВН

З рис. 3.39 видно, що при збільшенні напруги керування  $U_1$  збільшується ділянка від'ємного опору. Так, при  $U_1 = 1,2$  В ділянка від'ємного опору по  $U_2$  лежить від 0,15 до 0,75 В, при  $U_1 = 1,35$  В – від 0,18 до 1,3 В, а при  $U_1 = 1,5$  В вона становить від 0,21 до 1,45 В.

Для більшого розуміння на рис. 3.40–3.44 наведено функції перетворення АВН для різних нафтопродуктів з використанням в якості вологочутливого елемента КЦС з сіткоподібними електродами та на рис. 3.45–3.49 – з циліндричними електродами. Для зменшення собівартості АВН було використано лише одне джерело живлення, тобто  $U_1 = U_2 = 1,25$  В.

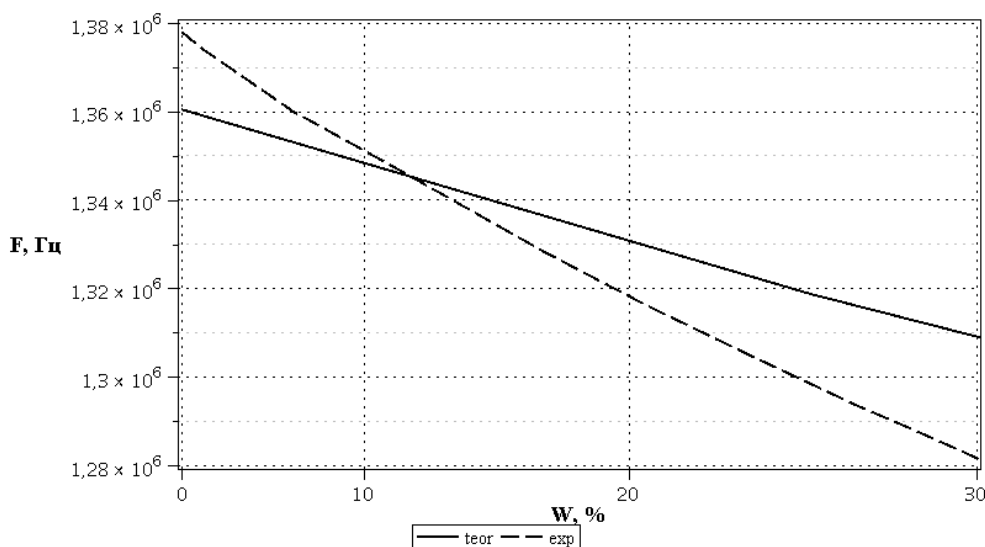


Рисунок 3.40 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із сіткоподібними електродами для напівсинтетичного моторного масла 5W40

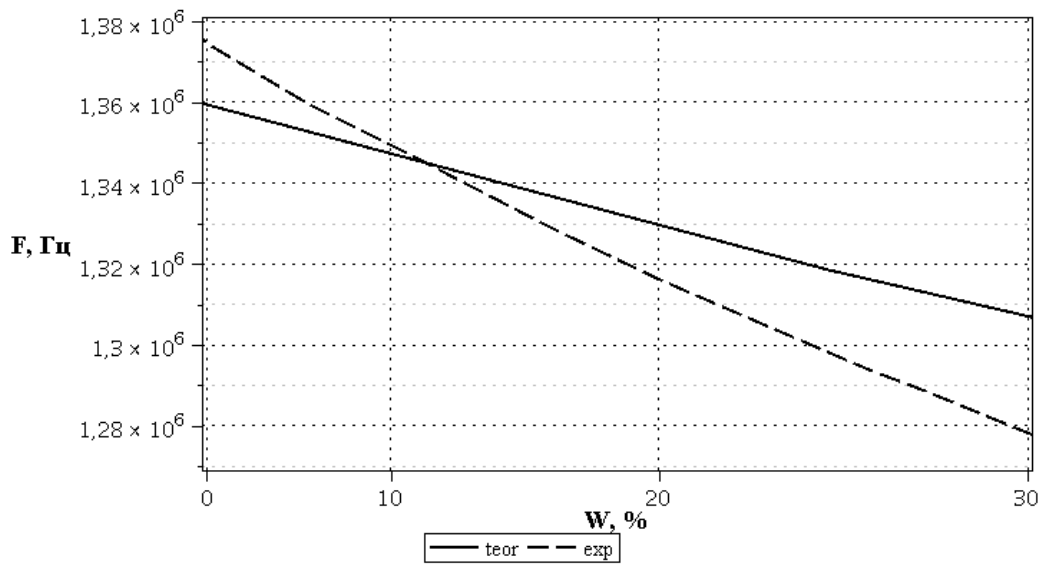


Рисунок 3.41 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із сіткоподібними електродами для мінерального моторного масла М8В

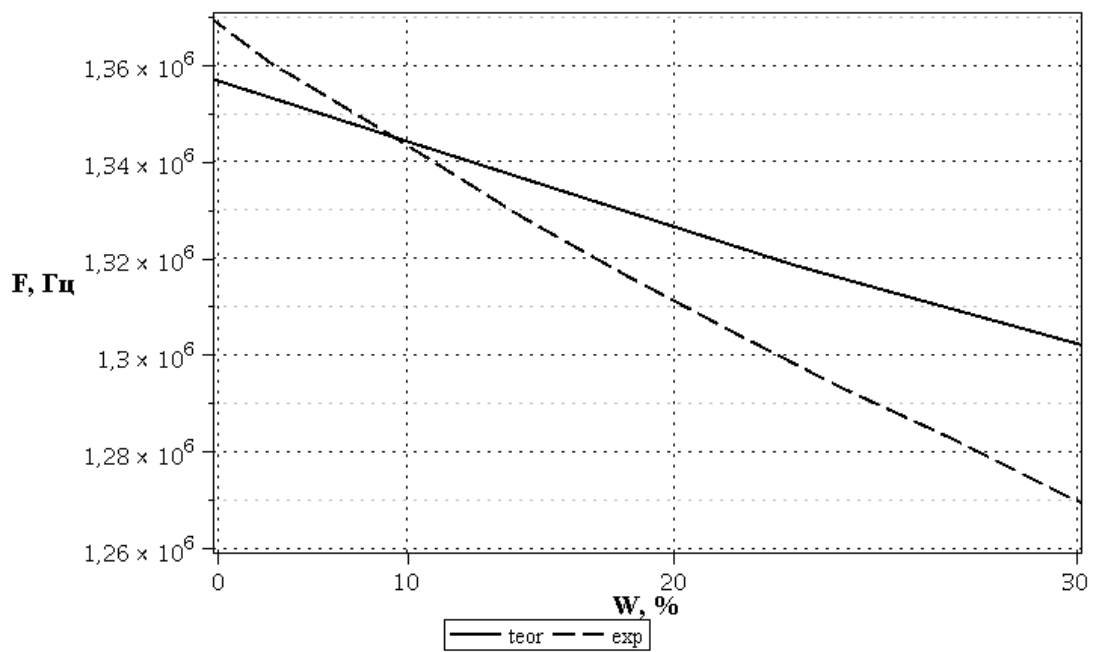


Рисунок 3.42 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із сіткоподібними електродами для трансформаторного масла Т-1500

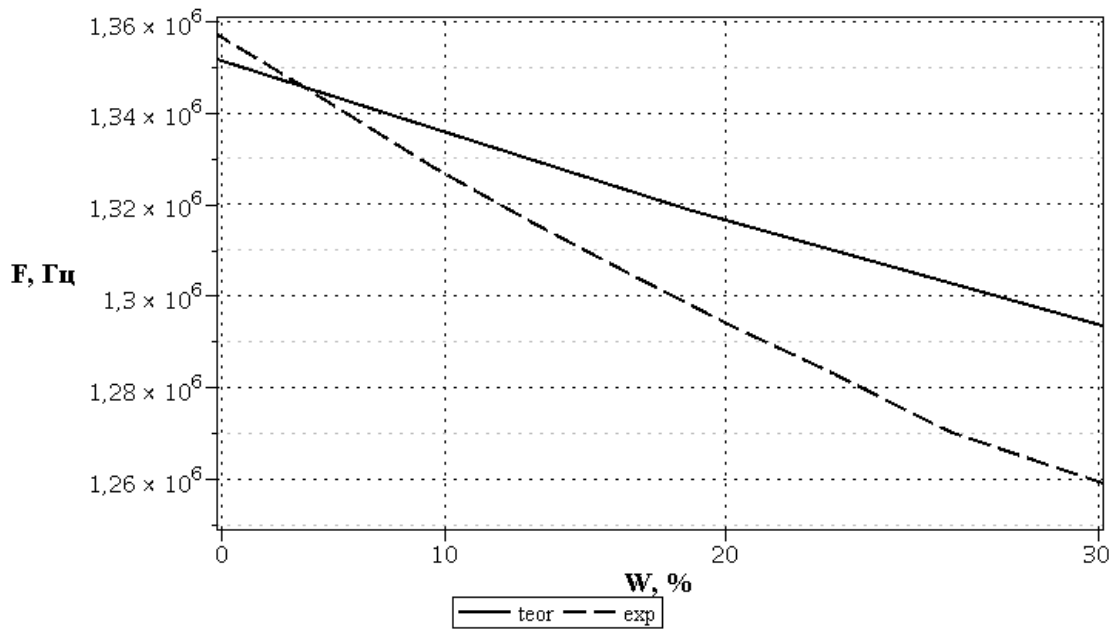


Рисунок 3.43 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із сіткоподібними електродами для нафти з туркменського родовища

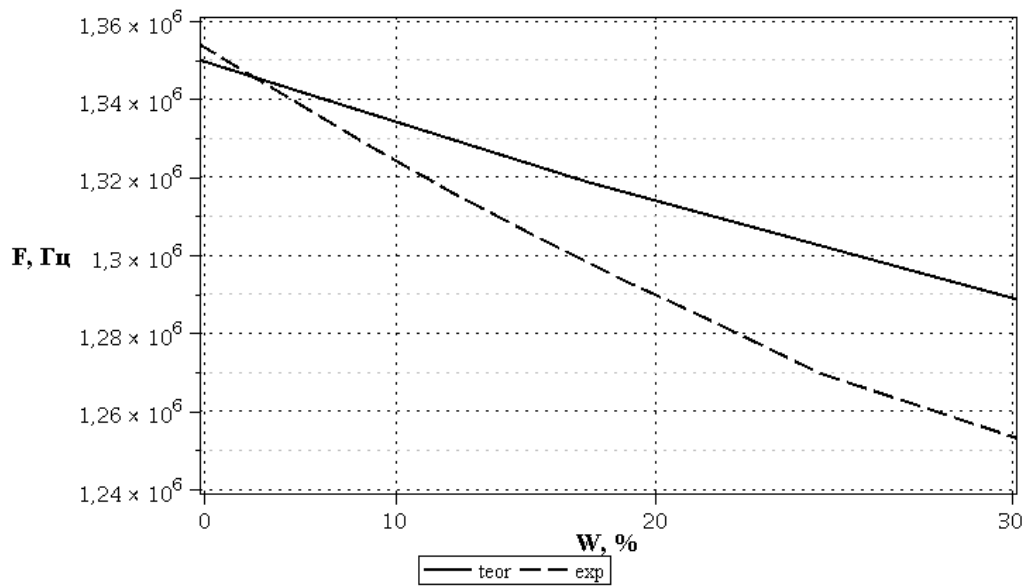


Рисунок 3.44 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із сіткоподібними електродами для нафти з Сургутського родовища

Як видно з рис. 3.40–3.44, функція перетворення АВН є нелінійною. Чутливість АВН з КЦС із сіткоподібними електродами в діапа-

зоні зміни вологості нафтопродуктів від 0 до 30 % складає від 2,6 до 4,2 кГц/ %.

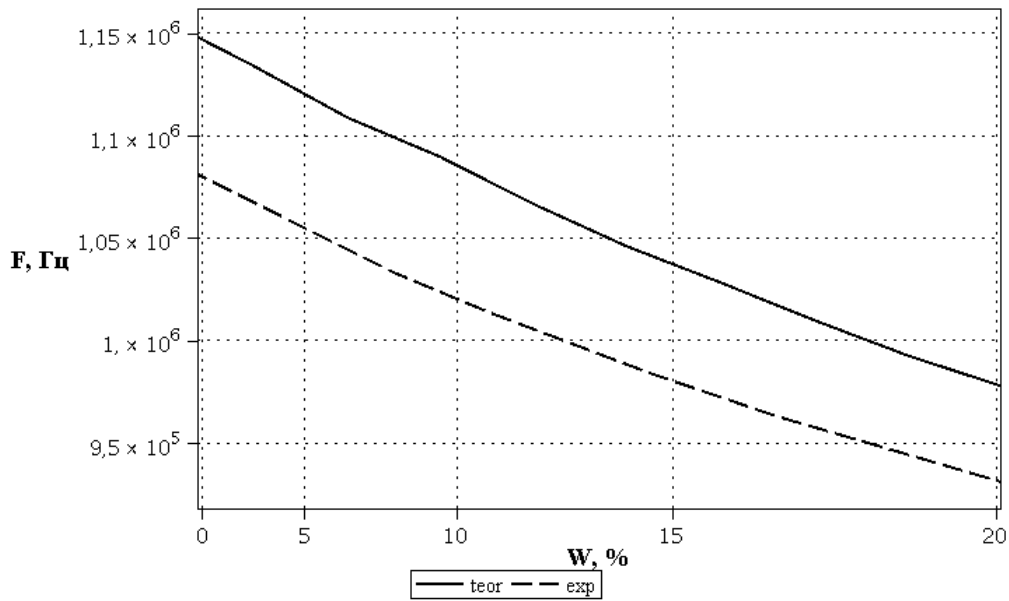


Рисунок 3.45 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами для напівсинтетичного моторного масла 5W40

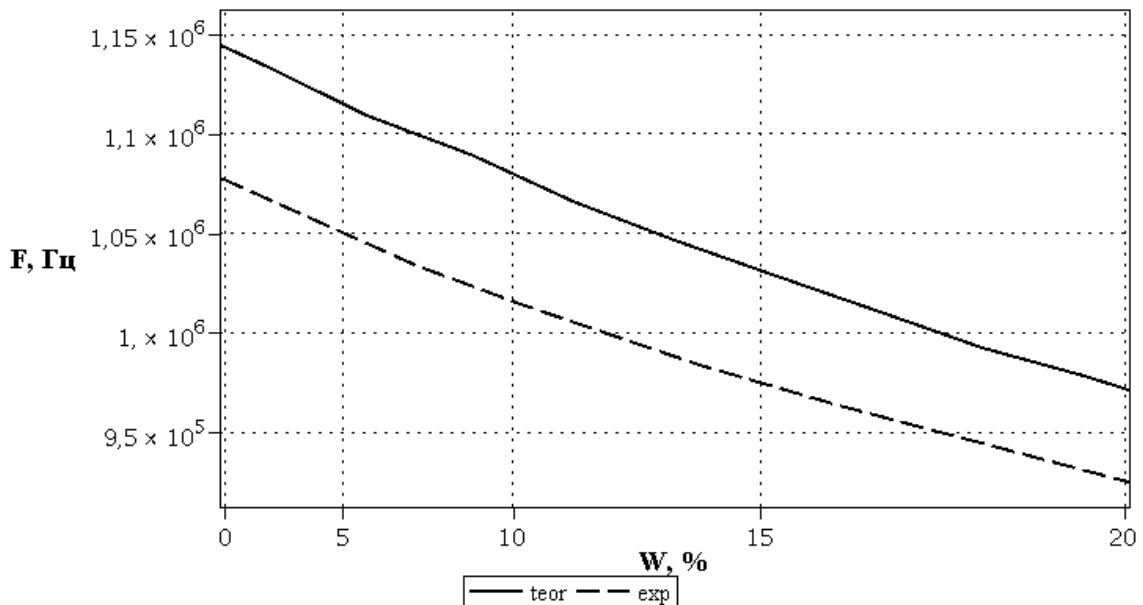


Рисунок 3.46 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами для мінерального моторного масла M8V

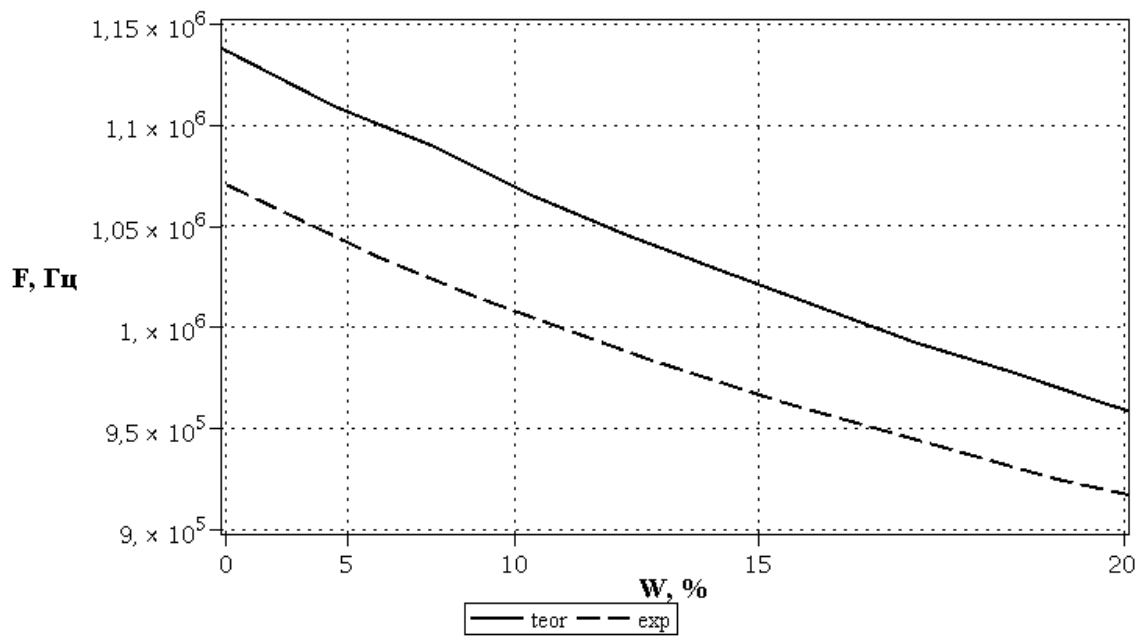


Рисунок 3.47 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами для трансформаторного масла Т-1500

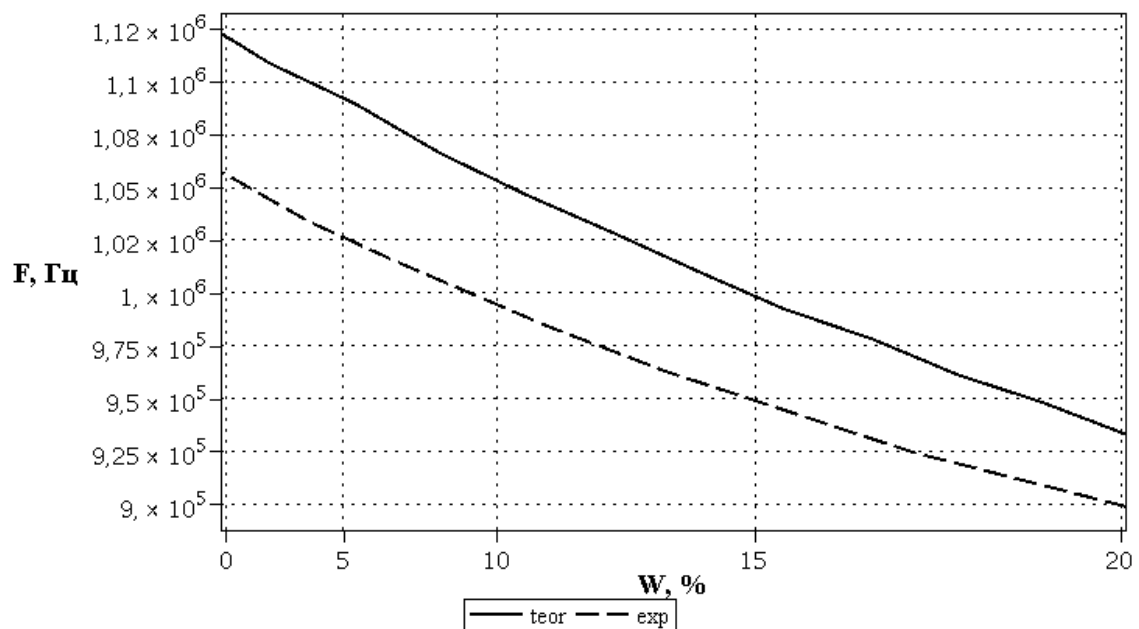


Рисунок 3.48 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами для нафти з туркменського родовища

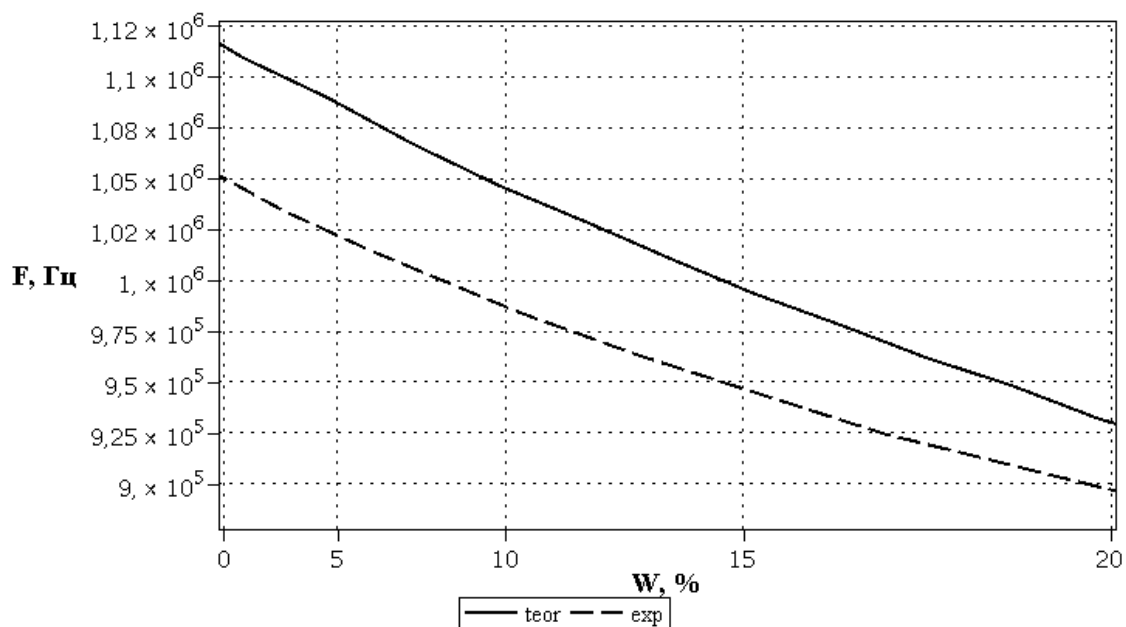


Рисунок 3.49 – Теоретична та експериментальна функція перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами для нафти з Сургутського родовища

Як видно з рис. 3.45–3.49, функція перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами є нелінійною. Чутливість АВН в діапазоні зміни вологості нафтопродуктів від 0 до 20 % складає від 6 до 10,9 кГц/%.

З рис. 3.40–3.49 бачимо, що розбіжність теоретичних та експериментальних результатів для АВН є різною при різних значеннях вологості нафтопродуктів  $W$ , але не перевищує 5 %.

Залежність частоти генерації від вологості нафтопродуктів визначається по контуру зворотного струму згідно з еквівалентною схемою (рис. 3.33) на основі теорії стійкості Ляпунова.

Функція перетворення АВН на основі структури n-p-n біполярного і двозатворного польового транзисторів описується виразом (3.19)

$$F = \frac{\sqrt{LC_c C_e C_i(W, T)(C_c C_e + C_c C_i(W, T) + C_e C_i(W, T))}}{2\pi LC_c C_e C_i(W, T)}. \quad (3.19)$$

На основі виразу (3.19) визначена чутливість АВН на основі структури n-p-n біполярного і двозатворного польового транзисторів:



$$S_W^F = \frac{LB_1 \frac{\partial C_i(W,T)}{\partial W} + LC_e C_c C_i(W,T)(C_c + C_e) \frac{\partial C_i(W,T)}{\partial W}}{4 \cdot \left( \pi LB_2 C_c C_e C_i(W,T) - \frac{B_2 \frac{\partial C_i(W,T)}{\partial W}}{2\pi LC_c C_e C_i^2(W,T)} \right)}, \quad (3.20)$$

де  $B_1 = C_c C_e (C_c C_e + C_c C_i(W,T) + C_e C_i(W,T))$ ;

$$B_2 = \sqrt{LC_c C_e C_i(W,T)(C_c C_e + C_c C_i(W,T) + C_e C_i(W,T))}.$$

Графік залежності чутливості від ємності вологочутливих КЦС показаний на рис. 3.50, а від вологості нафти з туркменського родовища з КЦС із циліндричними електродами – на рис. 3.51.

З рис. 3.51 видно, що зі зміною вологості нафти з туркменського родовища від 0 до 20 %, чутливість змінюється від 6050 до 10800 Гц/°.

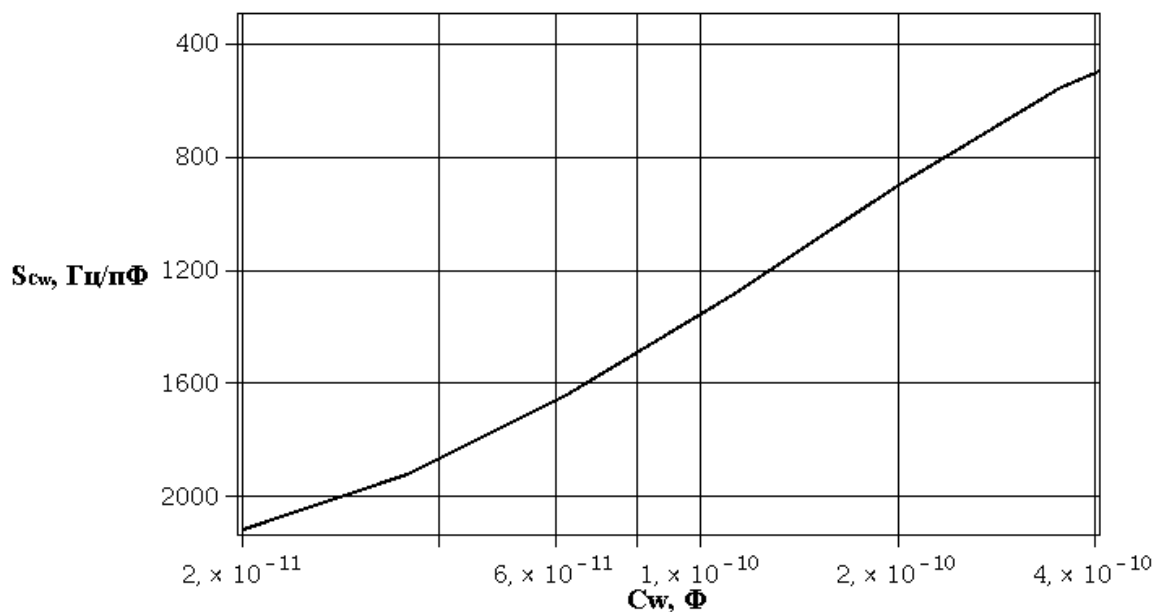


Рисунок 3.50 – Залежність чутливості АВН від зміни ємності вологочутливих КЦС

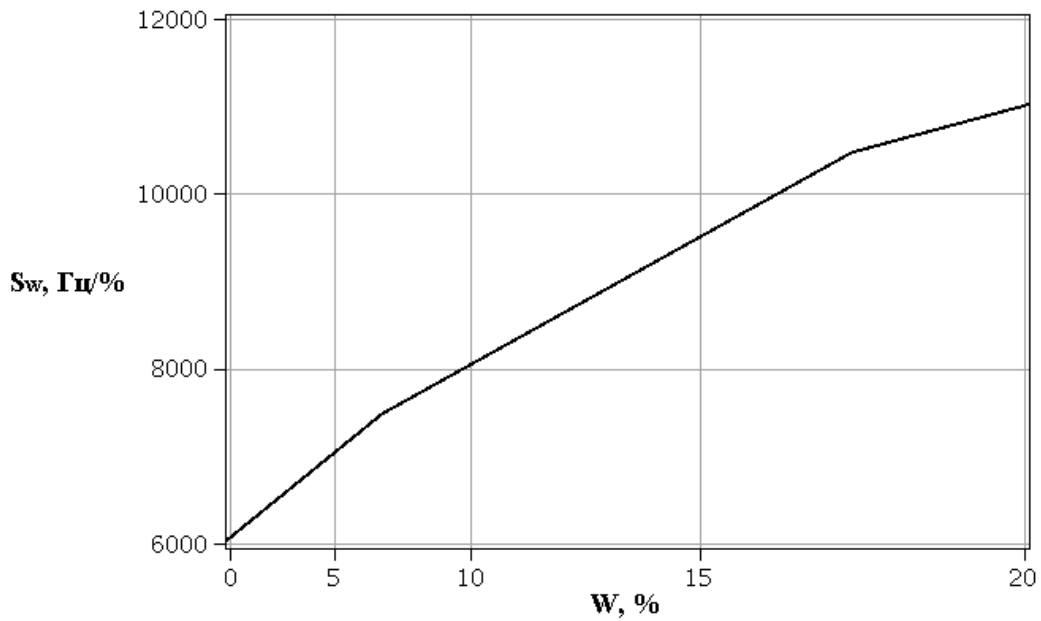


Рисунок 3.51 – Залежність чутливості АВН від зміни вологості нафти з туркменського родовища з КЦС із циліндричними електродами

На рис. 3.52 показано результати моделювання зміни нормованої чутливості  $S_H$  [116] від ємності вологочутливої КЦС, що розрахована на основі виразу (3.17).

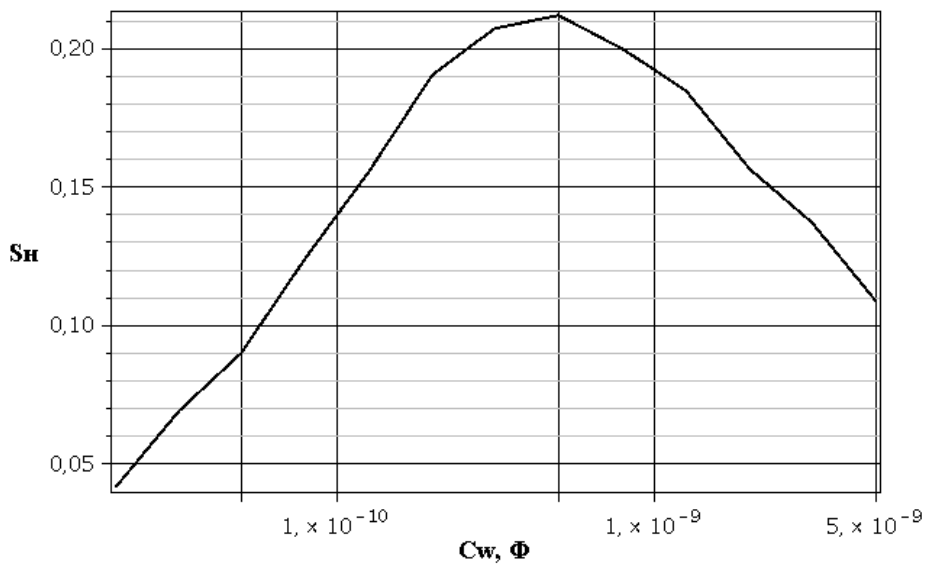


Рисунок 3.52 – Залежність нормованої чутливості АВН від ємності вологочутливої КЦС [118]

Нормована частота  $F_H = 1$  МГц. З рис. 3.52 видно, що найбільше значення нормованої чутливості спостерігається в діапазоні від 140 до

1150 пФ, що є оптимальним режимом роботи АВН. Отже, для досягнення більшої чутливості в схемі АВН краще використовувати КЦС з циліндричними електродами.

### 3.4 Дослідження характеристик автогенераторного засобу контролю вологості нафтопродуктів на основі структури біполярного і польового транзисторів

Для досягнення більших значень чутливості, ніж у АВН, що зображені на рис. 3.11 та рис. 3.32 було запропоновано електричну схему АВН (рис. 3.53), в якому при дії вологи на вологочутливу конденсаторну циліндричну структуру  $C_w(W, T)$  змінюється ємнісна складова повного опору на електродах колектор–стік транзисторів  $VT1$  та  $VT2$ , що викликає ефективну зміну частоти коливального контуру [119]. Для вибору оптимального режиму роботи АВН в схемі використовується два джерела живлення постійної напруги  $U_1$  та  $U_2$ , але для зменшення собівартості АВН в подальшому буде використано лише одне джерело живлення.

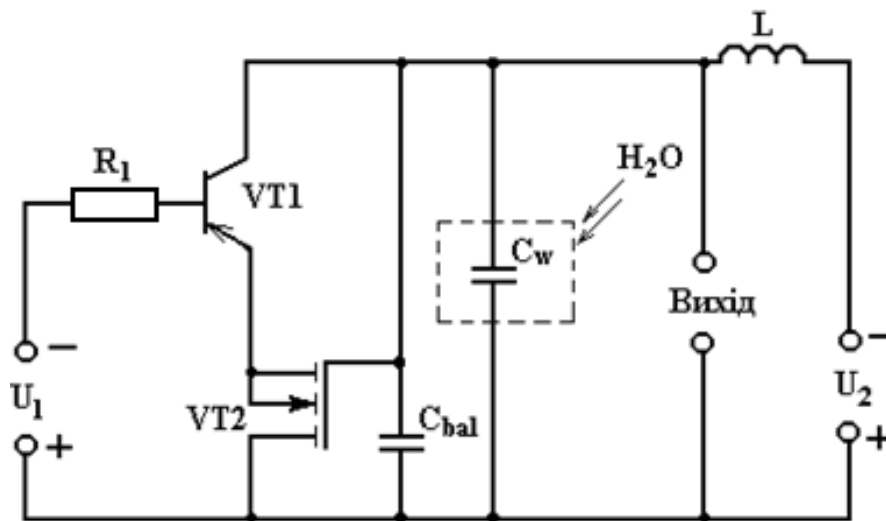


Рисунок 3.53 – Електрична схема АВН [120]

Для визначення функції перетворення та чутливості на рис. 3.54 показано еквівалентну схему АВН, яка реалізує залежність частоти генерації від зміни вологості нафтопродуктів.

Для зручності розрахунків об'єднавши паралельні ємності  $C_w(W, T)$  і  $C_{bal}$  у  $C_i(W, T) = C_w(W, T) + C_{bal}$ , та струми  $I_f$  і  $I_r$  у  $I_{bt} = (I_f - I_r) / QB$ , а також скориставшись методом змінних стану, на рис. 3.55 показано перетворену еквівалентну схему АВН.

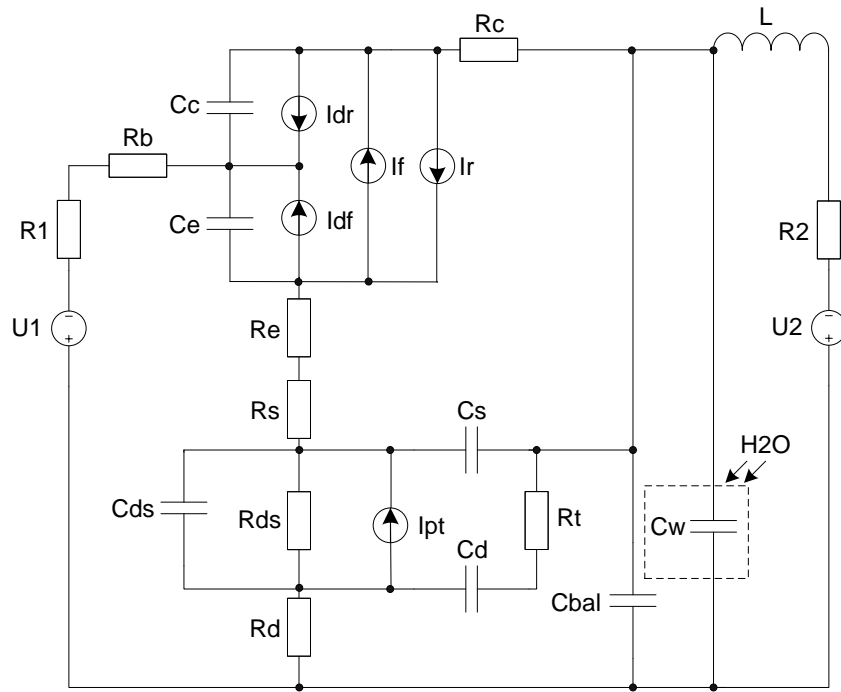


Рисунок 3.54 – Еквівалентна схема АВН [119]

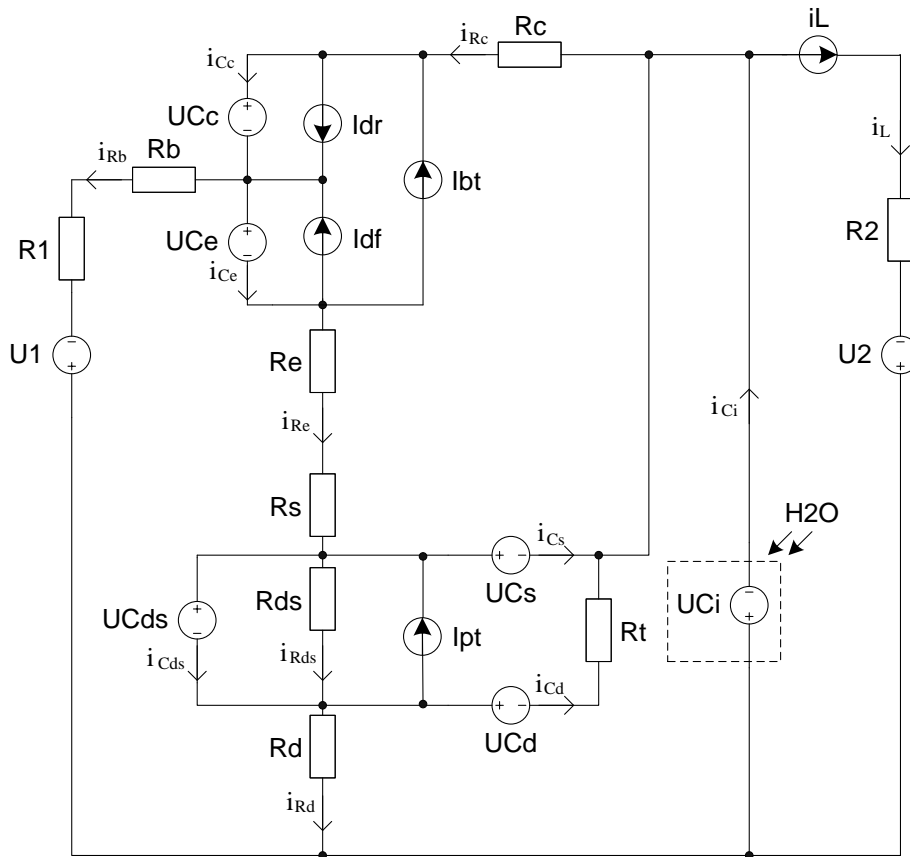


Рисунок 3.55 – Перетворена еквівалентна схема АВН [119]

На основі вибраних напрямків струмів було складено систему рівнянь Кірхгофа (3.21) [119].

Система рівнянь (3.21) є нелінійною, оскільки містить в собі нелінійні елементи, а саме джерела струмів  $I_{pt}$ ,  $I_{dr}$ ,  $I_{df}$ ,  $I_{bt} = (I_f - I_r) / QB$  та ємності  $C_c$ ,  $C_e$ .

Система рівнянь (3.21) є динамічною математичною моделлю АВН, яка дозволяє визначити значення напруги або струму в будь-якій точці схеми в заданий момент часу [119].

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di_L(t)}{dt} = U_2 - (U_{C_i}(W, t) + i_L(t) \cdot R_2); \\ C_d \frac{dU_{C_d}(t)}{dt} = \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_d}(t)}{R_t}; \\ C_{ds} \frac{dU_{C_{ds}}(t)}{dt} = A_7 - \frac{U_{C_{ds}}(t)}{R_{ds}} + I_{pt} + \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_d}(t)}{R_t}; \\ C_s \frac{dU_{C_s}(t)}{dt} = -A_7 - \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_d}(t)}{R_t} - A_6 - A_5; \\ C_i \frac{dU_{C_i}(W, t)}{dt} = i_L(t) + 2A_5 + A_6 + A_7; \\ C_c \frac{dU_{C_c}(t)}{dt} = A_5 + I_{bt} - I_{dr}; \\ C_e \frac{dU_{C_e}(t)}{dt} = A_5 - A_6 + I_{bt} + I_{df}. \end{array} \right. \quad (3.21)$$

де  $R_1$  – навантажувальний опір;  $R_b, R_e, R_c, R_d, R_s$  – об’ємні опори бази, емітера, колектора, стоку та витоку;  $R_{ds}$  – опір стік–витік;  $C_e, C_c$  – ємності емітерного та колекторного переходів;  $C_d, C_s, C_{ds}$  – ємності затвор–стік, затвор–витік та стік–витік;  $C_{bal}$  – баластна ємність;  $C_w(W, T)$  – ємність вологочутливої КЦС;  $L$  – індуктивність;  $U_1, U_2$  – джерела живлення постійної напруги;  $I_{pt}$  – струм польового транзистора;  $I_{dr}, I_{df}$  – струми внутрішніх переходів база–колектор та база–емітер;  $I_f, I_r$  – прямий та зворотній струми біполярного транзистора;  $A_1 = R_b + R_1$ ;  $A_2 = R_e + R_t$ ;  $A_3 = A_2 A_1 + R_c (A_2 + A_1)$ ;

$$A_4 = A_1(U_{C_c} + U_{C_e} + U_{C_s}) + A_2(U_{C_c} - U_2 + U_{C_i}(W)); \quad A_5 = \frac{A_4}{A_3};$$

$$A_6 = \frac{U_1 - U_{C_c}(t) - U_{C_i}(W, t) + A_5 R_c}{A_1};$$

$$A_7 = \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_i}(W, t)}{R_d}.$$

Для перевірки адекватності розробленої моделі написано програму для розрахунку параметрів схеми в середовищі *Maple*. Розрахунок показує, що на виході АВН дійсно будуть існувати періодичні коливання, частота яких буде змінюватись зі зміною ємності КЦС (рис. 3.56). Так, при  $C_w(W, T) = 50$  пФ частота  $F = 1490$  кГц, при  $C_w(W, T) = 65$  пФ частота  $F = 1441$  кГц, при  $C_w(W, T) = 80$  пФ частота  $F = 1385$  кГц, при  $C_w(W, T) = 95$  пФ частота  $F = 1343$  кГц, а при  $C_w(W, T) = 110$  пФ частота  $F = 1301$  кГц, при цьому  $U_1 = U_2 = 2,7$  В.

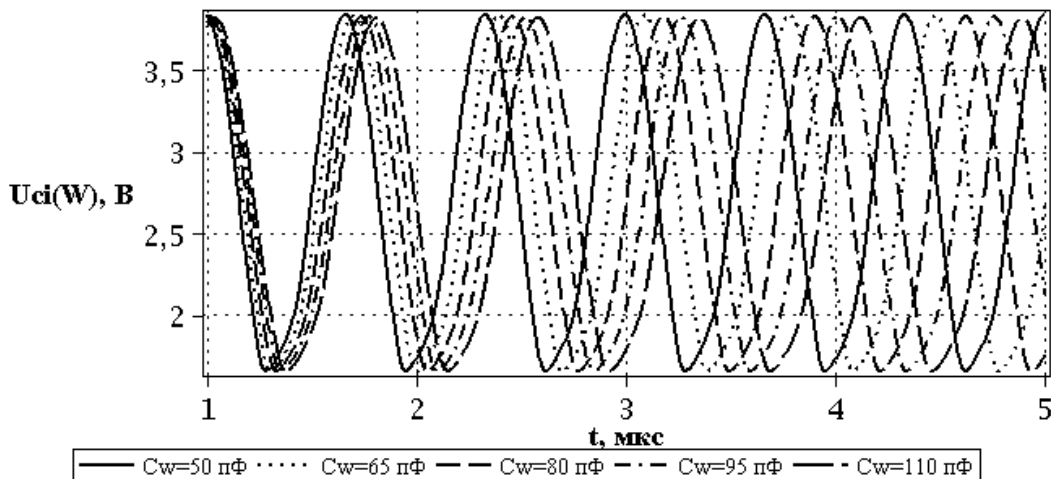


Рисунок 3.56 – Зміна напруги вихідного сигналу від часу при різних значеннях ємності вологочутливої КЦС

На рис. 3.57 показано зміну напруги вихідного сигналу від часу при різних значеннях вологості нафти з туркменського родовища при використанні КЦС із циліндричними електродами. З характеристики добре видно, що при збільшенні вологості частота вихідного сигналу буде зменшуватись.

Знаючи значення частоти вихідного сигналу  $F$  при різних значеннях вологочутливої ємності  $C_w(W, T)$  КЦС, можна отримати функцію перетворення для АВН в загальному вигляді (оскільки замість значень вологості в ній використовуються значення ємності вологочутливих

КЦС), при  $U_2 = 2,7$  В. Так, на рис. 3.58 показано функцію перетворення АВН в загальному вигляді з використанням у якості вологочутливого елемента КЦС з сіткоподібними електродами, а на рис. 3.59 – з циліндричними електродами, при різних значеннях напруги керування  $U_1$ .

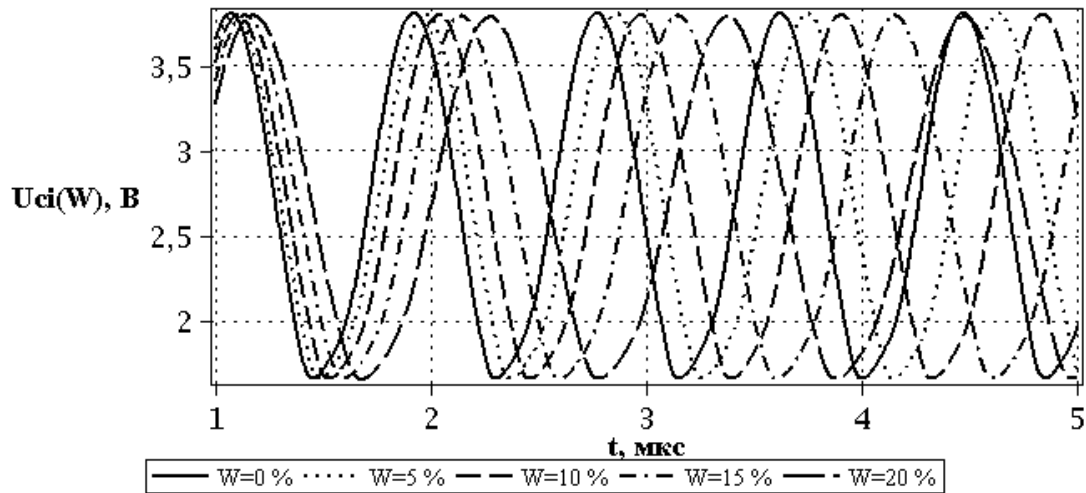


Рисунок 3.57 – Зміна напруги вихідного сигналу від часу при різних значеннях вологості нафти з туркменського родовища

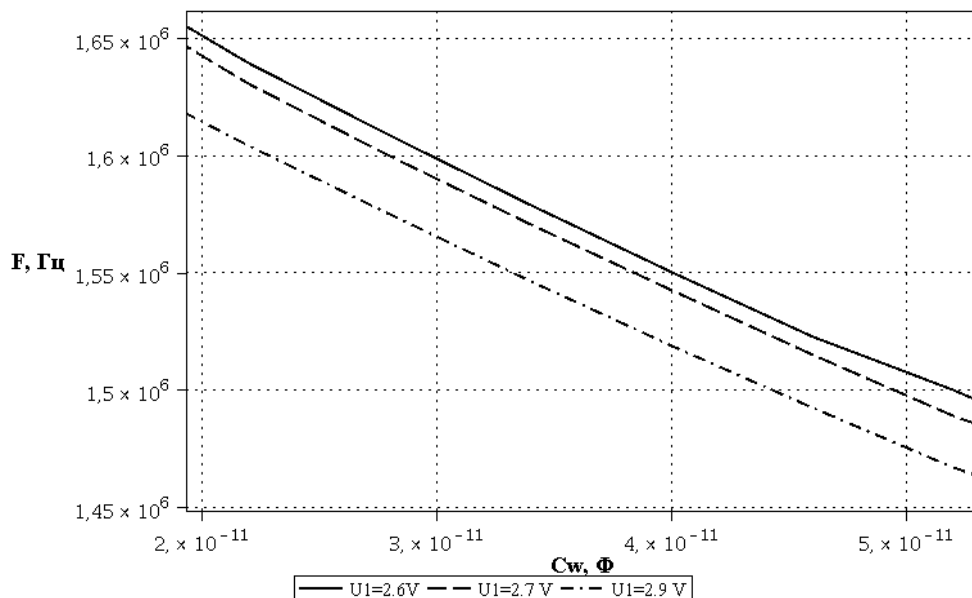


Рисунок 3.58 – Теоретична функція перетворення в загальному вигляді з використанням КЦС з сіткоподібними електродами

Для проведення експериментальних досліджень у схемі, що зображена на рис. 3.53, було використано транзистори КТ3107 та КП313, в якості вологочутливого елемента було використано почергово КЦС: з сіткоподібними електродами [97] та з циліндричними електродами [96].

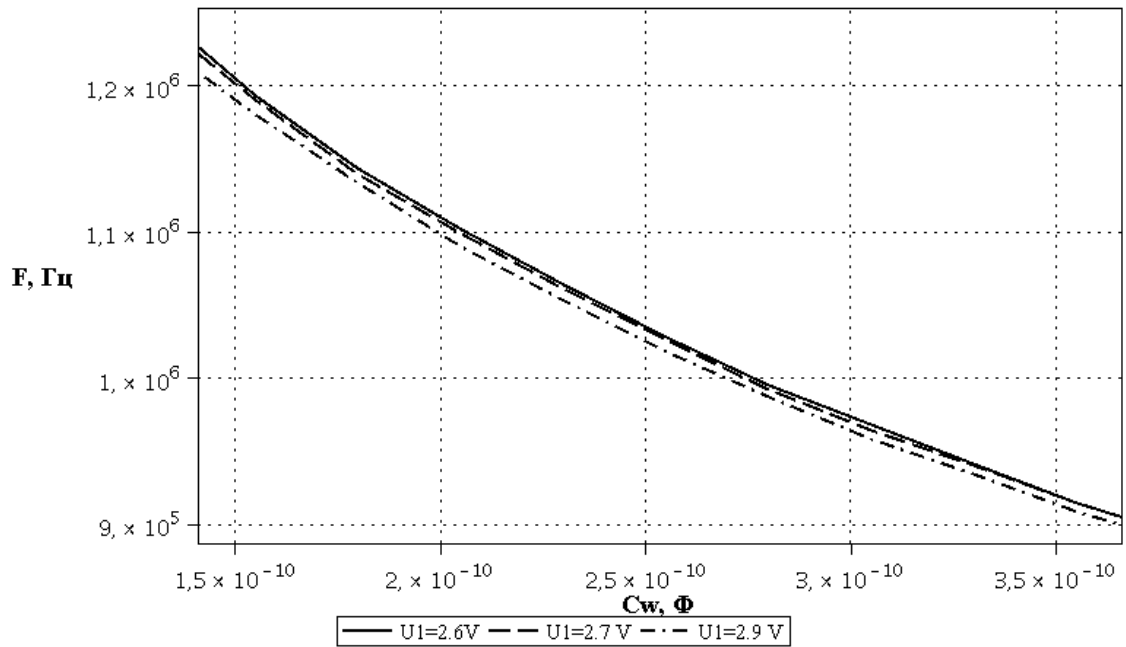


Рисунок 3.59 – Теоретична функція перетворення в загальному вигляді з використанням КЦС з циліндричними електродами

Для доведення існування ділянки від’ємного опору АВН на рис. 3.60 [119] покажемо експериментальні ВАХ досліджуваного АВН.

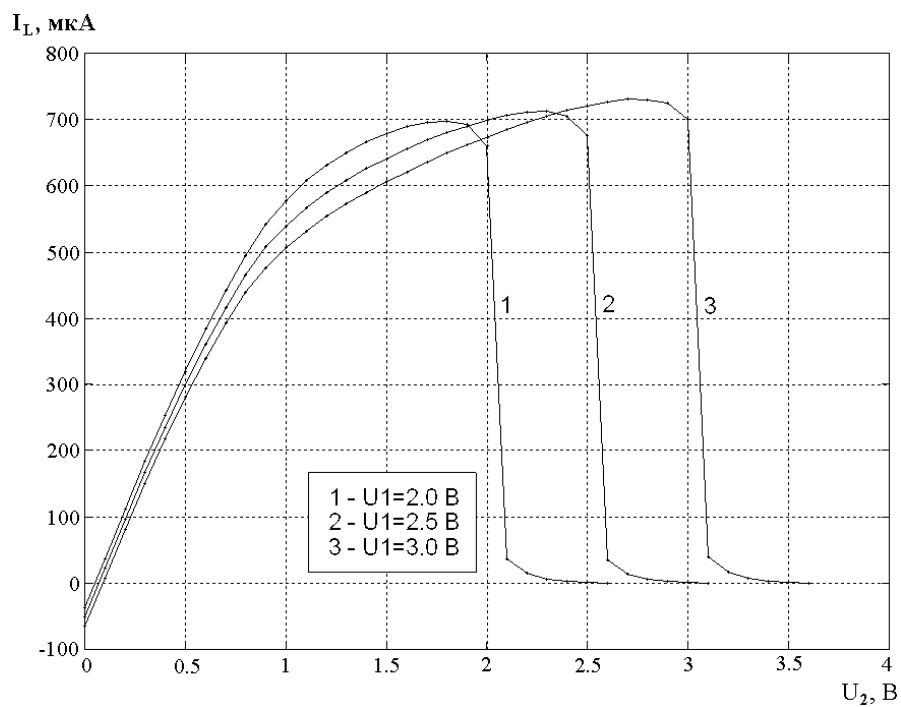


Рисунок 3.60 – Експериментальні ВАХ АВН [119]



З характеристик (рис. 3.60) видно присутність ділянки від'ємного опору. Так, при напрузі керування  $U_1 = 2,5$  В ділянка від'ємного опору по  $U_2$  складає від 2,3 до 3,1 В.

Для більшого розуміння на рис. 3.61–3.65 наведено функції перетворення АВН для різних нафтопродуктів з використанням в якості вологочутливого елемента КЦС з сіткоподібними електродами та на рис. 3.66–3.70 – з циліндричними електродами. Для зменшення собівартості АВН було використано лише одне джерело живлення, тобто  $U_1 = U_2 = 2,7$  В.

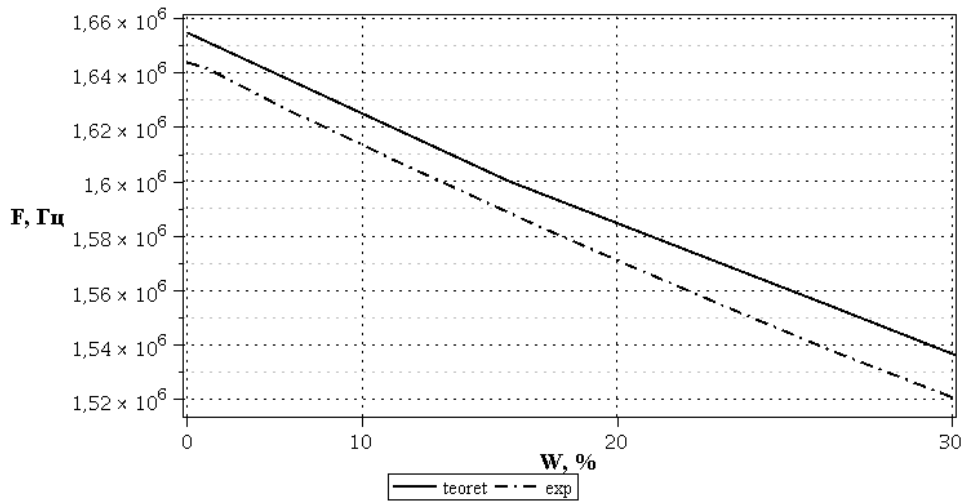


Рисунок 3.61 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із сіткоподібними електродами для напівсинтетичного моторного масла 5W40

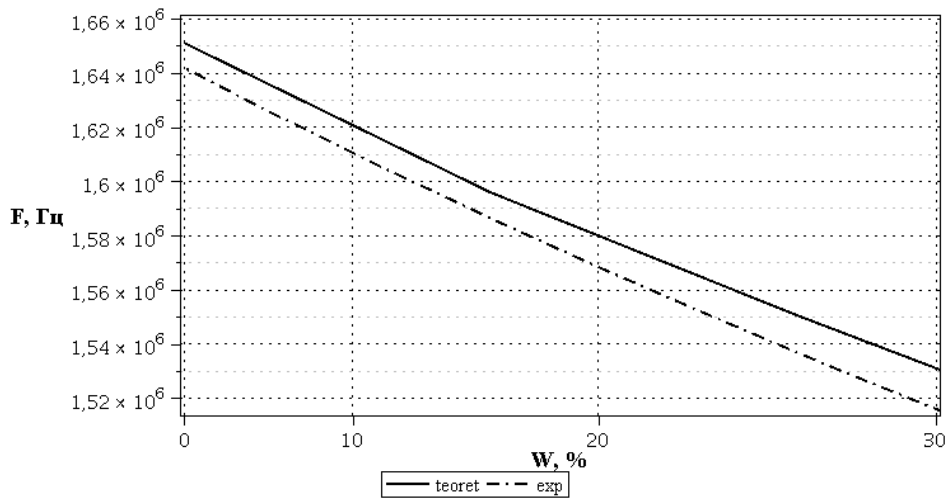


Рисунок 3.62 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із сіткоподібними електродами для мінерального моторного масла M8V

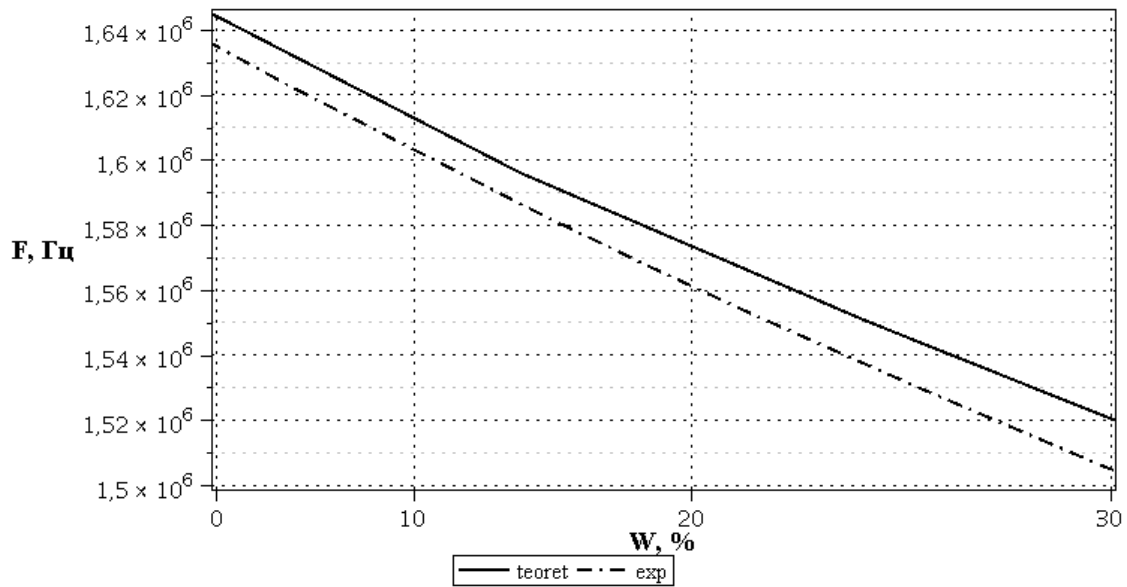


Рисунок 3.63 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із сіткоподібними електродами для трансформаторного масла Т-1500

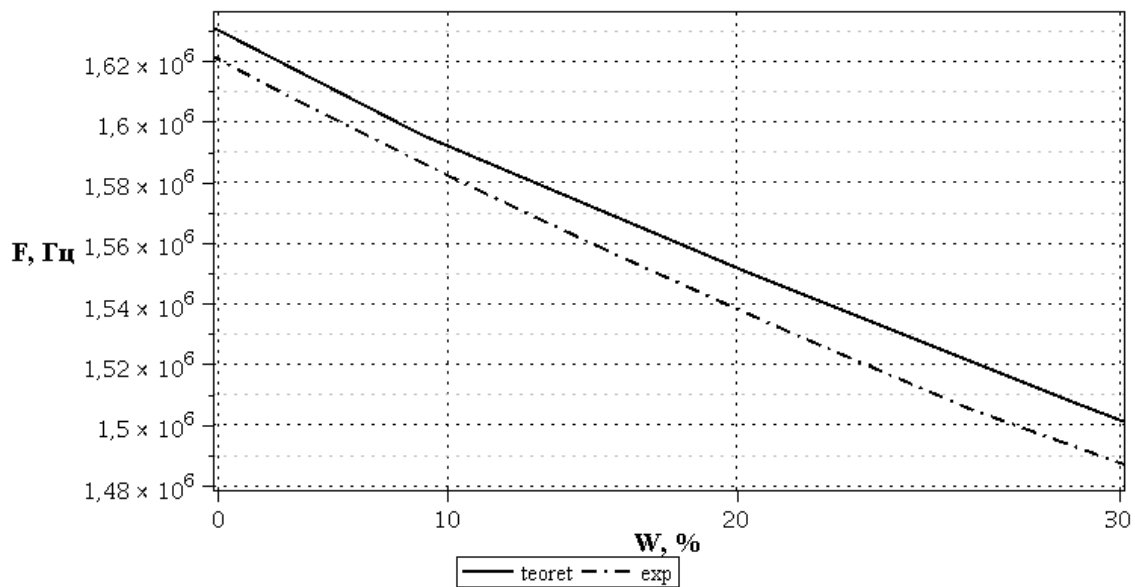


Рисунок 3.64 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із сіткоподібними електродами для нафти з туркменського родовища

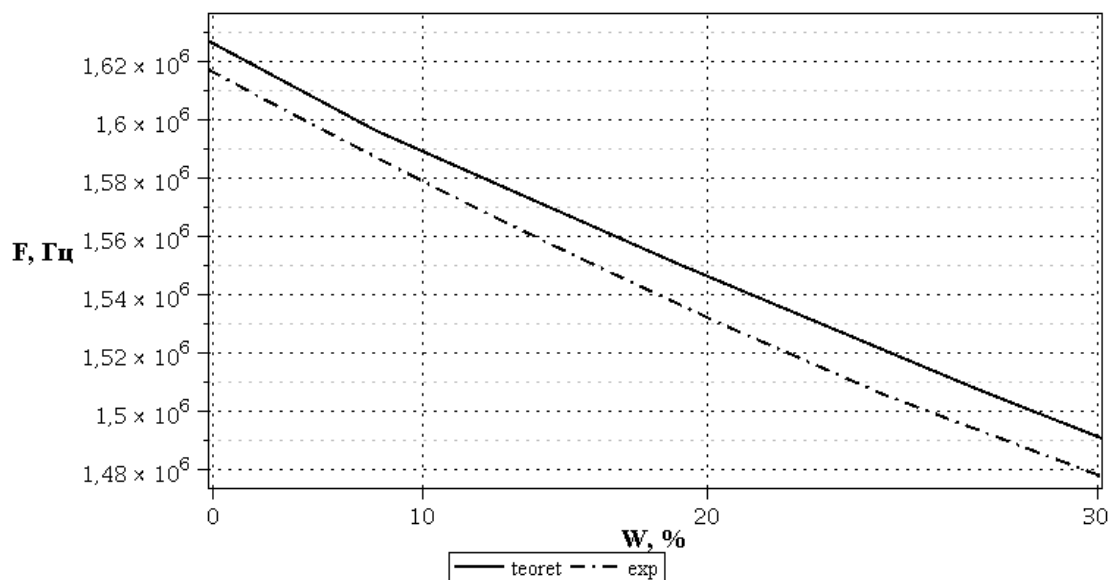


Рисунок 3.65 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із сіткоподібними електродами для нафти з Сургутського родовища

Як видно з рис. 3.61–3.65, функція перетворення АВН є майже лінійною. Чутливість АВН з КЦС із сіткоподібними електродами в діапазоні зміни вологості нафтопродуктів від 0 до 30 % складає від 3,3 до 5,2 кГц/ %.

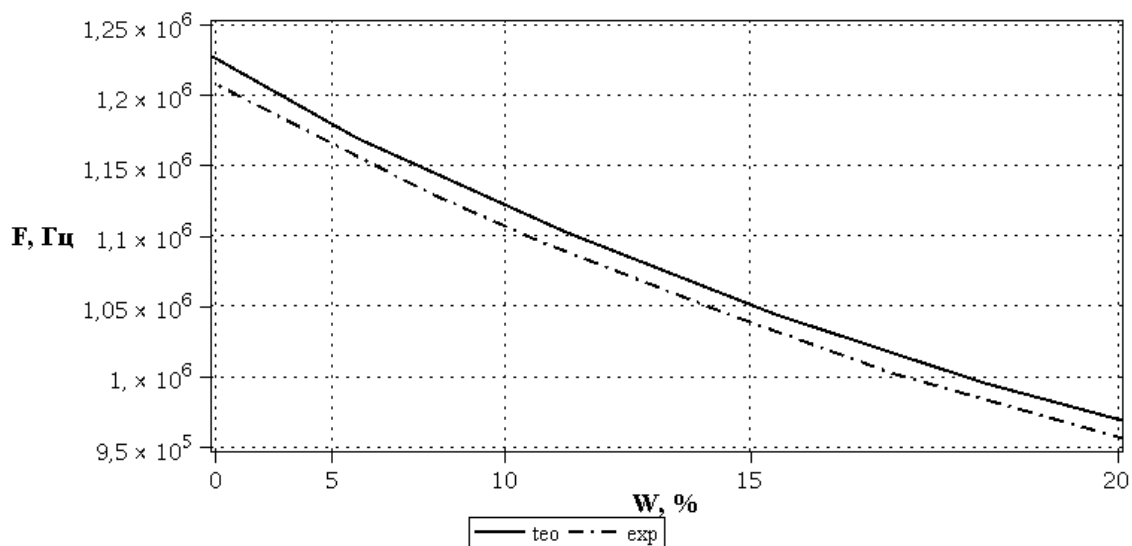


Рисунок 3.66 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами для напівсинтетичного моторного масла 5W40

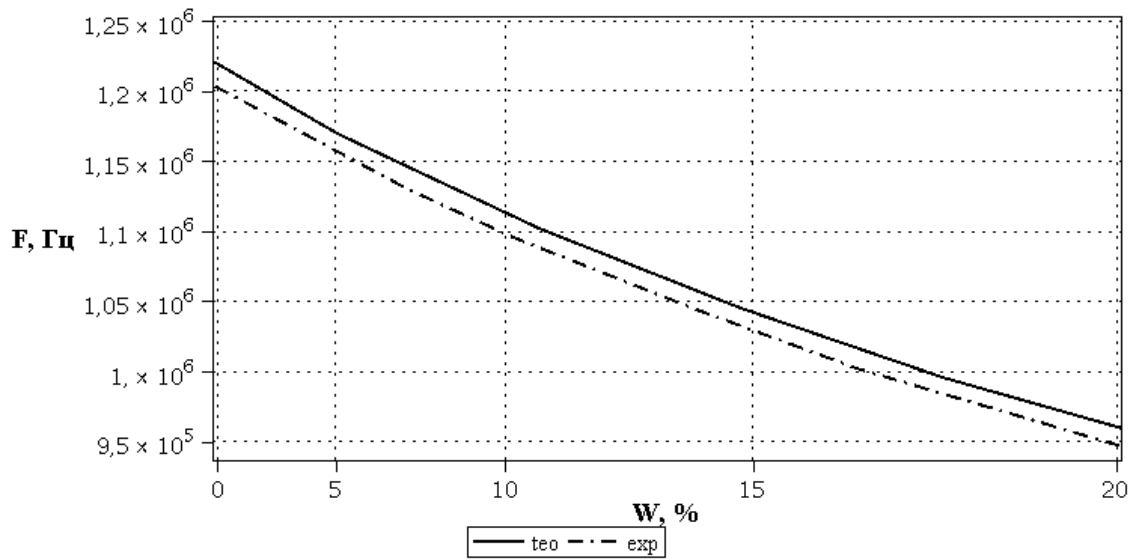


Рисунок 3.67 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами для мінерального моторного масла М8В

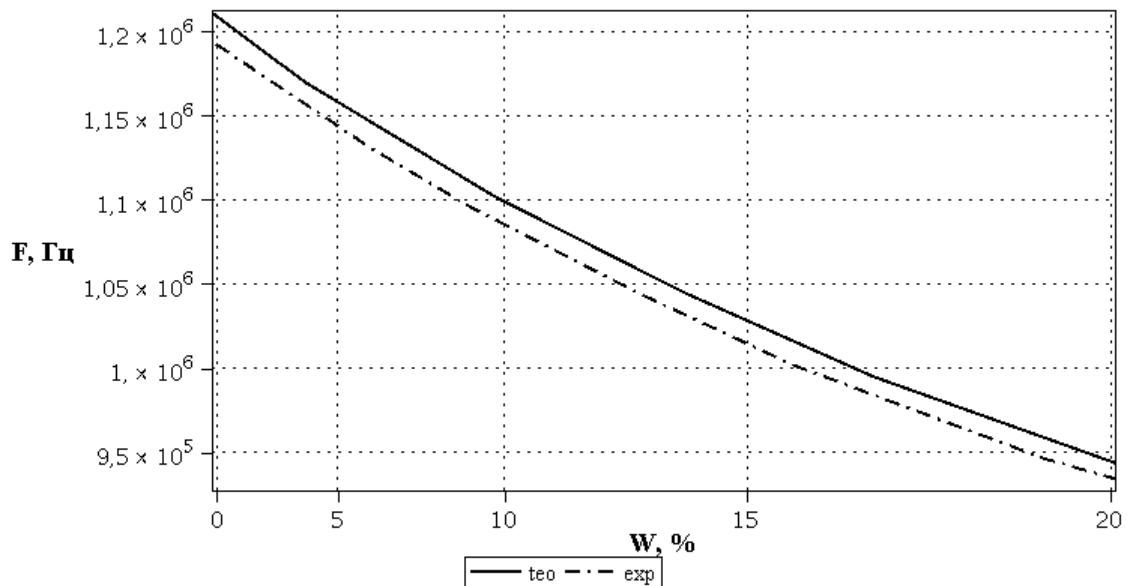


Рисунок 3.68 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами для трансформаторного масла Т-1500

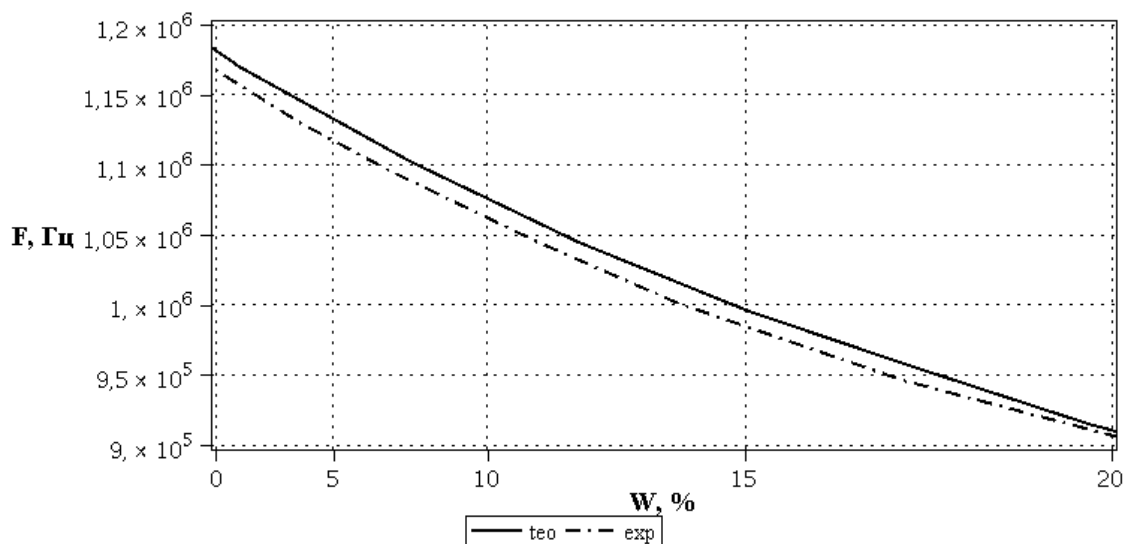


Рисунок 3.69 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами для нафти з туркменського родовища

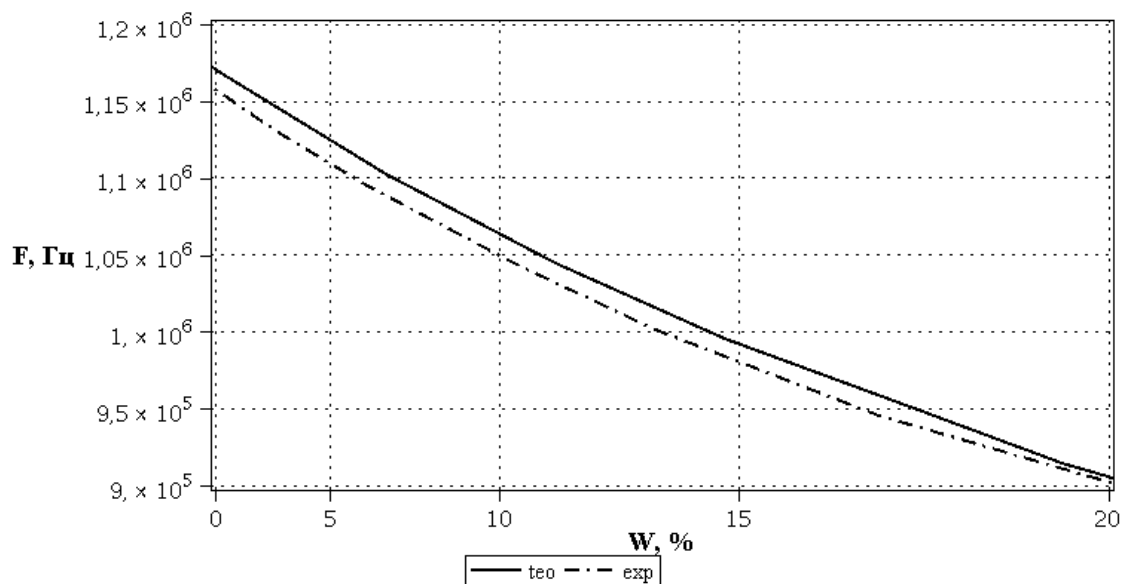


Рисунок 3.70 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами для нафти з Сургутського родовища

Як видно з рис. 3.66–3.70, функція перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами є нелінійною. Чутливість АВН в діапазоні зміни вологості нафтопродуктів від 0 до 20 % складає від 8,5 до 16,7 кГц/%.

З рис. 3.61–3.70 видно, що розбіжність теоретичних та експериментальних результатів для АВН є різною при різних значеннях вологості нафтопродуктів  $W$ , але не перевищує 2 %.

Залежність частоти генерації від вологості нафтопродуктів визначається по контуру зворотного струму згідно з еквівалентною схемою (рис. 3.54) на основі теорії стійкості Ляпунова.

Функція перетворення АВН на основі структури біполярного і польового транзисторів описується виразом (3.22)

$$F = \frac{\sqrt{2} \sqrt{LC_i(W, T) \left( R_{ds}^2 C_{ds} C_i(W, T) + R_{ds}^2 C_{ds}^2 - LC_i(W, T) + \sqrt{A} \right)}}{4\pi LC_i(W, T) R_{ds} C_{ds}}, \quad (3.22)$$

$$\text{де } A = R_{ds}^4 C_{ds}^2 C_i^2(W, T) + 2R_{ds}^4 C_{ds}^3 C_i(W, T) - 2LR_{ds}^2 C_{ds} C_i^2(W, T) + R_{ds}^4 C_{ds}^4 + 2LR_{ds}^2 C_{ds}^2 C_i(W, T) + L^2 C_i^2(W, T).$$

На основі виразу (3.22) визначена чутливість АВН на основі структури біполярного і польового транзисторів:

$$S_W^F = \frac{\sqrt{2} \left( B_6 \frac{\partial C_i(W, T)}{\partial W} + LC_i(W, T) \left( B_3 \frac{\partial C_i(W, T)}{\partial W} + \frac{B_4 \frac{\partial C_i(W, T)}{\partial W}}{B_2} \right) \right)}{8 \cdot \left( B_5 \sqrt{LC_i(W, T) (B_2 + B_1)} - \frac{\sqrt{2} \sqrt{B_6 C_i(W, T)} \frac{\partial C_i(W, T)}{\partial W}}{4B_5 C_i(W, T)} \right)}, \quad (3.23)$$

$$\text{де } B_1 = R_{ds}^2 C_{ds} C_i(W, T) + R_{ds}^2 C_{ds}^2 - LC_i(W, T);$$

$$B_2 = \sqrt{R_{ds}^4 C_{ds}^2 C_i^2(W, T) + 2R_{ds}^4 C_{ds}^3 C_i(W, T) - 2LR_{ds}^2 C_{ds} C_i^2(W, T) + R_{ds}^4 C_{ds}^4 + 2LR_{ds}^2 C_{ds}^2 C_i(W, T) + L^2 C_i^2(W, T)};$$

$$B_3 = R_{ds}^2 C_{ds} - L;$$

$$B_4 = R_{ds}^4 C_{ds}^2 (C_i(W, T) + C_{ds}) + LR_{ds}^2 C_{ds} (C_{ds} - 2C_i(W, T)) + L^2 C_i(W, T);$$

$$B_5 = \pi LR_{ds} C_{ds} C_i(W, T); \quad B_6 = L(B_2 + B_1).$$

Графік залежності чутливості від ємності вологочутливих КЦС показаний на рис. 3.71, від вологості нафти з туркменського родовища з КЦС із циліндричними електродами – на рис. 3.72.

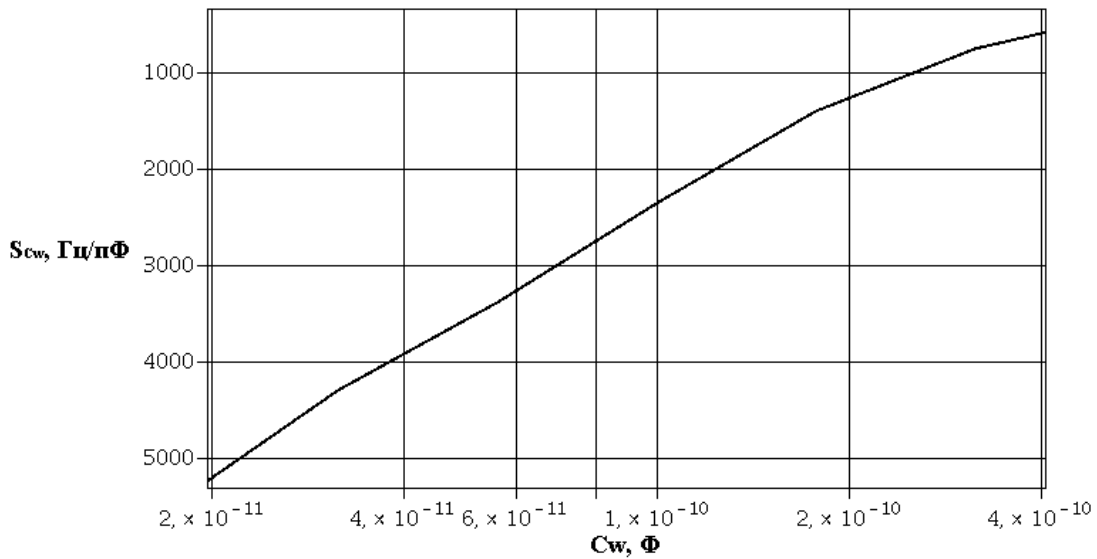


Рисунок 3.71 – Залежність чутливості АВН від зміни ємності вологочутливих КЦС

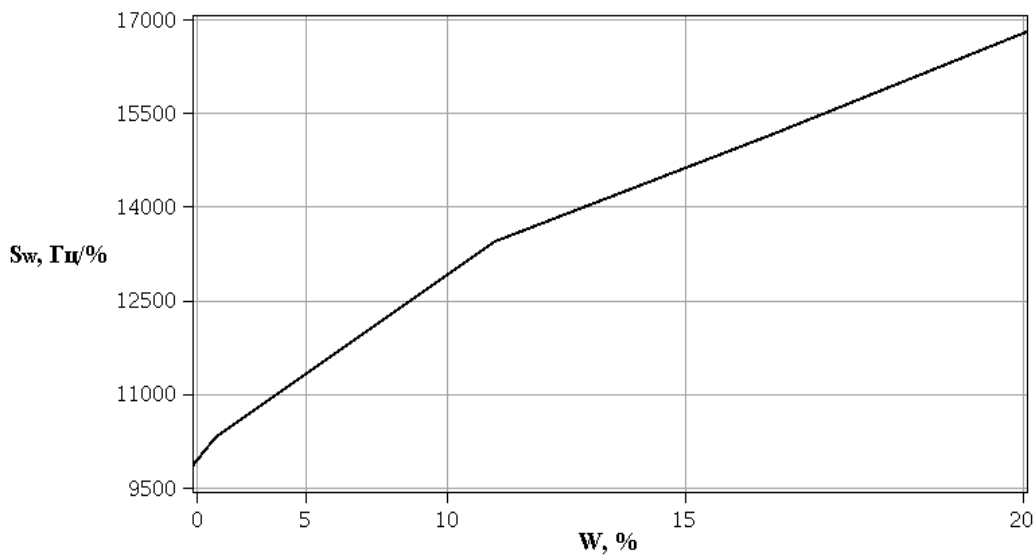


Рисунок 3.72 – Залежність чутливості АВН від зміни вологості нафти туркменського родовища з КЦС із циліндричними електродами

З рис. 3.72 видно, що зі зміною вологості нафти з туркменського родовища від 0 до 20 %, чутливість змінюється від 9850 до 16640 Гц/%.

На рис. 3.73 показано результати моделювання зміни нормованої чутливості  $S_H$  [116] від ємності вологочутливої КЦС, що розрахована на основі виразу (3.17).

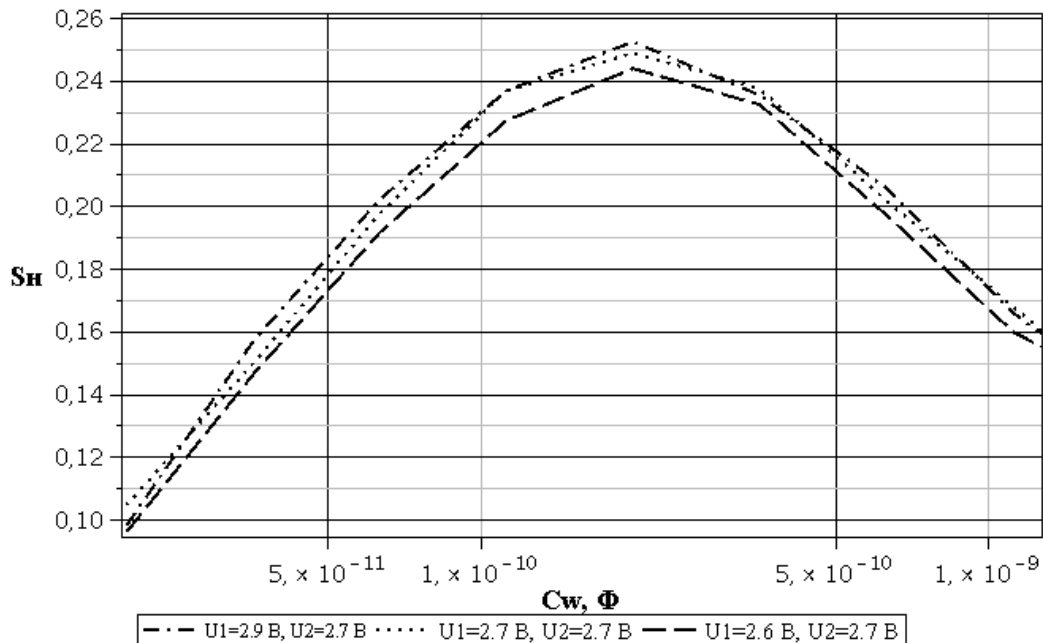


Рисунок 3.73 – Залежність нормованої чутливості АВН від ємності вологочутливої КЦС [119]

Нормована частота  $F_H = 1$  МГц. З рис. 3.73 видно, що найбільше значення нормованої чутливості спостерігається в діапазоні від 100 до 500 пФ, що є оптимальним режимом роботи АВН. Отже, для досягнення більшої чутливості в схемі АВН краще використовувати КЦС з циліндричними електродами.

### 3.5 Дослідження характеристик автогенераторного засобу контролю вологості нафтопродуктів на основі структури з двох польових транзисторів

Для отримання більших значень чутливості, ніж у АВН з попередніх підрозділів, запропоновано електричну схему АВН [121], що зображений на рис. 3.74, в якому при дії вологи на вологочутливу КЦС  $C_w(W, T)$  змінюється ємнісна складова повного опору на електродах стік–стік транзисторів  $VT1$  та  $VT2$ , що викликає ефективну зміну частоти коливального контуру [122]. Для вибору оптимального режиму роботи АВН в схемі використовуються два джерела живлення постійної напруги  $U_1$  та  $U_2$ , але для зменшення собівартості АВН в подальшому буде використано лише одне джерело живлення.



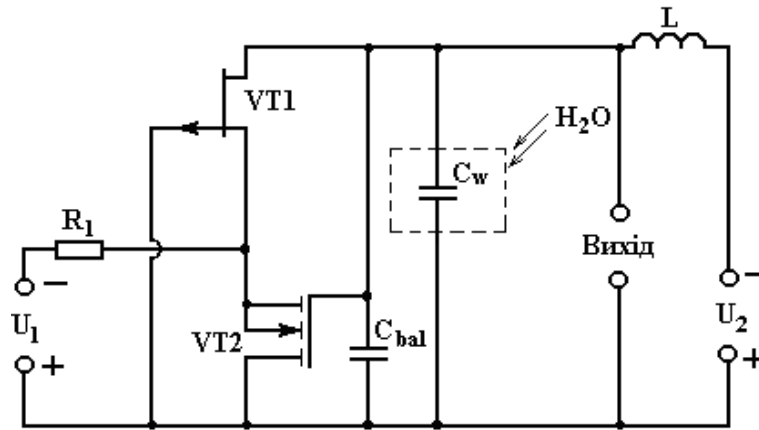


Рисунок 3.74 – Електрична схема АВН [121]

Для визначення функції перетворення та чутливості скористаємось еквівалентною схемою АВН (рис. 3.75), яка реалізує залежність частоти генерації від зміни вологості нафтопродуктів.

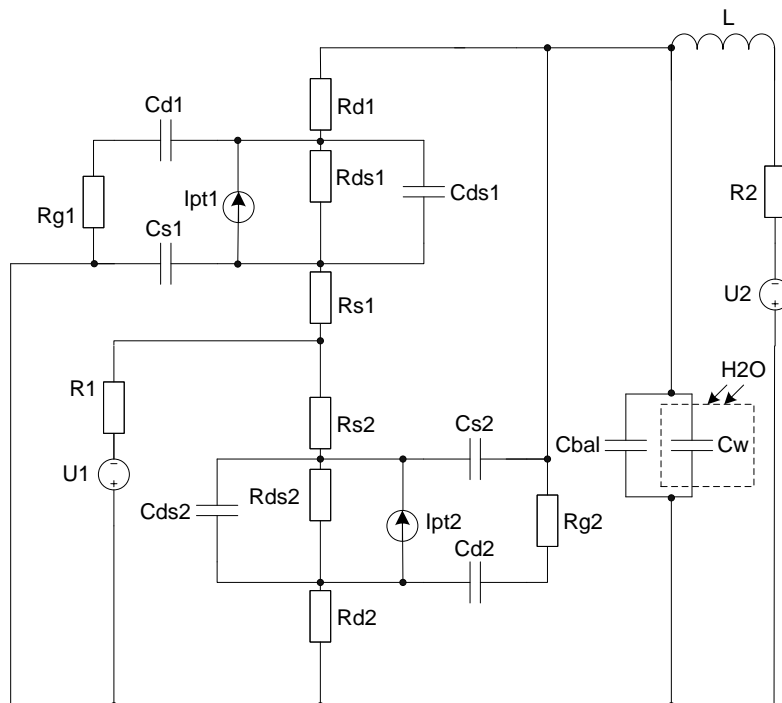


Рисунок 3.75 – Еквівалентна схема АВН

Для зручності розрахунків, об'єднавши паралельні ємності  $C_w(W, T)$  і  $C_{bal}$  у  $C_i(W, T) = C_w(W, T) + C_{bal}$ , а також скориставшись методом змінних стану на рис. 3.76 покажемо перетворену еквівалентну схему АВН [123].

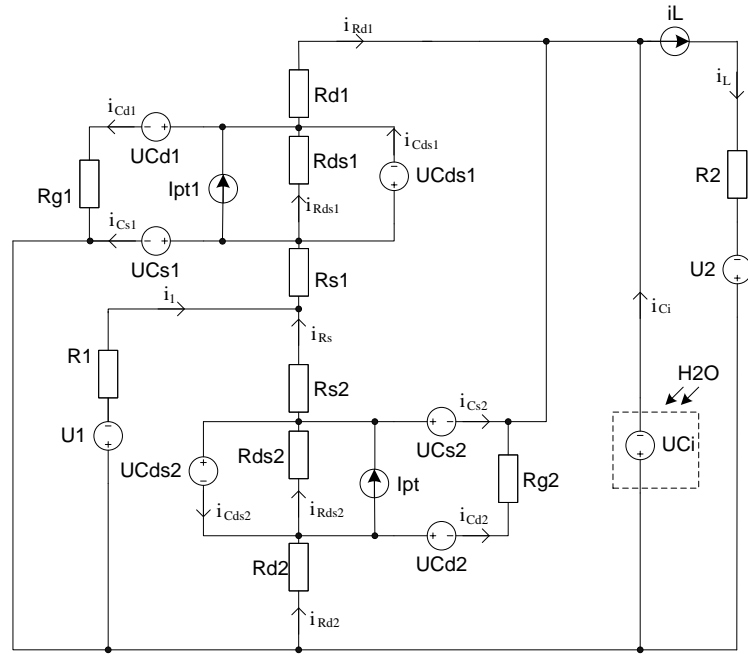


Рисунок 3.76 – Перетворена еквівалентна схема АВН [123]

На основі вибраних напрямків струмів було складено систему рівнянь Кірхгофа:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 U_L(t) = U_2 - (U_{C_i}(W, t) + i_L(t)R_2); \\
 i_{C_{d1}}(t) = \frac{U_{C_{s1}}(t) - U_{C_{ds1}}(t) - U_{C_{d1}}(t)}{R_{g1}}; \\
 i_{C_{d2}}(t) = \frac{A_1 - U_{C_{d2}}(t)}{R_{g2}}; \\
 i_{C_{ds2}}(t) = \frac{A_1 - U_{C_{d2}}(t)}{R_{g2}} + I_{pt2} + \frac{U_{C_{ds2}}(t)}{R_{ds2}} - \frac{A_2}{R_{d2}}; \\
 i_{C_{s2}}(t) = \frac{A_3}{R_{s1} + R_{s2}} + \frac{A_2}{R_{d2}} - \frac{A_1 - U_{C_{d2}}(t)}{R_{g2}}; \\
 i_{C_i}(t) = -\frac{A_4}{R_{d1}} - \frac{A_3}{R_{s1} + R_{s2}} - \frac{A_2}{R_{d2}}; \\
 i_{C_{s1}}(t) = -\frac{A_5}{R_{g1}} - \frac{A_4}{R_{d1}} - \frac{A_3}{R_{s1} + R_{s2}}; \\
 i_{C_{ds1}}(t) = \frac{A_5}{R_{g1}} + \frac{A_4}{R_{d1}} - I_{pt1} - \frac{U_{C_{ds1}}(t)}{R_{ds1}};
 \end{array} \right. \quad (3.24)$$

де  $R_1, R_2$  – навантажувальні опори;  $R_{d1}, R_{s1}, R_{g1}, R_{d2}, R_{s2}, R_{g2}$  – об’ємні опори стоку, витоків та затвору;  $R_{ds1}, R_{ds2}$  – опори стоку–витоків;  $C_{d1}, C_{s1}, C_{ds1}, C_{d2}, C_{s2}, C_{ds2}$  – ємності затвор–стік, затвор–виток та стік–виток;  $C_{bal}$  – баластна ємність;  $C_w(W, T)$  – ємність вологочутливої КЦС;  $L$  – індуктивність;  $U_1, U_2$  – джерела живлення постійної напруги;  $I_{pt1}, I_{pt2}$  – струми польових транзисторів  $VT1$  та  $VT2$ ;

$$A_1 = U_{C_{s2}} - U_{C_{ds2}};$$

$$A_2 = U_{C_i}(W) - U_{C_{s2}} + U_{C_{ds2}};$$

$$A_3 = U_{C_i}(W) - U_{C_{s2}} + U_{C_{s1}};$$

$$A_4 = U_{C_i}(W) + U_{C_{s1}} - U_{C_{ds1}};$$

$$A_5 = U_{C_{s1}} - U_{C_{ds1}}.$$

Система рівнянь (3.24) є нелінійною, оскільки містить в собі нелінійні елементи, а саме джерела струмів  $I_{pt1}, I_{pt2}$ , значення яких знаходяться з виразу (3.8).

Система рівнянь (3.24) є динамічною математичною моделлю АВН, яка дозволяє визначити значення напруги та струму в будь-якій точці схеми в заданий момент часу.

Для перевірки адекватності розробленої моделі написано програму для розрахунку параметрів схеми в середовищі *Maple*. Розрахунок показує, що на виході АВН дійсно будуть існувати періодичні коливання, частота яких буде змінюватись зі зміною ємності КЦС (рис. 3.77). Так, при  $C_w(W, T) = 20$  пФ частота  $F = 4377$  кГц, при  $C_w(W, T) = 25$  пФ частота  $F = 4263$  кГц, при  $C_w(W, T) = 30$  пФ частота  $F = 4161$  кГц, при  $C_w(W, T) = 35$  пФ частота  $F = 4068$  кГц, а при  $C_w(W, T) = 40$  пФ частота  $F = 3972$  кГц, при цьому  $U_1 = U_2 = 3$  В.

На рис. 3.78. показано зміну напруги вихідного сигналу від часу при різних значеннях вологості нафти з туркменського родовища з використанням КЦС із циліндричними електродами. З характеристики добре видно, що при збільшенні вологості частота вихідного сигналу буде зменшуватись.

Знаючи значення частоти вихідного сигналу  $F$  при різних значеннях вологочутливої ємності  $C_w(W, T)$  КЦС, можна отримати функцію перетворення для АВН в загальному вигляді (оскільки замість значень вологості в ній використовуються значення ємності вологочутливих КЦС),  $U_1 = U_2 = 3$  В.

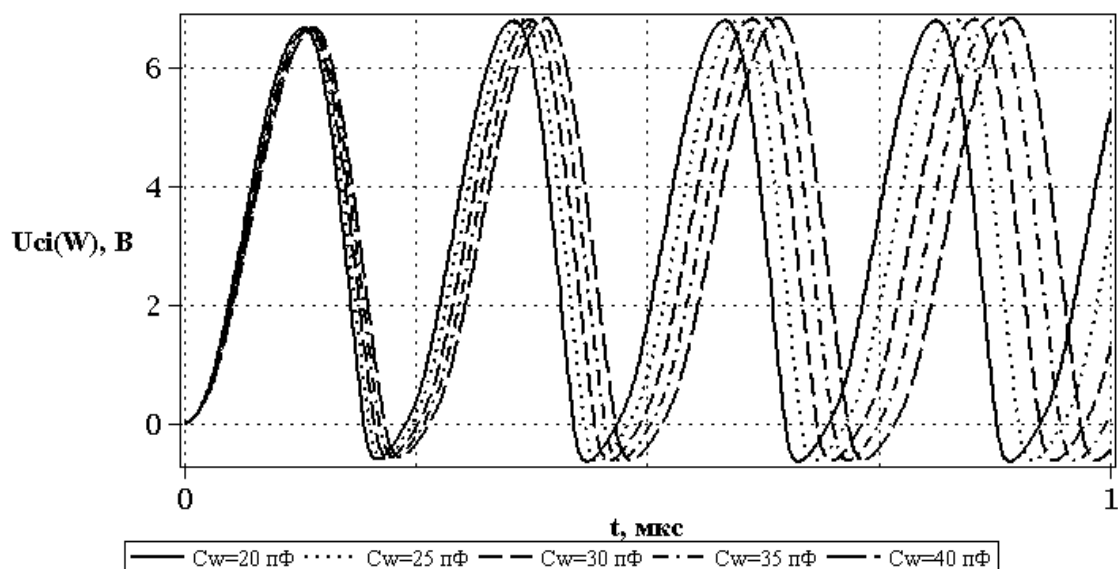


Рисунок 3.77 – Зміна напруги вихідного сигналу від часу при різних значеннях ємності вологочутливої КЦС

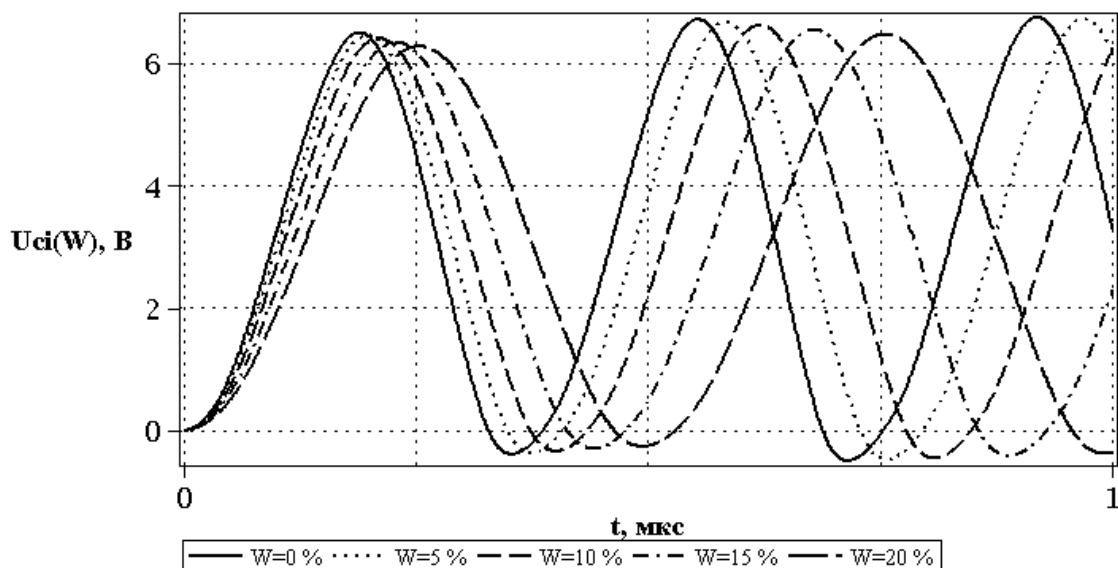


Рисунок 3.78 – Зміна напруги вихідного сигналу від часу при різних значеннях вологості нафти з туркменського родовища

Так, на рис. 3.79 наведено функцію перетворення АВН в загальному вигляді з використання у якості вологочутливого елемента КЦС з сіткоподібними електродами, а на рис. 3.80 – з циліндричними електродами, при різних значеннях індуктивності  $L$ .

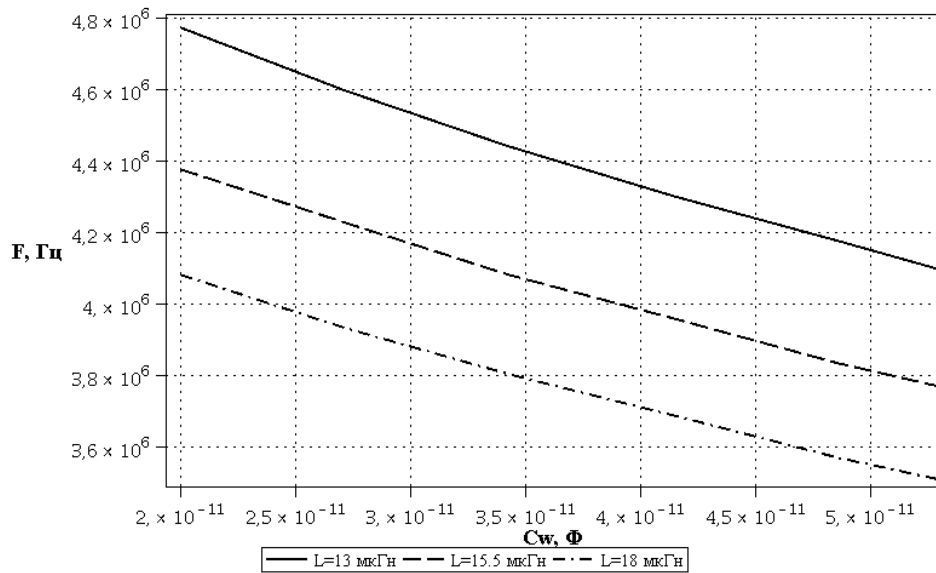


Рисунок 3.79 – Теоретична функція перетворення в загальному вигляді з використанням КЦС з сіткоподібними електродами

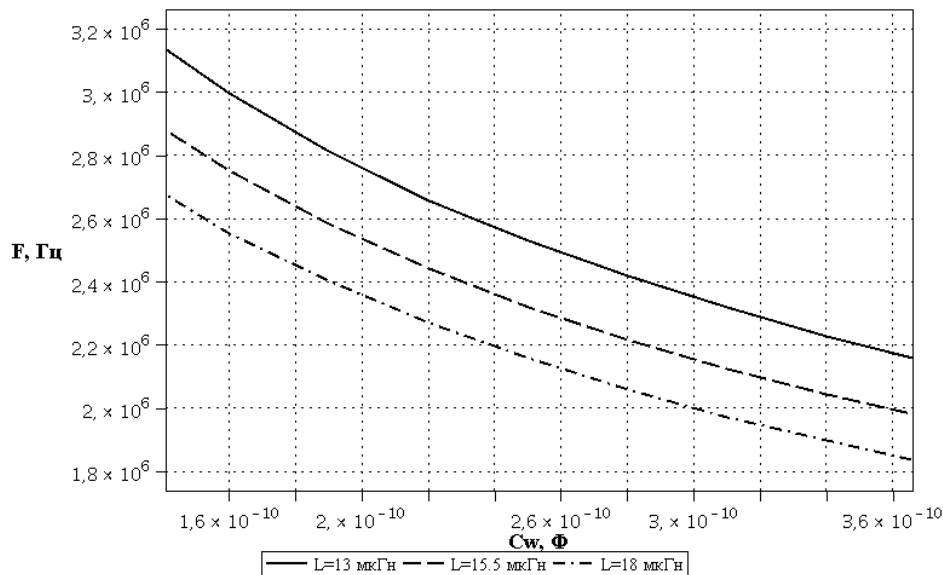


Рисунок 3.80 – Теоретична функція перетворення в загальному вигляді з використанням КЦС з циліндричними електродами

Для проведення експериментальних досліджень у схемі, що зображена на рис. 3.74, було використано транзистори КП103М та КП315Е, в якості чутливого елемента було використано почергово КЦС: з сіткоподібними електродами [97] та з циліндричними електродами [96].

На рис. 3.81 для доведення існування ділянки від'ємного опору зображено експериментальні ВАХ досліджуваного АВН.

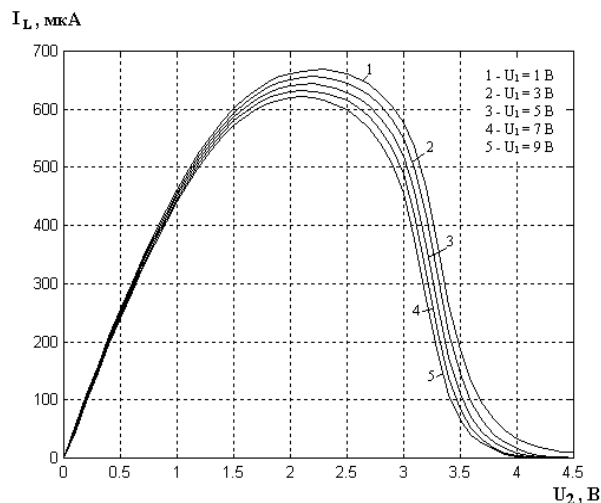


Рисунок 3.81 – Експериментальні ВАХ АВН

З характеристик (рис. 3.81) видно присутність ділянки від'ємного опору. Так, при напрузі керування  $U_1 = 1 \text{ В}$  від'ємний опір існує при напрузі живлення  $U_2$  від 2,3 В до 4,4 В. Зі збільшенням напруги керування спостерігається зменшення ділянки від'ємного опору. Для зменшення собівартості АВН було використано лише одне джерело живлення, тобто  $U_1 = U_2 = 3 \text{ В}$ .

Для більшого розуміння на рис. 3.82–3.86 наведено функції перетворення АВН для різних нафтопродуктів з використанням в якості вологочутливого елемента КЦС з сіткоподібними електродами, а на рис. 3.87–3.91 – з циліндричними електродами.

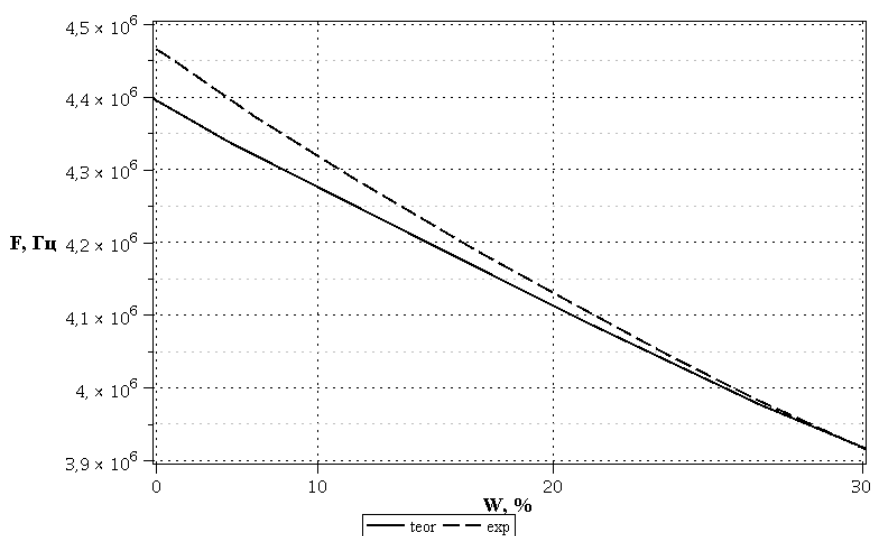


Рисунок 3.82 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із сіткоподібними електродами для напівсинтетичного моторного масла 5W40

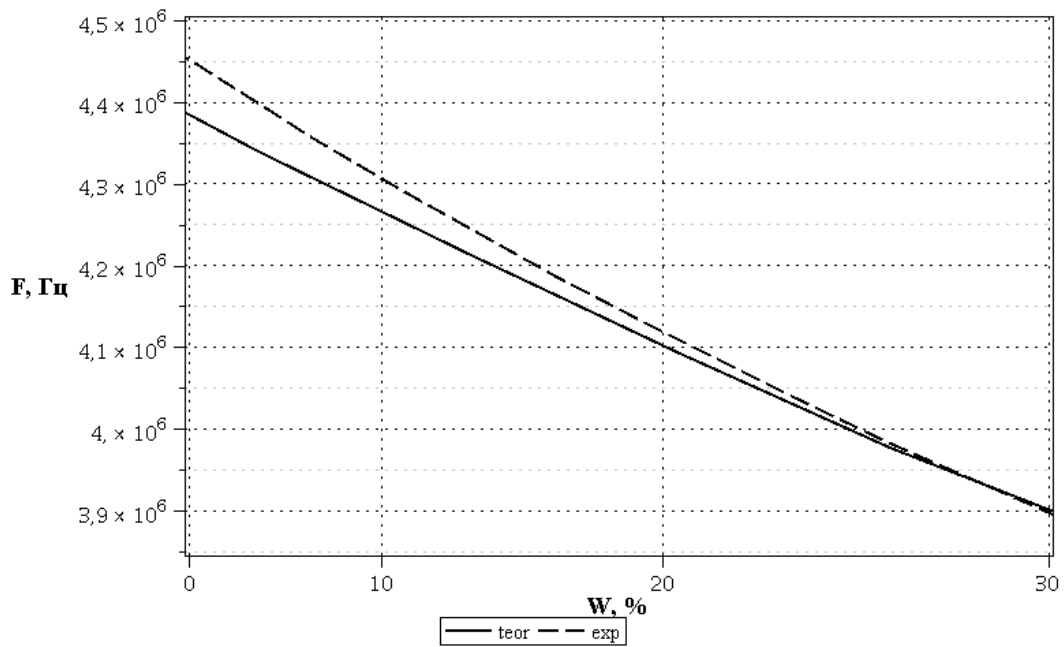


Рисунок 3.83 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із сіткоподібними електродами для мінерального моторного масла М8В

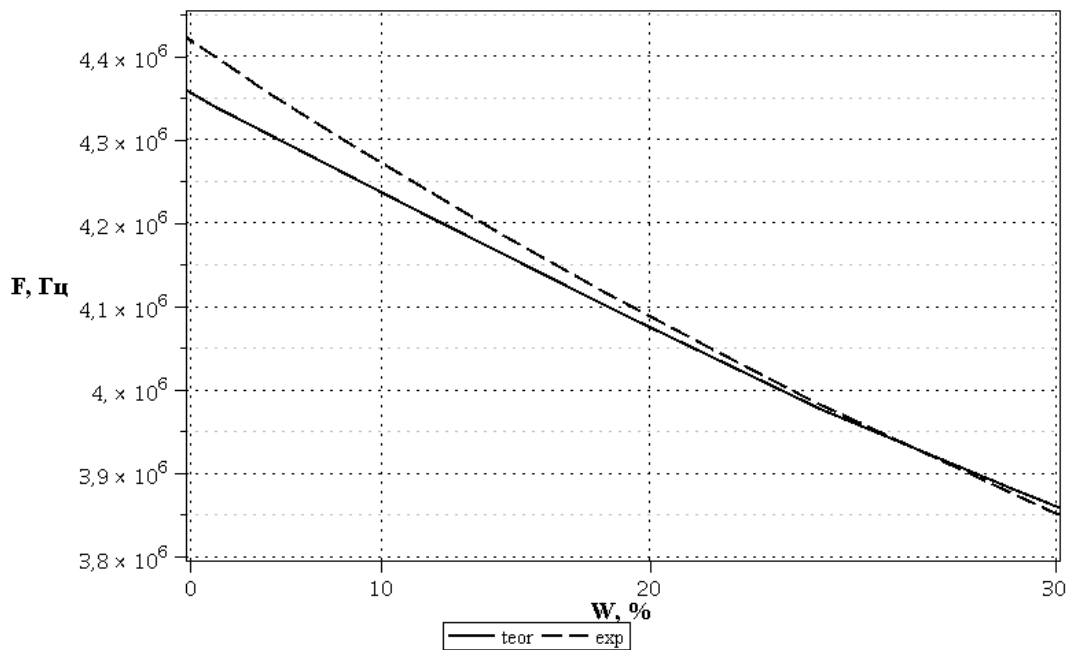


Рисунок 3.84 – Теоретична та експериментальна функція перетворення АВН з КЦС із сіткоподібними електродами для трансформаторного масла Т-1500

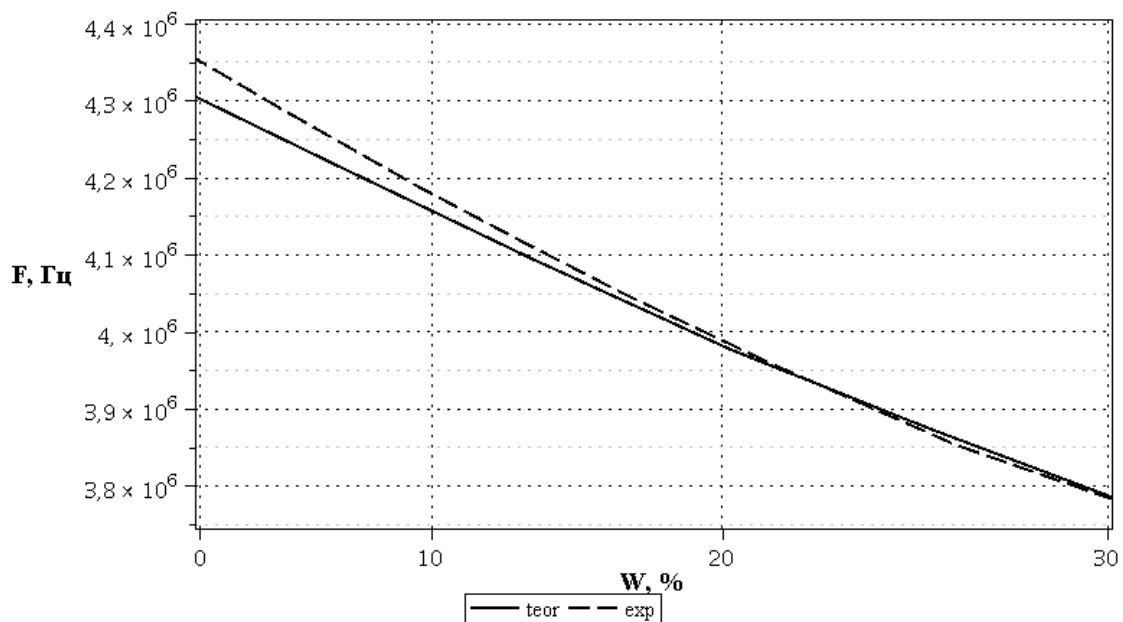


Рисунок 3.85 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із сіткоподібними електродами для нафти з туркменського родовища

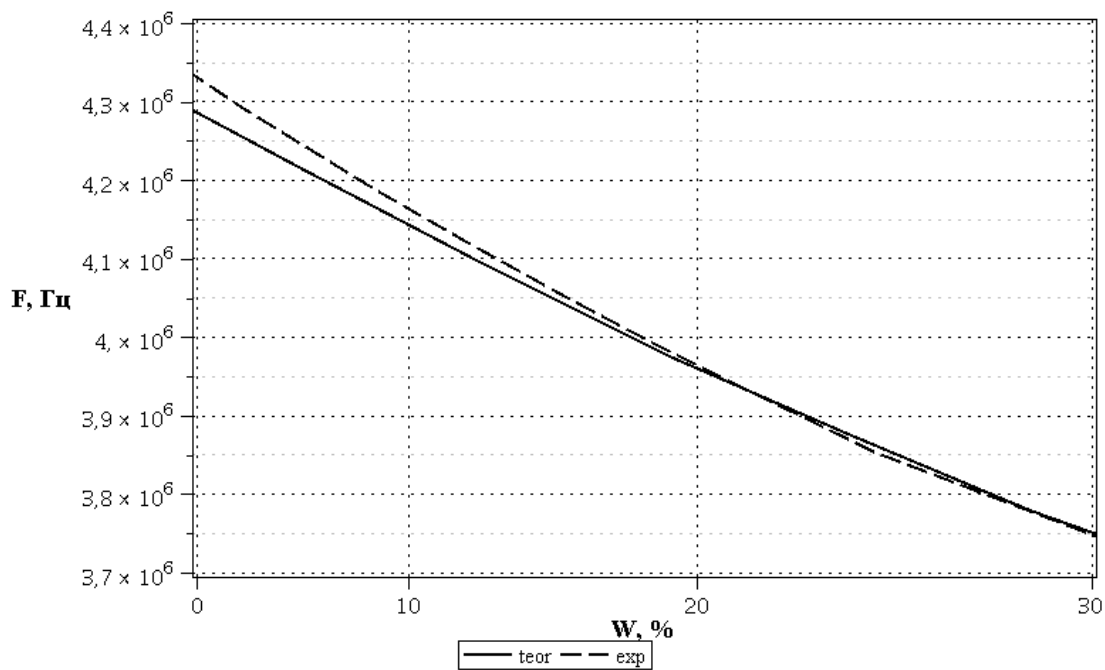


Рисунок 3.86 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із сіткоподібними електродами для нафти з Сургутського родовища



Як видно з рис. 3.82–3.86, функція перетворення АВН є нелінійною. Чутливість АВН з КЦС із сіткоподібними електродами в діапазоні зміни вологості нафтопродуктів від 0 до 30 % складає від 15 до 20 кГц/ %.

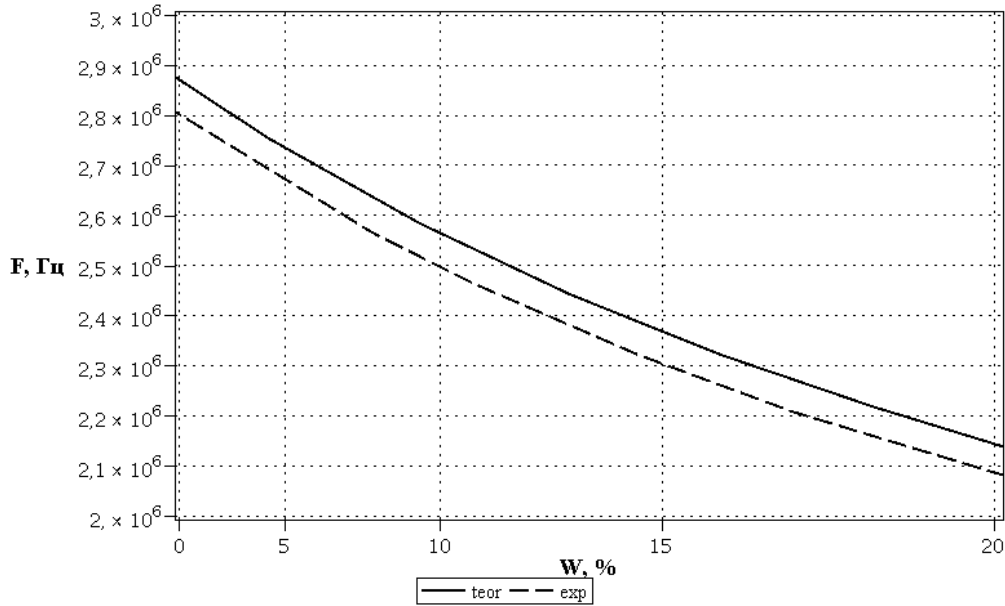


Рисунок 3.87 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами для напівсинтетичного моторного масла 5W40

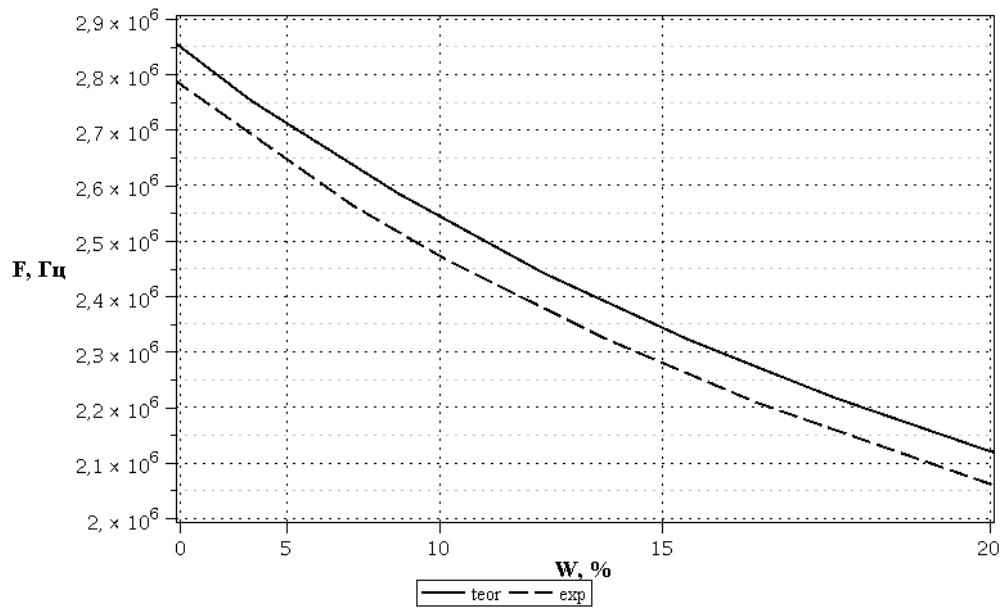


Рисунок 3.88 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами для мінерального моторного масла M8V

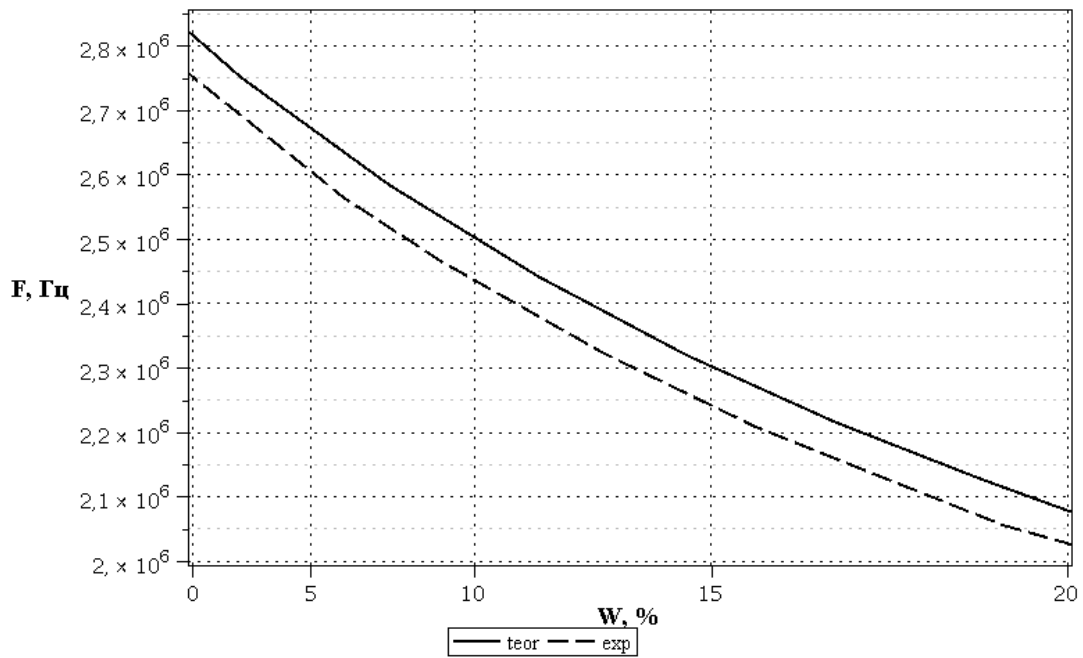


Рисунок 3.89 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами для трансформаторного масла Т-1500

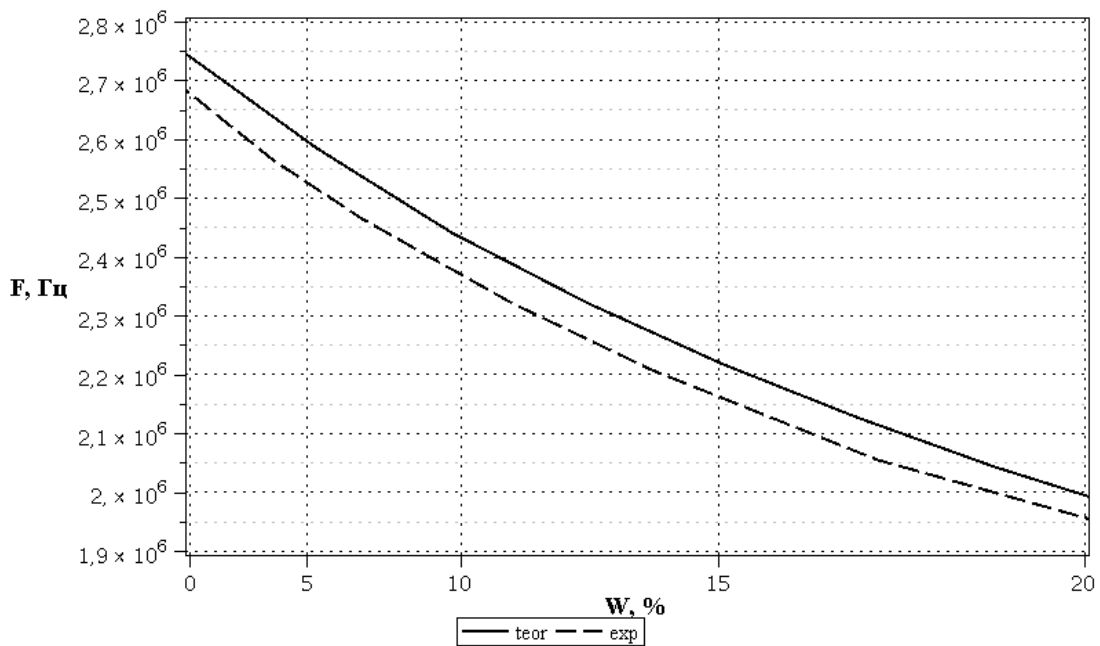


Рисунок 3.90 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами для нафти з туркменського родовища

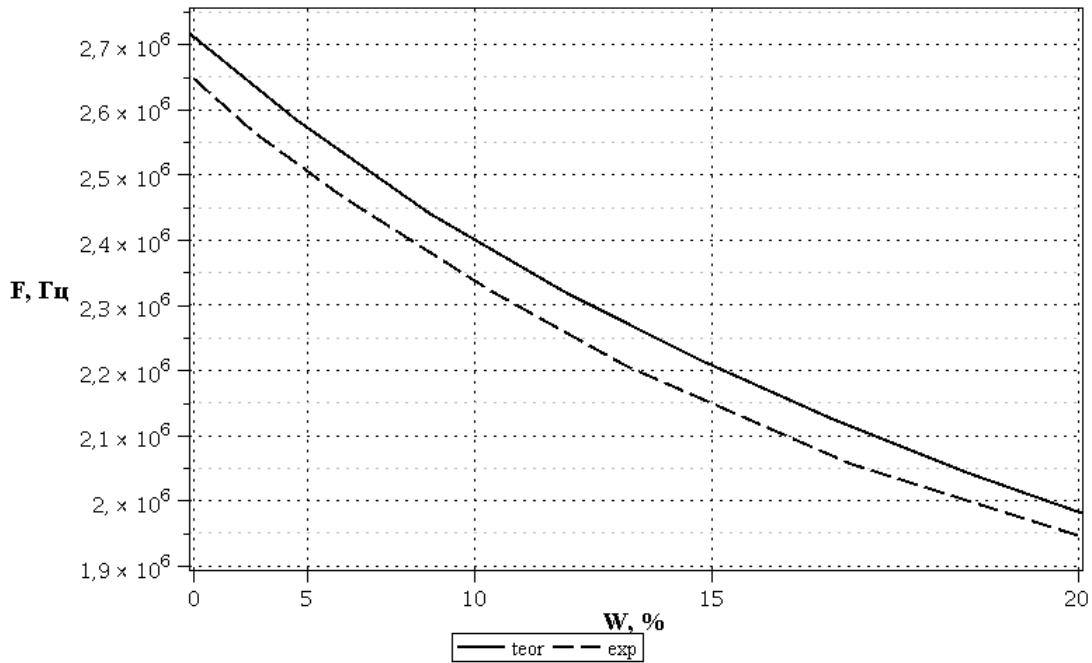


Рисунок 3.91 – Теоретична та експериментальна функції перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами для нафти з Сургутського родовища

Як видно з рис. 3.87–3.91, функція перетворення АВН з КЦС із циліндричними електродами є нелінійною. Чутливість АВН в діапазоні зміни вологості нафтопродуктів від 0 до 20 % складає від 25,7 до 43 кГц/‰.

З рис. 3.82–3.91 видно, що розбіжність теоретичних та експериментальних результатів для АВН є різною при різних значеннях вологості нафтопродуктів  $W$ , але не перевищує 4 %.

Залежність частоти генерації від вологості нафтопродуктів визначається по контуру зворотного струму згідно з еквівалентною схемою (див. рис. 3.75) на основі теорії стійкості Ляпунова.

Функція перетворення АВН на основі структури з двох польових транзисторів описується виразом (3.25)

$$F = \frac{\sqrt{2} \sqrt{LC_{s2}C_i(W,T) \cdot \left( (R_{ds2}^2 C_{ds2} - L) \cdot C_{s2}C_i(W,T) + A_1 + \sqrt{A_2} \right)}}{4\pi LC_i(W,T)C_{s2}R_{ds2}C_{ds2}}, \quad (3.25)$$

де  $A_1 = R_{ds2}^2 C_{ds2}^2 (C_{s2} + C_i(W,T))$ ;

$$\begin{aligned}
A_2 = & R_{ds2}^4 C_{ds2}^2 C_{s2}^2 C_i^2(W, T) + 2R_{ds2}^4 C_{ds2}^3 C_{s2} C_i(W, T)(C_{s2} + C_i(W, T)) - \\
& - 2LR_{ds2}^2 C_{ds2} C_{s2}^2 C_i^2(W, T) + R_{ds2}^4 C_{ds2}^4 (C_{s2}^2 + 2C_{s2} + C_i^2(W, T)) + \\
& + 2LR_{ds2}^2 C_{ds2}^2 C_{s2} C_i(W, T)(C_{s2} + C_i(W, T)) + L^2 C_{s2}^2 C_i^2(W, T).
\end{aligned}$$

На основі виразу (3.25) визначена чутливість АВН на основі структури з двох польових транзисторів

$$S_W^F = \frac{\sqrt{2} \left( LC_{s2} (B_2 + B_1) \frac{\partial C_i(W, T)}{\partial W} + B_6 \left( B_3 \frac{\partial C_i(W, T)}{\partial W} + B_7 \right) \right)}{8 \cdot \left( B_5 \sqrt{B_6 (B_2 + B_1)} - \frac{\sqrt{2} \sqrt{B_6 (B_2 + B_1)} \frac{\partial C_i(W, T)}{\partial W}}{4B_5 C_i(W, T)} \right)}, \quad (3.26)$$

$$\text{де } B_1 = R_{ds2}^2 C_{ds2}^2 (C_{s2} + C_i(W, T)) + (C_{s2} C_i(W, T)) (R_{ds2}^2 C_{ds2} - L);$$

$$B_2 = \sqrt{R_{ds2}^4 C_{ds2}^2 C_{s2}^2 C_i^2(W, T) + 2R_{ds2}^4 C_{ds2}^3 C_{s2} C_i(W, T)(C_{s2} + C_i(W, T)) - 2LR_{ds2}^2 C_{ds2} C_{s2}^2 C_i^2(W, T) + R_{ds2}^4 C_{ds2}^4 (C_{s2}^2 + 2C_{s2} + C_i^2(W, T)) + 2LR_{ds2}^2 C_{ds2}^2 C_{s2} C_i(W, T)(C_{s2} + C_i(W, T)) + L^2 C_{s2}^2 C_i^2(W, T)};$$

$$B_3 = R_{ds2}^2 C_{ds2} C_{s2} + R_{ds2}^2 C_{ds2}^2 - LC_{s2};$$

$$\begin{aligned}
B_4 = & R_{ds2}^4 C_{ds2}^2 C_{s2}^2 (C_i(W, T) + C_{ds2}) - 2LR_{ds2}^2 C_{ds2} C_{s2}^2 C_i(W, T) + \\
& + L^2 C_{s2}^2 C_i(W, T) + R_{ds2}^2 C_{ds2}^2 C_{s2} (2C_i(W, T)(R_{ds2}^2 C_{ds2} + L) + LC_{s2}) + \\
& + R_{ds2}^4 C_{ds2}^4 (C_i(W, T) + C_{s2});
\end{aligned}$$

$$B_5 = \pi LR_{ds2} C_{ds2} C_{s2} C_i(W, T);$$

$$B_6 = LC_{s2} C_i(W, T).$$

$$B_7 = \frac{B_4 \frac{\partial C_i(W, T)}{\partial W}}{B_2}.$$

Графік залежності чутливості від ємності вологочутливих КЦС показаний на рис. 3.92, а від вологості нафти з туркменського родовища з КЦС із циліндричними електродами – на рис. 3.93.

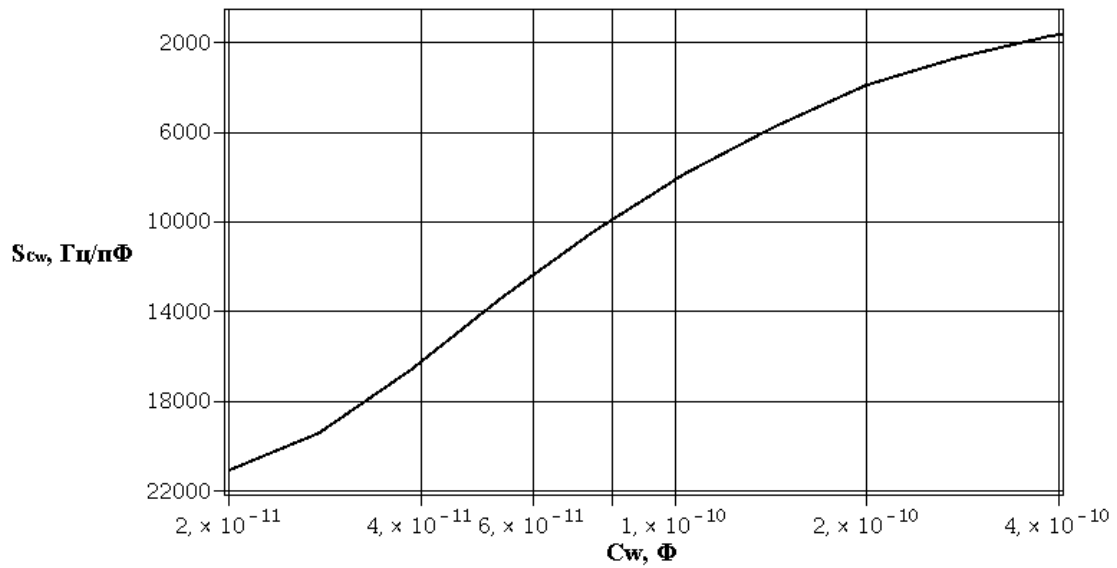


Рисунок 3.92 – Залежність чутливості АВН від зміни ємності вологочутливих КЦС

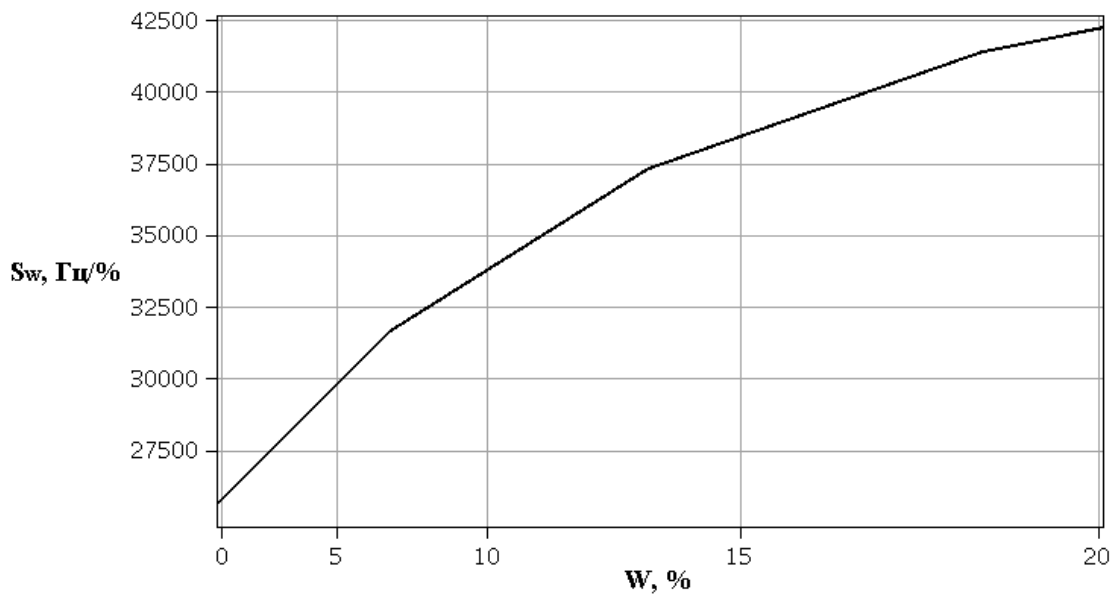


Рисунок 3.93 – Залежність чутливості АВН від зміни вологості нафти з туркменського родовища з КЦС із циліндричними електродами

З рис. 3.93 видно, що зі зміною вологості нафти з туркменського родовища від 0 до 20 % чутливість змінюється від 25900 до 42100 Гц/%.

На рис. 3.94 показано результати моделювання зміни нормованої чутливості  $S_H$  від ємності вологочутливої КЦС, що розрахована на основі виразу (3.17).

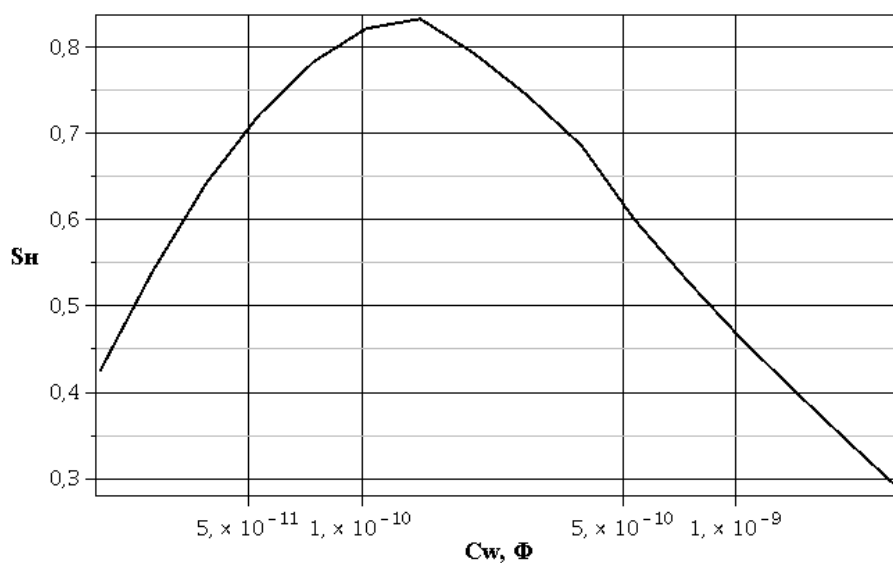


Рисунок 3.94 – Залежність нормованої чутливості АВН від ємності вологочутливої КЦС

Нормована частота  $F_n = 1$  МГц. З рис. 3.94 видно, що найбільше значення нормованої чутливості спостерігається в діапазоні від 25 до 650 пФ, що є оптимальним режимом роботи АВН. В запропонованому АВН для досягнення високої чутливості може бути використана КЦС як з сіткоподібними, так і з циліндричними електродами.

### 3.6 Порівняння розроблених автогенераторних засобів контролю вологості нафтопродуктів

У попередніх підрозділах було проведено дослідження методів побудови генераторів та було визначено, що автогенераторні засоби контролю вологості, побудовані на основі транзисторних структур з від'ємним опором, мають найбільшу чутливість та стабільність у порівнянні з розглянутими генераторами. Було розроблено чотири різні схеми автогенераторних засобів контролю вологості нафтопродуктів на основі конденсаторних циліндричних структур та математичні моделі до них, які дозволили визначити їх параметри та характеристики.

В табл. 3.1 наведено порівняння розроблених автогенераторних засобів контролю вологості нафтопродуктів на основі структур з р-п-р біполярного і двозатворного польових транзисторів, п-р-п біполярного і двозатворного польових транзисторів, біполярного і польового транзисторів та двох польових транзисторів.

Як видно з табл. 3.1, автогенераторний засіб контролю вологості нафтопродуктів на основі структури з двох польових транзисторів має найбільшу чутливість, яка складає з використанням КЦС із сіткоподібними електродами від 15 до 20 кГц/% та КЦС із циліндричними електродами від 25,7 до 43 кГц/%. Однак очевидно, що діапазон вимірювальної ємності у нього є найменшим.

Таблиця 3.1 – Порівняння розроблених автогенераторних засобів контролю вологості нафтопродуктів

Параметр	Автогенераторний засіб контролю вологості нафтопродуктів на основі структури з			
	р-п-р БТ і дво-затворного ПТ	п-р-п БТ і дво-затворного ПТ	БТ і ПТ	двох ПТ
Чутливість, кГц/% з КЦС із сіткопод. електродами з КЦС із циліндр. електродами	0,6...0,85	2,6...4,2	3,3...5,2	15...20
	1,1...1,73	6...10,9	8,5...16,7	25,7...43
Відносна чутливість	0,032	0,21	0,25	0,83
Струм споживання, мА	5	8	10	15
Рівень вихідного сигналу, В	1,6	1,25	1,85	3,1
Діапазон робочих частот, Гц	$10^3 \dots 10^6$	$10^3 \dots 10^7$	$10^3 \dots 10^7$	$10^3 \dots 10^7$
Діапазон зміни вологочутливої ємності, пФ	$10 \dots 1,2 \cdot 10^4$	$10 \dots 10^4$	$10 \dots 4 \cdot 10^3$	$10 \dots 10^3$
Споживана потужність, мВт	8,5	10	27	45

Автогенераторний засіб контролю вологості нафтопродуктів на основі структури з р-п-р біполярного і двозатворного польових транзисторів хоч і має найменшу чутливість, проте володіє найбільшим діапазоном зміни вологочутливої ємності та споживає найменшу потужність. Тобто, вибираючи схему автогенераторного засобу контролю вологості, необхідно керуватись принципом, що чим більша чутливість, тим менший діапазон вимірювальної ємності, і навпаки.

## **4 ЗАСТОСУВАННЯ АВТОГЕНЕРАТОРНОГО ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ НАФТОПРОДУКТІВ В НАФТОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ**

Визначення вологості у нафті та нафтопродуктах, а саме в маслах завжди було однією з головних проблем для фахівців. Вода, яка присутня в гідравлічних і мастильних рідинах, може викликати значні пошкодження технологічних вузлів, які потребують змащування деталей. Без відповідних пристроїв та засобів контролю важко помітити їхнє поточне руйнування. Неперервний контроль необхідний для прийняття успішного рішення щодо зменшення вологості.

Вода, наявна у нафті, сприяє корозії, при її транспортуванні може спотворювати покази витратомірів, а також призводить до передчасного зношення обладнання та виникнення аварійних ситуацій [30]. Більшість фахівців знають про негативні ефекти води в маслах: волога у мастильних матеріалах зменшує міцність плівки, що спричиняє зменшення міцності при стиранні і збільшення корозії; зв'язує деякі домішки і вступає в реакцію з іншими, при цьому отримані продукти реакції можуть бути небезпечні для деяких металів; засмічує фільтри; збільшує всмоктування повітря; збільшує ймовірність кавітації (утворення всередині рідини порожнин, заповнених паром) [124], а в ізоляційних маслах волога в кількості, що перевищує допустиму норму, може привести до передчасного зносу масла та електричного пробою. Залишені без уваги, ці ефекти можуть швидко призвести до серйозних аварій.

У нафтовій промисловості вологоміри використовуються під час індивідуальних вимірювань у свердловинах, групових виробничих вимірюваннях, а також під час контролю зневоднювання сирової нафти в нафтосховищах.

### **4.1 Система вимірювання та контролю кількості і показників якості сирової нафти**

Вимірювання та контроль параметрів нафтопродуктів, зокрема вологості, є необхідною умовою для отримання якісної продукції. На сьогодні використовуються системи вимірювання кількості та параметрів якості сирової нафти (СВКНС), призначені для автоматизованого обліку при здачі товарної нафти від постачальника до споживача, для визначення якісних показників нафти на об'єктах нафтопереробки, а також під час проведення обліково-розрахункових операцій при транспортуванні нафти і нафтопродуктів [125].

СВКНС здійснює автоматичне вимірювання маси (об'єму) нафти, якісних показників нафти (щільності, в'язкості, вологості, тиску, тем-



ператури) та передачу інформації на центральний комп'ютер і наступне відображення її на автоматизованому робочому місці оператора.

СВКНС виготовляються на базі об'ємних, масових або ультразвукових пристроїв витрат нафти. Під час розробки СВКНС враховують вимоги керівних документів щодо обліку нафти, особливості технологічного режиму перекачування і фізико-хімічних властивостей нафти на кожному окремому об'єкті. Комплектація СВКНС, в основному, обумовлена потребами замовника, тому в загальному випадку функціонально СВКНС складається з таких частин: технологічна частина, система обробки інформації (СОІ) та система управління елементами життєзабезпечення (опалення, освітлення, пожежна сигналізація, вентиляція, система контролю загазованості та інше) [126].

На рис. 4.1 показано блок-схему СВКНС. До складу технологічної частини СВКНС входять: блок вимірювання і регулювання, блок фільтрів (БФ) та блок стаціонарної трубопоршневої установки (ТПУ). Блок вимірювання і регулювання в свою чергу включає в себе блок вимірювання показників якості (БВЯ), блок вимірювальних ліній (БВЛ), блок еталонних засобів (БЕЗ), блок перевірконої установки (БПУ), вузли регулювання витрат нафтопродукту і тиску, пробовідбірний пристрій (ПВП), технологічні і дренажні трубопроводи [126].

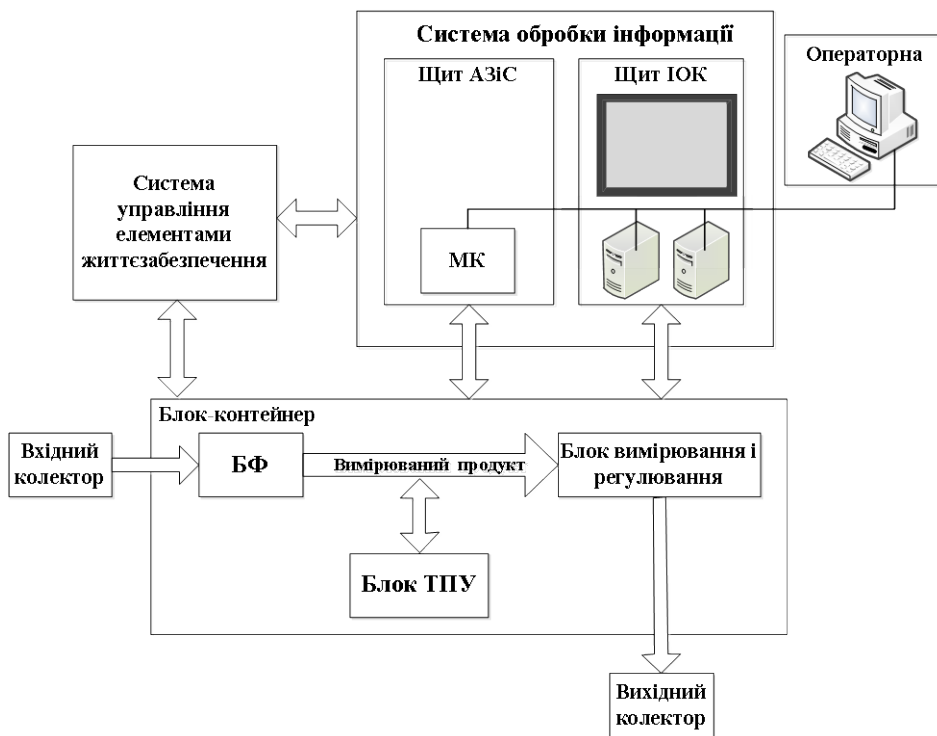


Рисунок 4.1 – Блок-схема СВКНС

СОІ включає в себе операторну та блок обробки інформації, який складається з щита автоматичного захисту і сигналізації (АЗіС) та щита інформаційно-обчислювального комплексу (ІОК).

На рис. 4.2 зображено структурну схему блока вимірювання і регулювання.

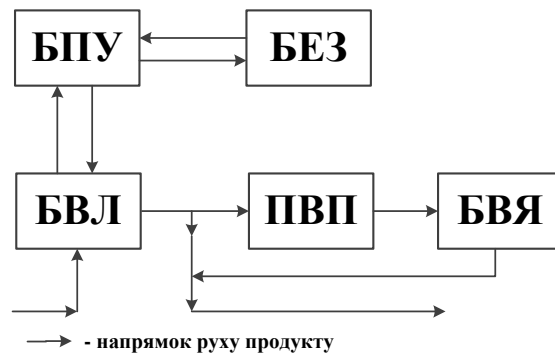


Рисунок 4.2 – Структурна схема блока вимірювання і регулювання

Розглянемо більш детально БВЛ та БВЯ, які зображені на рис. 4.3 та рис. 4.4, відповідно.

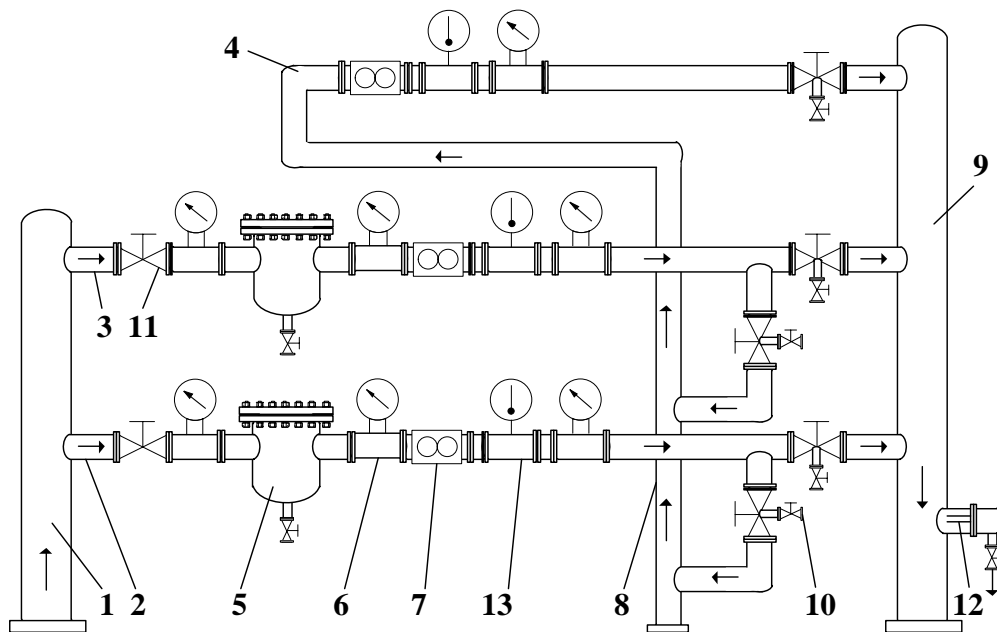


Рисунок 4.3 – Блок вимірювальних ліній: 1 – вхідний колектор; 2 – робоча лінія; 3 – резервна лінія; 4 – контрольна лінія; 5 – сітчастий фільтр; 6 – манометр лабораторний; 7 – витратомір; 8 – контрольний колектор; 9 – вихідний колектор; 10 – візуальний контроль протікання; 11 – запірна арматура; 12 – пробовідбірний пристрій; 13 – вимірювач температури

Розташовані в БВЛ вимірювальна і контрольно-резервна лінії обладнані фільтрами, витратомірами (швидкісними, об'ємними, масовими), вимірювачами тиску і температури. Контрольна лінія фільтрами не обладнується. Запірна арматура (засувки клинові сталеві або крани кульові прохідні) можуть мати ручний або електричний привід [127].

У БВЯ всі прилади монтуються послідовно (у випадку подвійного резервування – паралельно) на лінії якості діаметром 50 мм, що забезпечує байпасування (шлях в обхід) кожного приладу, дренажування (зневоднення шляхом стікання води) газу і рідини, промивання приладів (індивідуальне або спільне), підключення пристрою для визначення вмісту вільного газу (ПВВГ) або пікнометричної установки. До складу БВЯ може входити система промивання приладів, що включає в себе ємність для промивної рідини, циркуляційний насос і трубку обв'язку. БВЯ випускається в укритті (блоці-боксі із системою життєзабезпечення) [127].

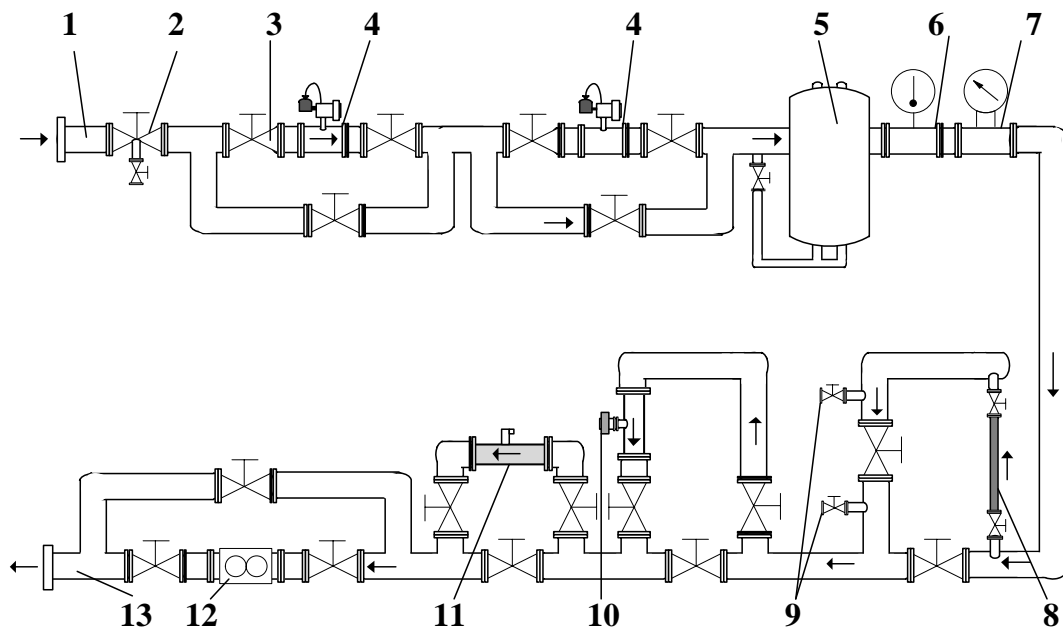


Рисунок 4.4 – Блок вимірювання показників якості:

- 1 – нафта від пробовідбірного пристрою; 2 – пробовідбірник ручний;
- 3 – запірні арматура; 4 – пробовідбірник автоматичний;
- 5 – циліндр термостатувальний для ареометра;
- 6 – вимірювач температури; 7 – манометр лабораторний;
- 8 – проточний датчик густини; 9 – місце підключення пікнометра або ПВВГ; 10 – віскозиметр; 11 – АВН; 12 – витратомір;
- 13 – вихід нафти у вихідний колектор БВЛ

Можливе виготовлення сполученого блока, що включає в себе БВЛ і БВЯ, які змонтовані на єдиній рамі й у загальному укритті (блоці-боксі із системою життєзабезпечення) [125].

Отже, як ми бачимо, АВН є невід'ємною частиною блока вимірювання параметрів якості нафти, а, значить, і СВКНС. В блоці вимірювання параметрів якості нафти як проточний вологомір може бути використано як вологочутлива КЦС з сіткоподібними електродами [97, 105], так і вологочутлива КЦС із циліндричними електродами [96, 104] у поєднанні з АВН. Використання розроблених АВН у блоці вимірювання параметрів якості нафти можливе не лише в якості проточних вологомірів, але й під час аналізу відібраних проб, внаслідок ручного та автоматичного відбору.

СВКНС забезпечує виконання в автоматичному режимі вимірювання й обчислення миттєвих і середніх значень за певний період: масових та об'ємних витрат нафти через БВЛ і БВЯ, густини нафти через БВЛ, температури та тиску в БВЛ, БВЯ і СВКНС в цілому, маси нафти, об'ємної й масової долі води в нафті по кожній вимірювальній лінії [127].

СВКНС здійснює [126]:

- автоматичний відбір проби пропорційно обсягові нафти, що перекачується, або пропорційно часу, ручний відбір точкової проби; автоматизоване виконання режиму контролю метрологічних характеристик робочих витратомірів по контрольній лінії без порушення процесу вимірювання і без порушення роботи нафтопроводу;
- гарантоване перекриття потоку і наявність пристрою контролю витоку нафти;
- контроль перепаду тиску на фільтрах (місцевий і дистанційний);
- автоматичний контроль, індикацію і сигналізацію граничних значень параметрів (витрати нафти по кожній вимірювальній лінії, густини нафти, вільного газу в нафті, тиску і температури по кожній вимірювальній лінії, перепаду тиску на фільтрах, вміст об'ємної та масової частки води в нафті);
- індикацію даних вимірювання маси і масової витрати по кожній вимірювальній лінії і СВКНС у цілому, значень температури і тиску нафти в БВЯ, густини нафти, вмісту вологості з виведенням на дисплей;
- визначення маси нетто з використанням значень складового баласту, отриманих в аналітичній лабораторії з використанням результатів вимірювань поточного вологоміра (якщо маса нетто не визначена в автоматичному режимі);
- реєстрацію результатів вимірювань та їхнє збереження на період не менше одного року;

- автоматичне (програмне) і ручне керування автоматичним пробовідбірником;
- керування запірною арматурою;
- перевірку робочого витратоміра за контрольно-резервним;
- формування звітів журналів показників засобів вимірювання, актів прийому-здачі нафти, паспорта якості нафти й інших необхідних документів з обліку нафти за заданий інтервал часу і по партіях нафти в автоматичному режимі та по запиту відповідно до рекомендацій з визначення маси нафти при облікових операціях із застосуванням СВКНС;
- автоматичний облік подій системи (аварійні сигнали, повідомлення про помилки й відмови системи та її елементів).

Від вимірювання вологості нафти залежить точність визначення маси нафти, а отже і її витрат. В табл. 4.1 наведено допустимі межі основної відносної похибки СВКНС у залежності від вмісту води у сирій нафті [128].

Таблиця 4.1 – Допустимі межі основної відносної похибки СВКНС

Вміст води у сирій нафті, об'ємна доля, %	Допустимі межі основної відносної похибки СВКНС вимірювання маси нафти, %
до 5	+/- 0,35
до 10	+/- 0,4
до 20	+/- 1,5
до 50	+/- 2,5
до 70	+/- 5,0
до 85	+/- 15,0
Примітка. При вмісті води в сирій нафті більше 85 % рекомендується забезпечити попередній злив води.	

#### 4.2 Розробка мікропроцесорної системи контролю вологості нафтопродуктів

Розглядаючи сучасний етап розвитку техніки, можна зазначити, що в різноманітні її галузі інтенсивно і досить глибоко проникають мікропроцесори. Вони не тільки радикально перетворюють властивості багатьох пристроїв, а і відкривають нові можливості їх використання. Контрольно-вимірювальна техніка по широті і ефективності використання мікропроцесорів займає одне із перших місць.

Розвиток методів сучасної техніки неможливий без створення складних автоматизованих вимірювальних систем. Великий обсяг ви-

мірювальних операцій і їх трудомісткість змушують приділяти значну увагу автоматизації процесу вимірювання.

Високий рівень автоматизації процесу вимірювання став можливий із застосуванням сучасних електронно-обчислювальних засобів, міні- та мікроЕОМ, сполучених з вимірювальними приладами або вбудованих в них. Взаємодія приладів і ЕОМ здійснюється через пристрої сполучення – інтерфейси ЕОМ. ЕОМ забезпечують: підвищення продуктивності процесу вимірювання завдяки автоматизації керування приладами; збільшення точності вимірювань; обробку експериментальних даних і їх виведення для індикації або реєстрації [129].

Використання вбудованих мікропроцесорів істотно спрощує роботу з приладами. Мікропроцесорні системи стали частиною електронних вимірювальних приладів, які застосовуються для вимірювання параметрів електричних сигналів, а також неелектричних фізичних величин. Використання мікропроцесорів у вимірювальній техніці в багато разів підвищило точність приладів, значно розширило їх функціональні можливості, спростило керування їх роботою, підвищило надійність, швидкодію, привело до створення програмованих, повністю автоматизованих приладів. Завдяки застосуванню мікропроцесорів стало можливим створення вимірювально-обчислювальних комплексів – автоматизованих засобів вимірювань, призначених для дослідження, контролю та випробувань складних об'єктів [130].

Мікропроцесорна система, введена до складу багатofункціонального засобу вимірювання, перетворює його в програмно-керований пристрій. Функціональні можливості такого пристрою визначаються записаною програмою і можуть бути легко змінені при переході до іншої програми, що зберігається в постійному запам'ятовувальному пристрої.

Підвищення точності вимірювальних приладів досягається за рахунок автоматичної компенсації (виключення) систематичної похибки, зокрема автоматичної установки нуля перед початком вимірювань, автоматичного виконання градууювальної операції (самокалібрування), здійснення самоконтролю, зменшення впливу випадкових похибок через проведення багатократних вимірювань з подальшим усереднюванням їх результатів.

При виконанні непрямих вимірювань мікропроцесорна система автоматично, відповідно до заданої програми, обробляє режими вимірювань, запам'ятовує результати прямих вимірювань, проводить необхідні обчислення і виводить знайдене значення виміряної фізичної величини на пристрої відображення інформації. Хоча вимірювання за своєю природою залишаються непрямыми, експериментатор сприймає їх як прямі.

Функціональні можливості вбудованих у прилади обчислювальних засобів безперервно розширюються з розвитком елементної бази цифрової техніки, особливо мікропроцесорів.

На сьогодні мікроконтролери дають змогу з мінімальними затратами реалізувати велику номенклатуру систем управління різноманітними об'єктами і процесами, водночас інтегруючи на одному кристалі високопродуктивний процесор, пам'ять, а також набір периферійних пристроїв. Саме завдяки цьому мікроконтролери досить широко використовуються в промисловій автоматичній, контрольно-вимірювальній техніці, апаратурі зв'язку, побутовій техніці тощо [131]. Окрім того, збільшення швидкодії (підвищення тактової частоти та вдосконалення архітектури), зниження напруги живлення, збільшення оперативної та *FLASH* пам'яті на кристалі з можливістю внутрішньосхемного програмування, введення в склад мікропроцесора складних периферійних блоків, таких як керування приводами, *USB*-інтерфейсу для можливості спільного функціонування з новими поколіннями персональних комп'ютерів та швидкодійних зовнішніх периферійних пристроїв, є основними напрямками однокристальних мікроЕОМ.

Авторами розроблено систему для вимірювання та контролю вологості нафти та нафтопродуктів, структурна схема якої показана на рис. 4.5. Система працює таким чином: зміна вологості досліджуваної рідини приводить до зміни ємності КЦС, і, відповідно, до зміни частоти коливань на виході ЧГВО, далі сигнал «оцифровується» і на екрані виводиться значення вологості.

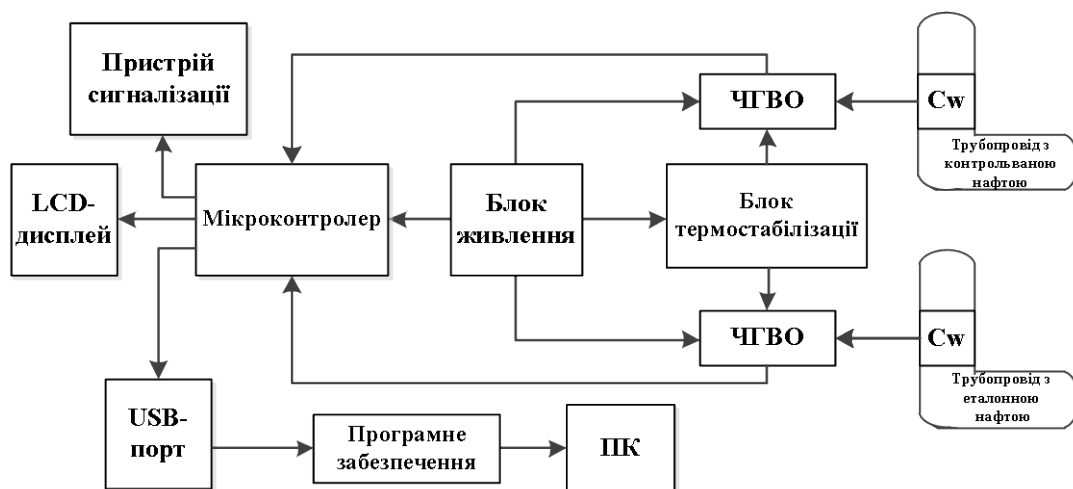


Рисунок 4.5 – Структурна схема системи для вимірювання та контролю вологості нафти та нафтопродуктів

За допомогою цієї системи можна здійснювати не лише вимірювання і зберігання значень вологості протягом певного часу, а й контроль допустимого значення вологості, що задається виконуваною програмою. При перевищенні допустимого значення вологості спрацьовує пристрій сигналізації і виводиться повідомлення, що нафтопродукт не відповідає допусковому значенню (на екрані користувач бачить напис «норма» або «ненорма»).

Принципова схема структурної схеми (див. рис. 4.5), показана на рис. 4.6, складається з 8-розрядного мікропроцесора з *USB* інтерфейсом *PIC18F4550* фірми *Microchip* [131], кварцового генератора, блока живлення, *LCD*-дисплея *WH1602C-YGH-СТК*, також містить систему термостабілізації. Система термостабілізації складається з першого термодатчика, який встановлюється разом з АВН і контролює значення температури АВН в межах  $53\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Якщо температура стає меншою за  $52,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то вмикається нагрівальний елемент і АВН нагріваються до  $53,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Другий та третій термодатчики встановлюються на вологочутливі КЦС для врахування впливу температури, а саме для вибору певної функції перетворення з переліку тих, які прописані у програмі при різних температурах. Використовувані термодатчики *DS18B20* підключаються паралельно.

Інформація з АВН, чутливі елементи яких (КЦС) встановлені у трубопроводі таким чином, що один знаходиться у вимірювальній лінії, а інший – у еталонній, через вхідні вузли надходить до мікроконтролера, де відбувається вимірювання частот та вираховується їхня різниця. Результат різниці частот цих сигналів, на основі функції перетворення, записаній у мікроконтролері, вказує на процентний вміст води в нафті. Індикація результатів вимірювання вологості можлива в двох варіантах: перший – за допомогою *LCD*-дисплея *WH1602C-YGH-СТК*, другий – на екрані монітора ЕОМ.

В системі для вимірювання та контролю вологості нафти та нафтопродуктів використовується АВН на основі структури з двох польових транзисторів із КЦС із циліндричними електродами (можливе використання і КЦС з сіткоподібними електродами), оскільки він має найбільше значення чутливості серед розроблених АВН.

Особливо хочеться підкреслити, що застосування розробленої авторами системи дає змогу отримати частотний сигнал, що при необхідності може бути ефективно переданий по безпроводному каналу на відстань, наприклад, з середини технологічного приміщення до операторної.



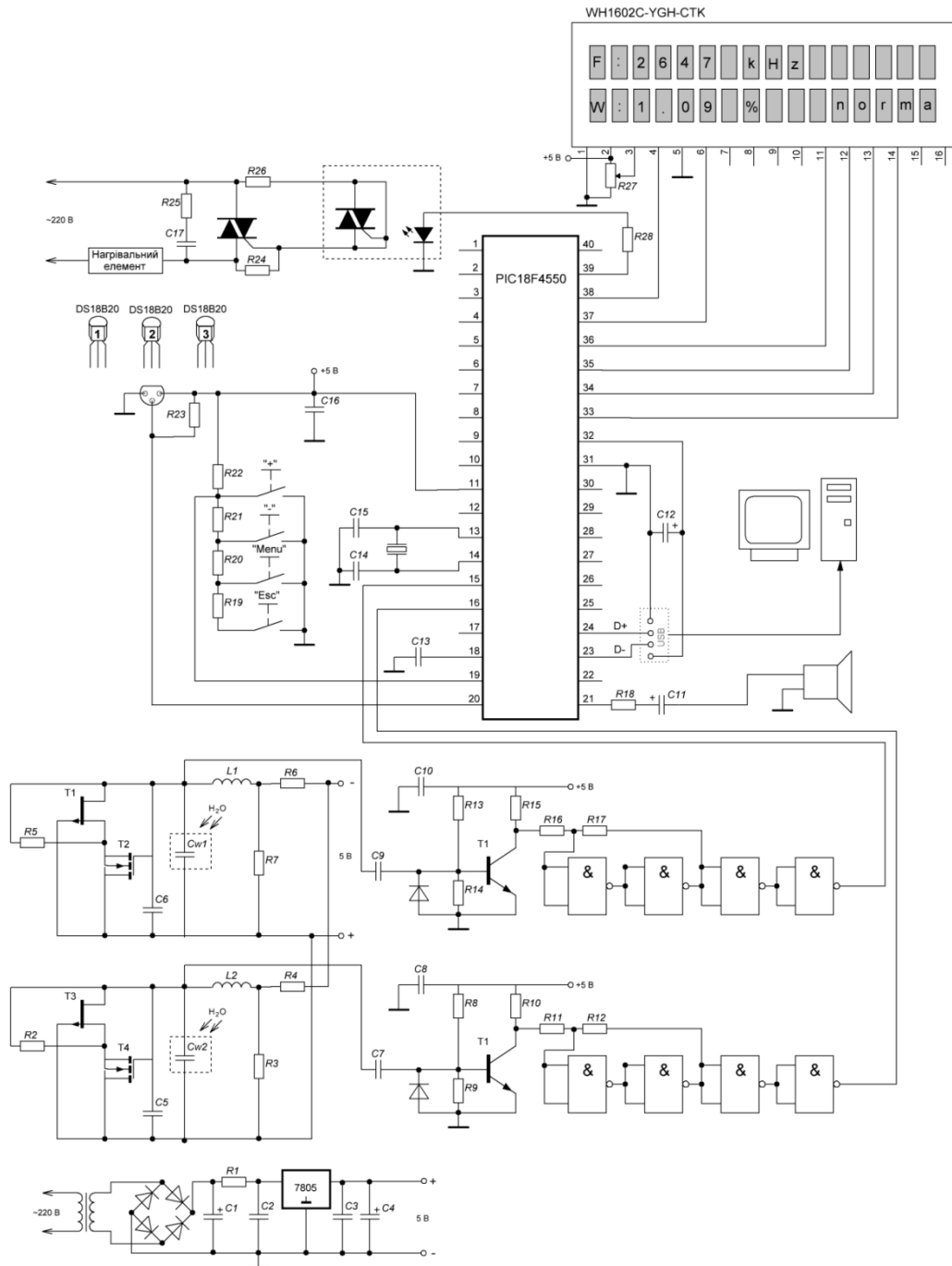


Рисунок 4.6 – Принципова схема системи контролю вологості нафти та нафтопродуктів

На рис. 4.7–4.11 показані отримані апроксимовані залежності функцій перетворення, а саме частоти генерації АВН на основі структури з двох польових транзисторів із КЦС з сіткоподібними електродами в якості вологочутливого елемента від вологості нафтопродуктів.

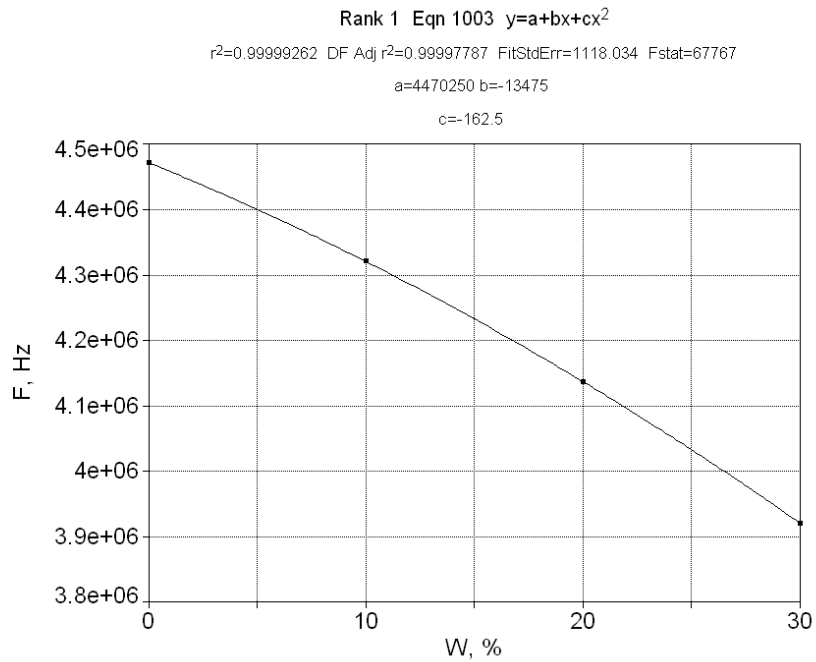


Рисунок 4.7 – Апроксимована залежність функції перетворення АВН із КЦС з сіткоподібними електродами для напівсинтетичного моторного масла 5W40

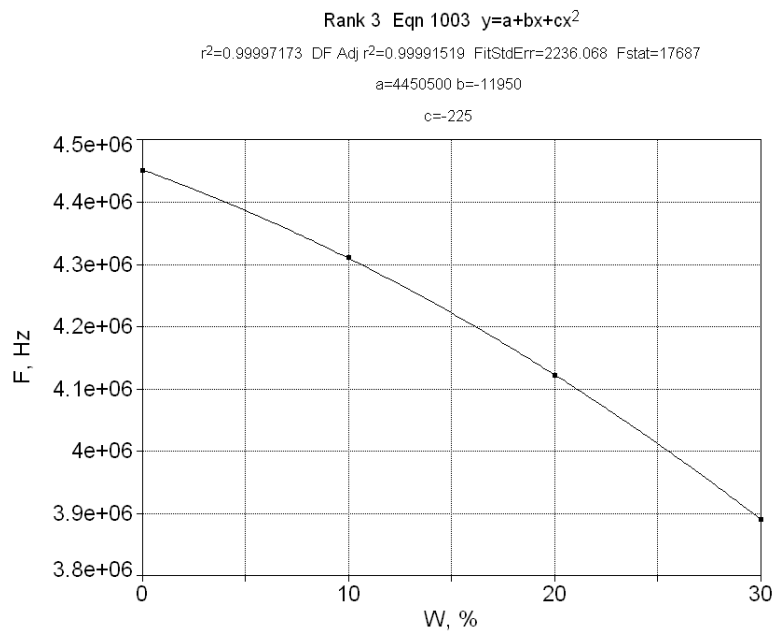


Рисунок 4.8 – Апроксимована залежність функції перетворення АВН із КЦС з сіткоподібними електродами для мінерального моторного масла M8V

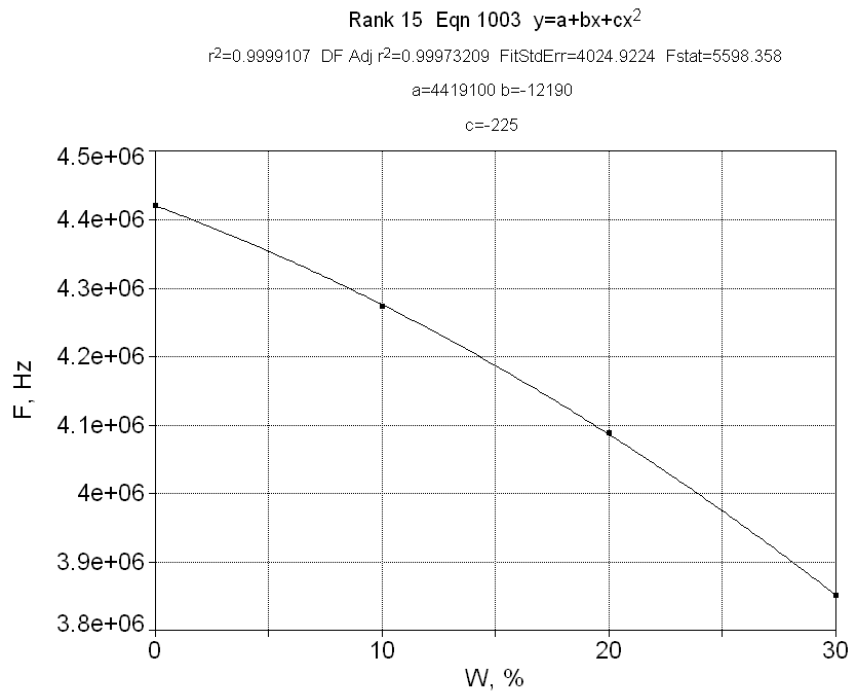


Рисунок 4.9 – Апроксимована залежність функції перетворення АВН із КЦС з сіткоподібними електродами для трансформаторного масла Т-1500

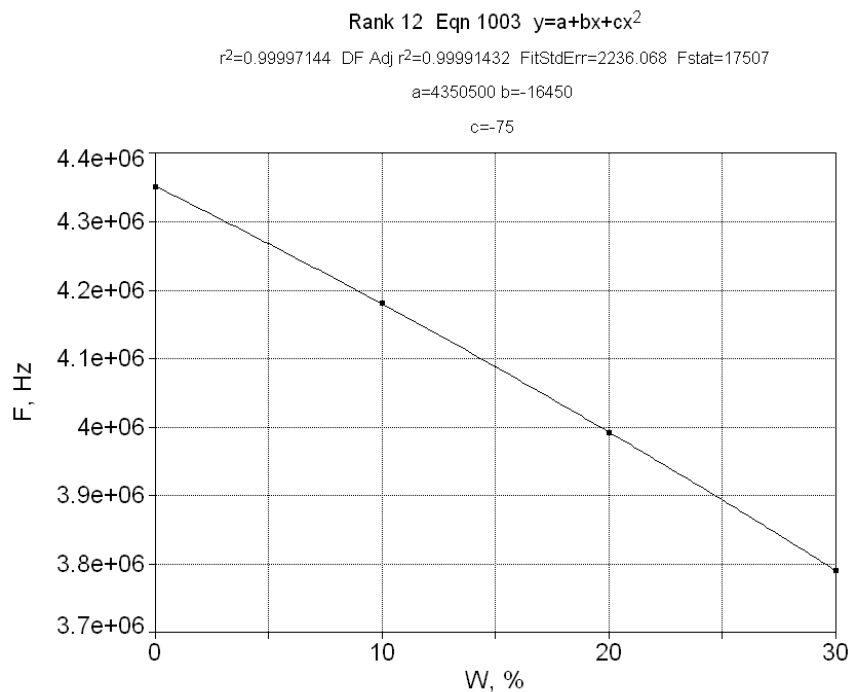


Рисунок 4.10 – Апроксимована залежність функції перетворення АВН із КЦС з сіткоподібними електродами для нафти з туркменського родовища

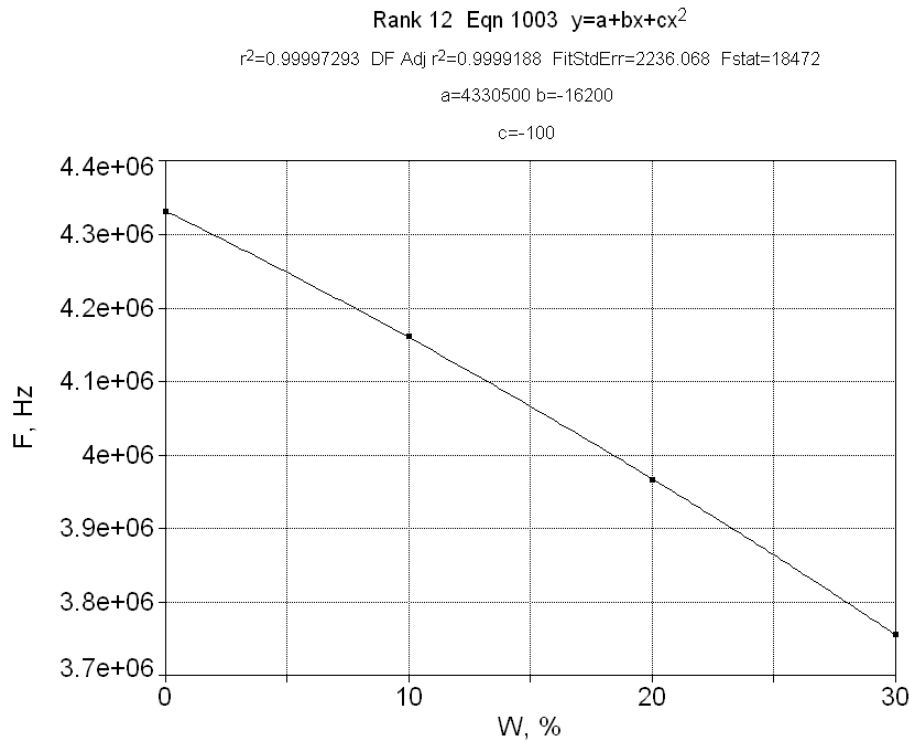


Рисунок 4.11 – Апроксимована залежність функції перетворення АВН із КЦС з сіткоподібними електродами для нафти з Сургутського родовища

Ці залежності описуються аналітично функцією виду

$$y = a + bx + cx^2, \quad (4.1)$$

де  $y$  – визначений параметр (частота генерації);  $x$  – параметр впливу (вологість);  $a, b, c$  – коефіцієнти.

На рис. 4.12–4.16 показані отримані апроксимовані залежності функцій перетворення, а саме частоти генерації АВН на основі структури з двох польових транзисторів із КЦС з циліндричними електродами в якості вологочутливого елемента від вологості нафтопродуктів.

Ці залежності описуються аналітично функцією виду

$$y = a + bx + cx^2 + dx^3, \quad (4.2)$$

де  $y$  – визначений параметр (частота генерації);  $x$  – параметр впливу (вологість);  $a, b, c, d$  – коефіцієнти.

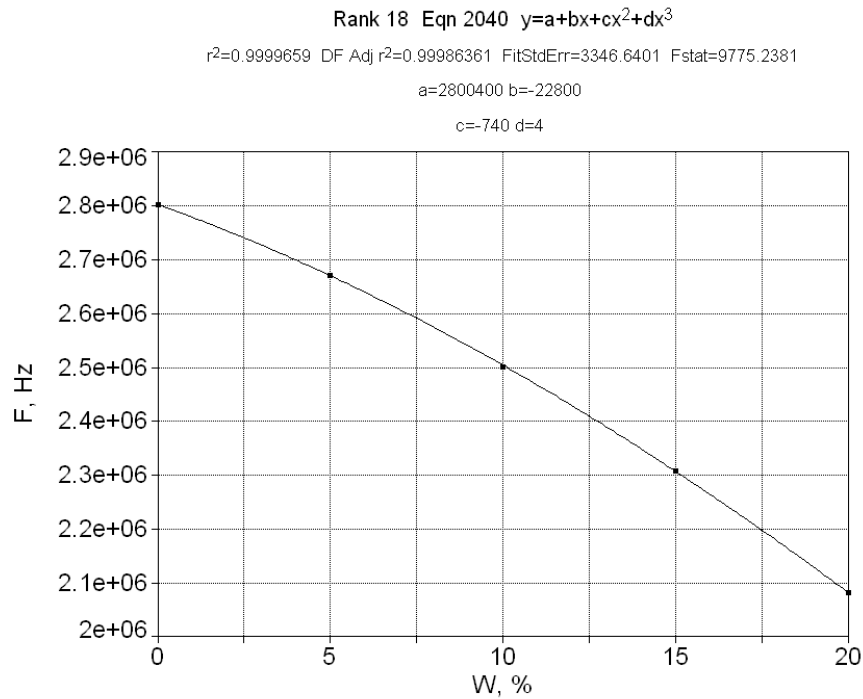


Рисунок 4.12 – Апроксимована залежність функції перетворення АВН із КЦС з циліндричними електродами для напівсинтетичного моторного масла 5W40

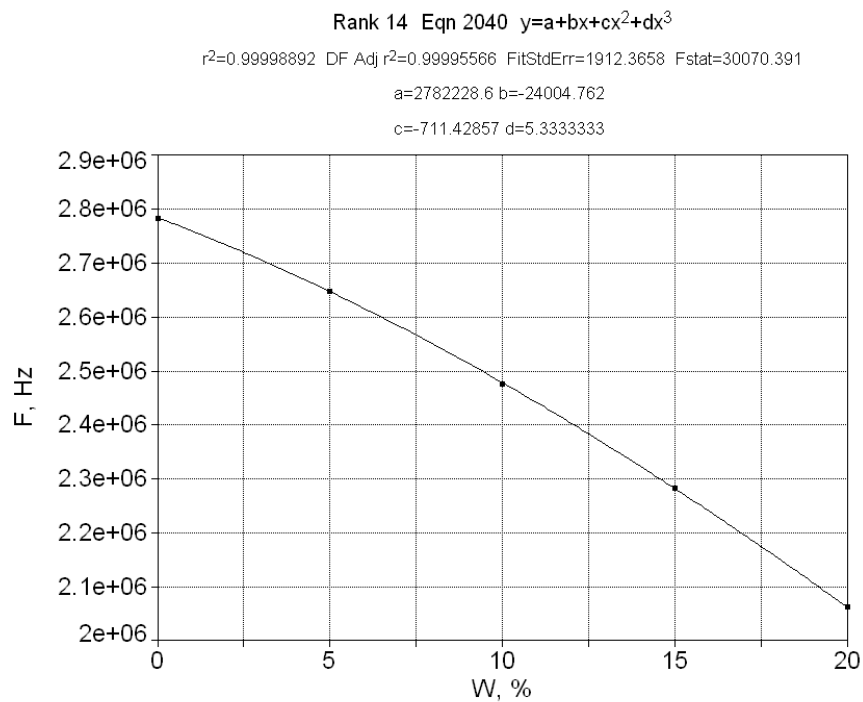


Рисунок 4.13 – Апроксимована залежність функції перетворення АВН із КЦС з циліндричними електродами для мінерального моторного масла M8V

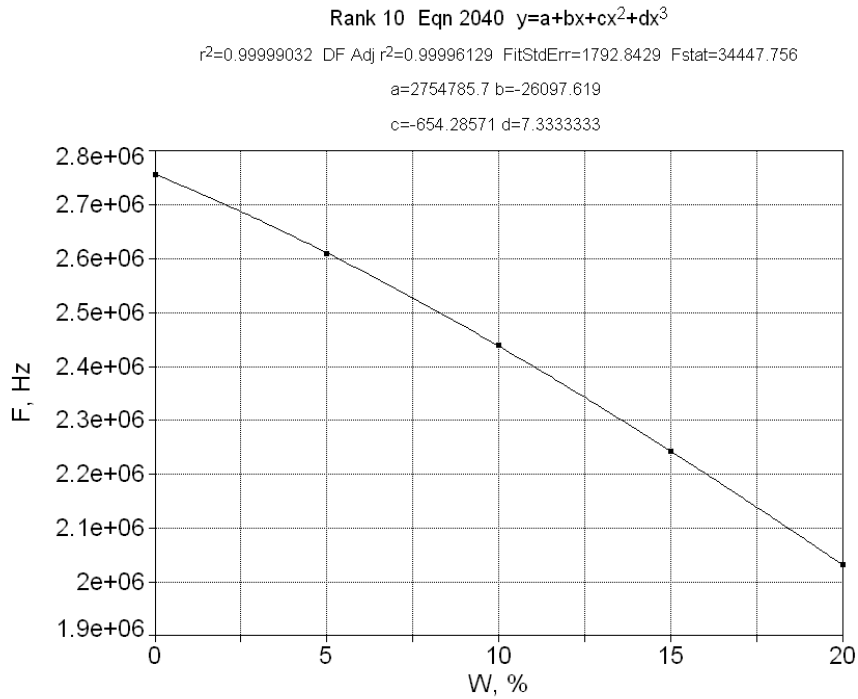


Рисунок 4.14 – Апроксимована залежність функції перетворення АВН із КЦС з циліндричними електродами для трансформаторного масла Т-1500

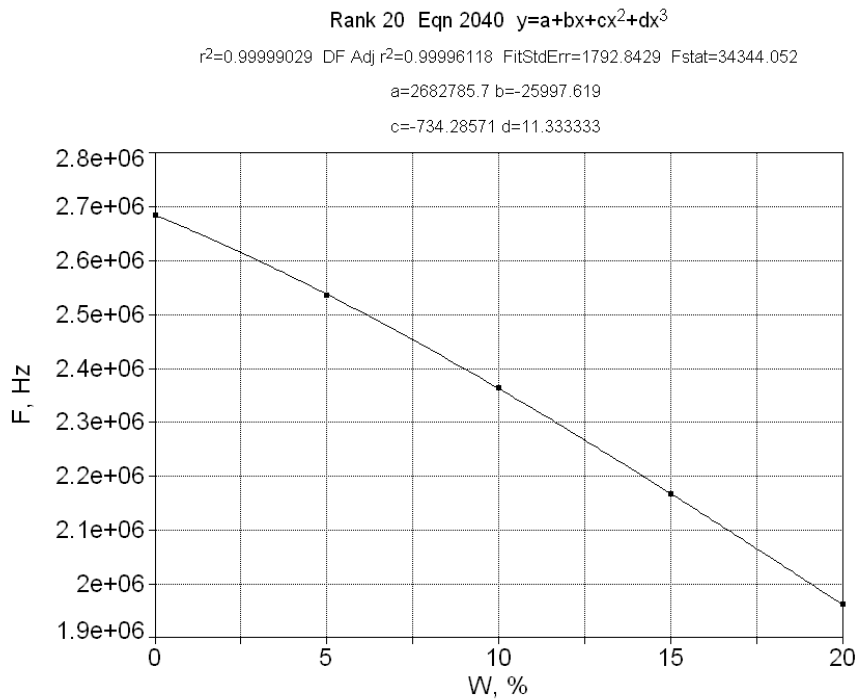


Рисунок 4.15 – Апроксимована залежність функції перетворення АВН із КЦС з циліндричними електродами для нафти з туркменського родовища

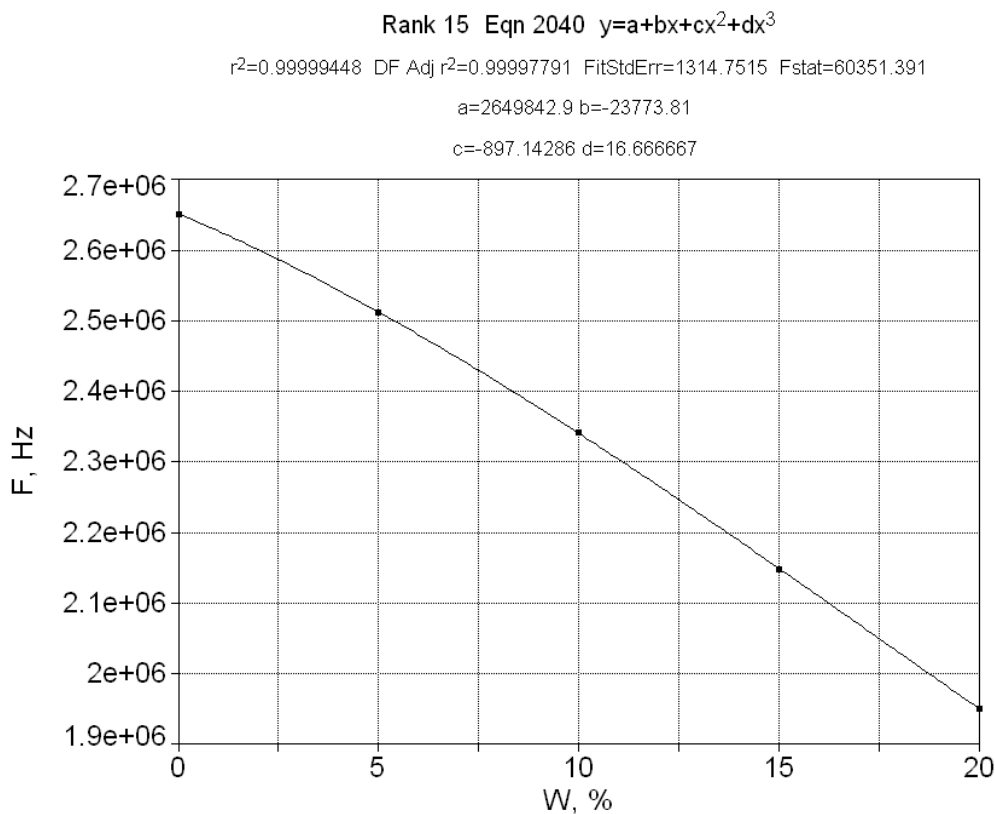


Рисунок 4.16 – Апроксимована залежність функції перетворення АВН із КЦС з циліндричними електродами для нафти з Сургутського родовища

### 4.3 Розрахунок похибок автогенераторних засобів контролю вологості нафтопродуктів

Вимірювання фізичних величин є основою наукових експериментів в різноманітних галузях людської діяльності. Велика роль вимірювань у забезпеченні ефективності технологічних процесів. При вимірюванні фізичних величин необхідно чітко розмежовувати поняття вимірюваного та істинного значень величини. Якими б точними не були засоби та методи вимірювання, між істинним та виміряним значеннями завжди буде певна розбіжність, тобто буде присутня похибка вимірювань. Причиною появи похибок може бути недосконалість методів та засобів вимірювання, особливості сприйняття результату експериментатором, а також зміна умов навколишнього середовища. Вимірювання на практиці вважається закінченим, якщо визначено не лише результат вимірювання, а й значення відхилення цього результату від істинного значення вимірюваної величини [132–134].

Для визначення похибки вимірювання автогенераторних засобів контролю вологості нафтопродуктів потрібно врахувати похибки, а саме ті, що виникають, по-перше, при перетворенні неелектричної величини (вологості нафтопродукту) в електричну (ємність КЦС), по-друге, при перетворенні електричного сигналу в частотно-модульований сигнал, що виникають у ЧГВО, та, по-третє, при перетворенні частотно-модульованого сигналу в цифровий код, що виникають із застосуванням мікропроцесорів.

При використанні вологочутливої КЦС в результаті перетворення неелектричної величини (вологості нафтопродукту) в електричну (ємність) виникає похибка через зміну температури досліджуваної речовини  $\delta_{ТКС}$ , яка показує зміну величини ємності у відсотках при зміні температури на 1 °С.

$$\delta_{ТКС} = \frac{\Delta T' \cdot \Delta C}{C \cdot \Delta T} \cdot 100 \% , \quad (4.3)$$

де  $\Delta T$  – зміна температури, °С;  $\Delta C$  – зміна ємності вологочутливого сенсора при  $\Delta T$ , Ф;  $C$  – початкова ємність вологочутливого сенсора, Ф;  $\Delta T'$  – можливе відхилення температури в системі, °С.

Так, для вологочутливого ємнісного сенсора з циліндричними електродами ємність при  $T = 10$  °С складає 148 пФ, а при  $T = 100$  °С – 154 пФ. Звідси випливає, що

$$\delta_{ТКС} = \frac{5 \cdot (154 - 148) \cdot 10^{-12}}{148 \cdot 10^{-12} \cdot (100 - 10)} \cdot 100 \% = 0,225 \% .$$

В результаті перетворення електричного сигналу в частотно-модульований сигнал виникають похибки, пов'язані з нестабільністю частоти генератора  $\delta_1$  і з коливанням напруги живлення АВН  $\delta_U$  та температури навколишнього середовища  $\delta_T$ .

Розглянемо похибки, які виникають в результаті зміни частоти генерації з коливанням напруги живлення для АВН на основі структури з двох польових транзисторів з КЦС із циліндричними електродами.

Для визначення похибки зміни частоти генерації з коливанням напруги живлення  $\delta_U$  необхідно знати, наскільки змінюється частота генерації при зміні напруги живлення на 1 %. В цьому випадку напруга живлення складає  $U_1 = U_2 = 3$  В, тоді 1 % зміна напруги буде рівна 0,03 В, а це відповідає зміні частоти генерації на 2700 Гц. З врахуван-



ням вищенаведених величин похибка коливання напруги живлення становитиме

$$\delta_U = \frac{f_1}{f_H} \cdot 100 \%, \quad (4.4)$$

де  $f_1$  – частота генерації при 1 %-й зміні напруги живлення, Гц;  $f_H$  – несуча частота, Гц.

$$\delta_U = \frac{2700 \cdot 100 \%}{2800000} = 0,1 \%.$$

Для стабілізації напруги живлення використано стабілізатор напруги *LM7805*. Лінійна стабілізація *LM7805* становить 5 мВ [135], їй відповідає зміна частоти генерації 290 Гц:

$$\delta_U = \frac{290 \cdot 100 \%}{2800000} = 0,01 \%. \quad (4.5)$$

Наведені розрахунки доводять, що використання стабілізатора напруги значно зменшить коливання напруги живлення і, відповідно, зменшиться похибка коливання напруги живлення з 0,1 до 0,01 %.

Визначимо похибку коливання температури навколишнього середовища  $\delta_T$ :

$$\delta_T = \frac{f_T}{f_H} \cdot 100 \%, \quad (4.6)$$

де  $f_T$  – частота генерації при зміні температури навколишнього середовища на 1 °С, Гц.

В цьому випадку зміні температури навколишнього середовища на 1 °С при несучій частоті 2800 кГц відповідає частота 7300 Гц:

$$\delta_T = \frac{7300}{2800000} \cdot 100 \% = 0,26 \% .$$

При використанні запропонованої термостабілізації (див. рис. 4.6) можна досягнути зміни температури навколишнього середовища в

межах 0,1 °С, при цьому частота вихідного сигналу буде змінюватись на 1450 Гц. Тоді  $\delta_T$  набуває значення

$$\delta_T = \frac{1450}{2800000} \cdot 100 \% = 0,05 \% .$$

Розрахунки доводять, що використання термостабілізації значно зменшить вплив температури навколишнього середовища на роботу АВН і, відповідно, зменшиться похибка коливання температури навколишнього середовища з 0,26 до 0,05 %.

Оцінка похибки вимірювання, яка виникає через нестабільність частоти генератора  $\delta_1$ , визначається згідно з виразом:

$$\delta_1 = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\rho^2 A_0}{(R'_g)^2} \left[ \frac{\frac{1}{3} Q a_1 a_2 + \frac{A_0^2}{192} (27 Q a_1 a_2 - 32 a_2^2) + \frac{A_0^2}{20} (8 Q a_1 a_4 + 5 a_2 a_3)}{\omega_0} + \frac{\frac{A_0^2}{24} (5 Q a_1 a_5 - 8 a_2 a_4)}{\omega_0} \right], \quad (4.7)$$

де  $\rho$  – характеристичний опір контуру,  $\rho = \left( \frac{L}{C} \right)^{1/2}$ ;  $L$  – зовнішня індуктивність;  $C$  – еквівалентна ємність транзисторної структури;  $A_0$  – відносне значення амплітуди коливань у нульовому наближенні:

$$A_0 = \sqrt{\frac{-3a_3 + \sqrt{9a_3^2 - 40 \cdot Q \cdot a_5 \left( a_1 + \frac{R'_g}{R_H} + \frac{R_L R'_g}{\rho^2} \right)}}{5a_5}}; \quad (4.8)$$

$R'_g$  – диференційний від'ємний опір,  $R'_g = \frac{U_{\min}}{I_{\max}}$ ;  $\frac{R'_g}{R_H} = 2$ ,  $R_L$  – опір індуктивного елемента;  $Q$  – добротність контуру, ( $Q = 150$ );  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  – коефіцієнти апроксимації, які визначаються з системи рівнянь (4.9).

$$\left\{ \begin{array}{l}
a_1 = -2S_1(1-\gamma) - 4S_2(1-\gamma)^3 - 6S_3(1-\gamma)^5; \\
a_2 = S_1 + 6S_2(1-\gamma)^2 + 15S_3(1-\gamma)^4; \\
a_3 = 4S_2(1-\gamma) - 20S_3(1-\gamma)^3; \\
a_4 = S_2 + 15S_3(1-\gamma)^2; \\
a_5 = -6S_3(1-\gamma), a_6 = S_3; \\
S_1 = \frac{\alpha(2-3\beta^2) - \beta^6(1-\alpha)}{\beta^2(1-\beta^2)^2}; \\
S_2 = \frac{2\beta^6(1-\alpha) - \alpha(1-3\beta^4)}{\beta^4(1-\beta^2)^2}; \\
S_3 = \frac{\alpha(1-\beta^2)^2 - \beta^4}{\beta^4(1-\beta^2)^2};
\end{array} \right. \quad (4.9)$$

де  $\alpha = (I_{\max} - I_{\min}) / I_{\max}$ ;  $\beta = (U_{\min} - U_{\max}) / U_{\min}$ ;  $\gamma = U_0 / U_{\min}$ ;  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$  – максимальне та мінімальне значення струму на спадній ділянці статичної ВАХ АВН;  $U_{\max}$ ,  $U_{\min}$  – напруги, які відповідають  $I_{\max}$  та  $I_{\min}$ ;  $U_0$  – напруга зміщення, яка відраховується від початку координат (див. рис. 3.61);  $\omega_0$  – циклічна частота,  $\omega_0 = 1 / \sqrt{LC}$ .

Згідно з виразами (4.8) та (4.9) розраховано числові значення параметрів:

$$\begin{aligned}
a_1 &= -3,185; & a_2 &= -2,023; & a_3 &= 23,098; & a_4 &= -5,585; & a_5 &= -30,471; \\
a_6 &= S_3 = 17,716; & S_1 &= 9,704; & S_2 &= -27,423; & A_0 &= 0,634; & \alpha &= 0,9969; \\
\beta &= 0,476; & \gamma &= 0,713; & R'_g &= 6461 \text{ Ом}; & \rho &= 276 \text{ Ом}; & R_L &= 13,7 \text{ Ом}; \\
\omega_0 &= 17251630 \text{ Гц}.
\end{aligned}$$

З врахуванням значень, розрахованих на основі виразів (4.8), (4.9), похибка вимірювання (4.7), яка виникає в результаті нестабільності частоти генератора, становить  $\delta_1 = 1,355 \cdot 10^{-5} \%$ .

Розглянемо похибки, які виникають в результаті перетворення частотно-модульованого сигналу в цифровий код, що виникають із застосуванням мікропроцесорів, а саме похибку квантування  $\delta_{кч}$ , по-

хибку малозначущого розряду  $\delta_{МЗР}$  та похибку нестабільності кварцевого генератора  $\delta_{НКГ}$ .

Оскільки мікропроцесор використовується в режимі роботи частотоміра, тому визначимо похибку квантування частотоміра  $\delta_{КЧ}$  для часу вимірювання  $t_{вим} = 0,1$  с.

Похибка квантування визначається виразом [136]

$$\delta_{КЧ} = \frac{1}{f_{\chi} \cdot t_{вим}} \cdot 100 \%, \quad (4.10)$$

де  $f_{\chi}$  – вимірювана частота, що відповідає верхній межі 2800 кГц для схеми АВН на основі структури з двох польових транзисторів з КЦС із циліндричними електродами.

Згідно з виразом (4.10), розраховане значення похибки квантування частотоміра набуває значення  $\delta_{КЧ} = 3,57 \cdot 10^{-6} \%$ .

Похибка малозначущого розряду  $\delta_{МЗР}$  виникає при виконанні обчислювальних операцій через обмеженість розрядності мікропроцесора [137]:

$$\delta_{МЗР} = 2^{-n} \cdot 100 \%, \quad (4.11)$$

де  $n$  – розрядність мікропроцесора; якщо  $n = 16$ , тоді похибка малозначущого розряду  $\delta_{МЗР}$  становить

$$\delta_{МЗР} = 2^{-16} \cdot 100 \% = 1,53 \cdot 10^{-3} \% .$$

Похибка нестабільності кварцевого генератора для даного приладу складає  $\delta_{НКГ} = 3 \cdot 10^{-3} \%$ .

Результативна похибка визначається виразом [138]

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_{ТКС}^2 + \delta_U^2 + \delta_T^2 + \delta_1^2 + \delta_{МЗР}^2 + \delta_{НКГ}^2 + \delta_{КЧ}^2} . \quad (4.12)$$

На основі виразів (4.3)–(4.11) отримані значення статичних похибок для кожного з варіантів включення АВН (стабілізованого та нестабілізованого), наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Похибки засобу контролю вологості нафтопродуктів

Вид похибки	Значення похибки для кожної з схем, %	
	нестабілізована схема	стабілізована схема
1. Температурна нестабільність ємності КЦС $\delta_{\text{ТКС}}$	0,225	0,225
2. Девіація параметрів джерела живлення $\delta_{\text{У}}$	0,1	0,01
3. Температурна залежність ЧГВО $\delta_{\text{Т}}$	0,26	0,05
4. Власна нестабільність ЧГВО $\delta_1$	$1,355 \cdot 10^{-5}$	$1,355 \cdot 10^{-5}$
5. Похибка міри частотоміра $\delta_{\text{НКГ}}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
6. Похибка квантування $\delta_{\text{КЧ}}$	$3,57 \cdot 10^{-6}$	$3,57 \cdot 10^{-6}$
7. Похибка розрядності $\delta_{\text{МРЗ}}$	$1,53 \cdot 10^{-3}$	$1,53 \cdot 10^{-3}$
<b>Сумарна похибка <math>\delta_{\Sigma}</math></b>	<b>0,36</b>	<b>0,23</b>

Згідно з виразом (4.12) розрахована систематична складова основної похибки, яка становить  $\delta_{\Sigma} = 0,23\%$ . Граничне значення систематичної складової основної похибки набуває значення:  $\pm 3 \delta_{\Sigma} = \pm 0,69\%$ .

Якщо вимірюваною величиною є функція часу, то внаслідок інерційності засобів вимірювання та інших причин виникає динамічна похибка засобів вимірювання, яка є складовою загальної похибки. Для розроблених АВН час включення складає близько 20 нс, тому динамічна похибка, що виникає в результаті зміни вологості нафтопродуктів, на п'ять порядків менша, ніж статичні похибки самого приладу. В цьому випадку динамічні похибки не чинять суттєвого впливу на результативну похибку приладу, тому в роботі вони не розглядаються.

Для розробленого автогенераторного засобу контролю вологості нафтопродуктів було також розраховано значення мультиплікативної та адитивної похибок на основі рівнянь [40]

$$\Delta_m = \alpha W (k - k_n); \quad (4.13)$$

$$\Delta_a = \beta (k - k_n) + \dot{\beta} (k - k_n)^2, \quad (4.14)$$

де  $\Delta_m$  – мультиплікативна похибка;  $\Delta_a$  – адитивна похибка;  $\alpha$ ,  $\beta$  – коефіцієнти [40];  $\dot{\beta}$  – коефіцієнт впливу впливових величин на вихідний параметр [40].

Розраховані мультиплікативна та адитивна похибки показані на рис. 4.17, 4.18

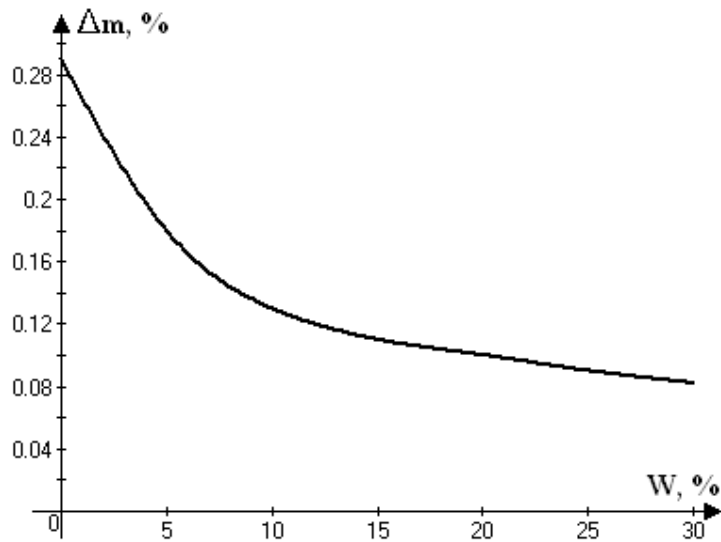


Рисунок 4.17 – Мультиплікативна похибка

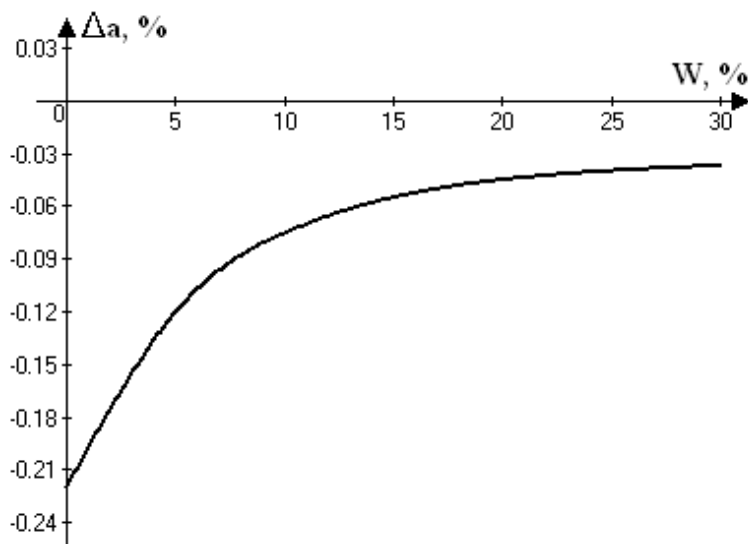


Рисунок 4.18 – Адитивна похибка

З рис. 4.17, 4.18 видно, що мультиплікативна похибка не перевищує значення  $\Delta_m = 0,29$  %, а адитивна  $\Delta_a = 0,22$  %.

Порівняння існуючих приладів для вимірювання вологості нафтопродуктів з розробленими показано у табл. 4.3.

#### 4.4 Оцінювання вірогідності контролю вологості нафтопродуктів

Вірогідність вимірювального контролю вологості нафтопродуктів відображає ступінь об'єктивності отриманих результатів вимірювань в порівнянні з істинним значенням вимірюваної величини. Розглянемо інструментальну вірогідність контролю [139]

$$D_I = 1 - \alpha - \beta, \quad (4.15)$$

де  $\alpha$  – помилка першого роду;  $\beta$  – помилка другого роду.

При помилці першого роду вологість нафтопродукту визнається такою, що не відповідає допустимим межам значення вологості, хоча насправді нафтопродукт задовольняє вимоги (ризик виробника).

При помилці другого роду вологість нафтопродукту визнається такою, що відповідає допустимим межам значення вологості, хоча насправді нафтопродукт є непридатним (ризик замовника).

Контрольованим параметром у цій роботі є значення вологості нафтопродуктів. Вимірявши розробленим приладом  $N$  разів вологість туркменської нафти із дійсним значенням  $W = 10\%$  (рис. 4.19), побудуємо гістограму частот ймовірностей значень вологості туркменської нафти та ймовірностей значень похибок (рис. 4.20), де  $W$  та  $\Delta W$  – інтервали значень вологості нафти та похибки вимірювання,  $P_W$  та  $P_{\Delta W}$  – відносні частоти значень вологості нафти та похибки вимірювання, які потрапляють в заданий інтервал.

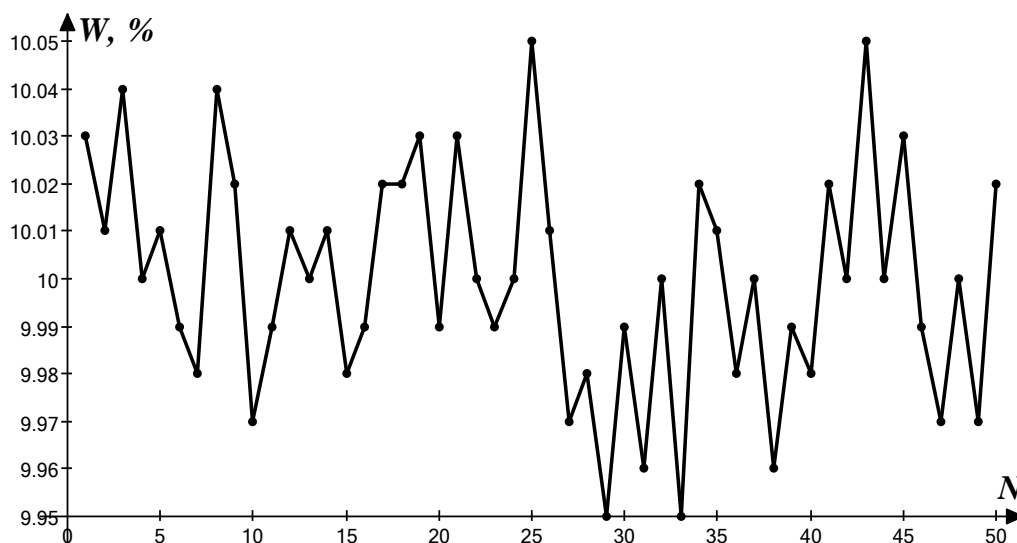


Рисунок 4.19 – Графічне представлення виміряних значень вологості туркменської нафти

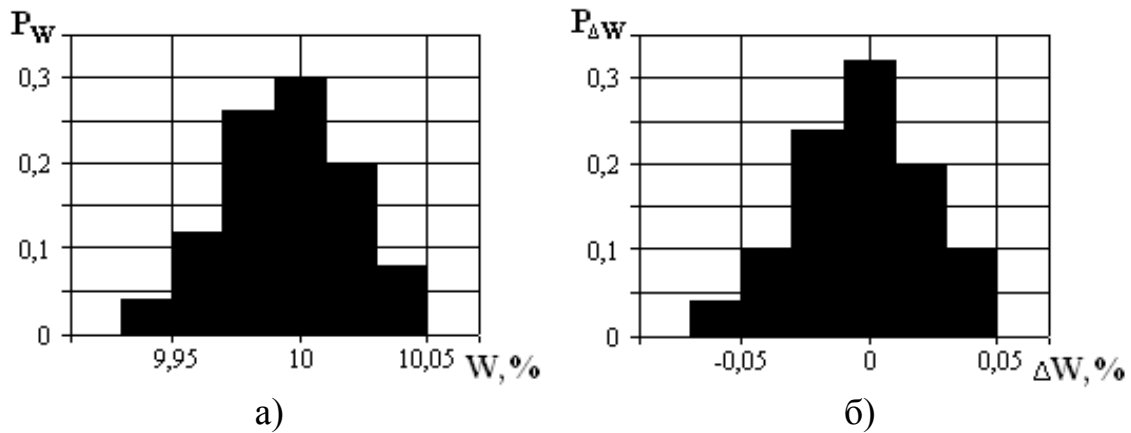


Рисунок 4.20 – Гістограми частот: а) ймовірностей значень вологості туркменської нафти, б) ймовірностей значень похибок вимірювання

Значення вологості нафти та похибок вимірювання розподілені за нормальним законом і описуються рівняннями

$$f(W) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_W} \cdot e^{-\frac{(W-\bar{W})^2}{2\cdot\sigma_W^2}}; \quad (4.16)$$

$$y(\Delta W) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta W}} \cdot e^{-\frac{(\Delta W-\bar{\Delta W})^2}{2\cdot\sigma_{\Delta W}^2}}, \quad (4.17)$$

де  $\sigma_W$ ,  $\sigma_{\Delta W}$  – середнє квадратичне відхилення значення вологості та похибки вимірювання.

На рис. 4.21 показано графічне представлення функцій  $f(W)$  та  $y(\Delta W)$ .

Перевірка того, що значення вологості нафти і похибки вимірювання дійсно розподілені за нормальним законом, було здійснено за допомогою критерію  $\chi^2$  Пірсона [133]. Відповідно, помилки першого та другого роду визначаються з рівнянь [139]

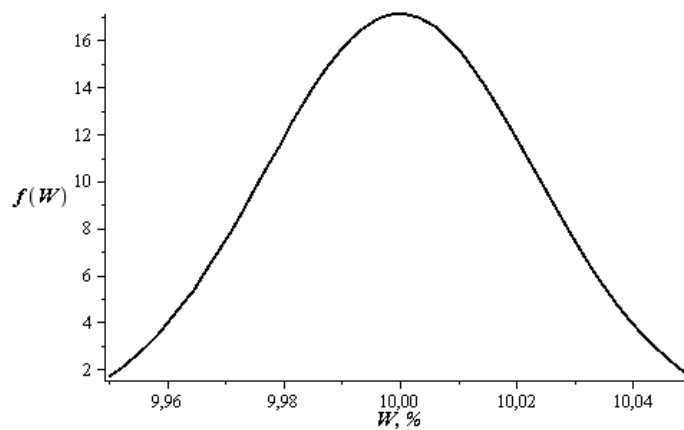
$$\alpha = \int_{W_A}^{W_B} f(W) \left[ \int_{W_A-\Delta W}^{W_A} y(\Delta W) d\Delta W + \int_{W_B}^{W_B+\Delta W} y(\Delta W) d\Delta W \right] dW; \quad (4.18)$$



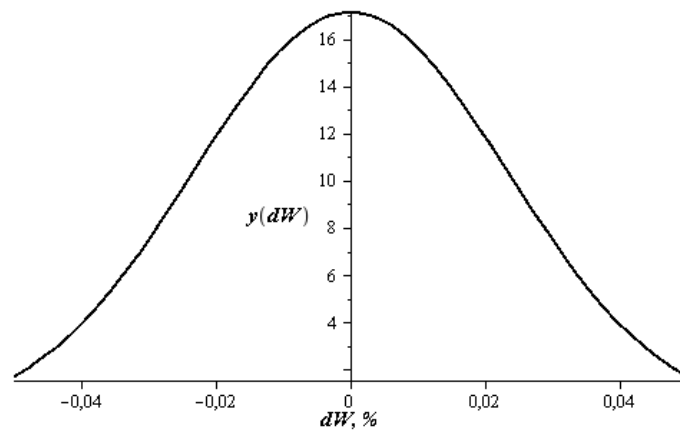
$$\beta = \int_{W_B}^{W_B + \Delta W} f(W) \left[ \int_{W_B - \Delta W}^{W_B} y(\Delta W) d\Delta W \right] dW +$$

$$+ \int_{W_A - \Delta W}^{W_A} f(W) \left[ \int_{W_B - \Delta W}^{W_B} y(\Delta W) d\Delta W \right] dW, \quad (4.19)$$

де  $W_A$ ,  $W_B$  – границі допуску вологості нафти.



а)



б)

Рисунок 4.21 – Функції щільності розподілу ймовірностей:  
а) вологості нафти, б) похибок вимірювання

Границі допуску вологості нафти задамо у межах 5 % відхилення від дійсного значення вологості ( $W = 10\%$ ):  $W_A = 9,5\%$ ,  $W_B = 10,5\%$ . Підставляючи задані значення у рівняння (4.18) та (4.19), отримаємо значення  $\alpha = 0,0283$  та  $\beta = 0,0126$ . Згідно з виразом (4.15) інструментальна вірогідність контролю  $D_I = 0,96$ .

Таблиця 4.3 – Порівняння існуючих приладів для вимірювання вологості нафтопродуктів з розробленими

Тип датчику	ВАД-40М	ВСН-1	УДВН-1 ПМ2	ІВН-2002	RED EYE 2G	WCM-7300-330	LC2	ЧПВН 3 КЦС
Країна виробник	Росія	Росія	Росія	Росія	США	США	США	Україна
Діапазон вимірювання вологості, %	0...100	0...100	0,01...10	0,5...19,5	0...100	0...5	0...20	0...30
Струм споживання, мА	35	50	90	40	250	250	300	15
Напруга живлення, В	6	220	220	220	10-30	18-32	220	3
Вихідний сигнал	0...10 В 4...20 мА	4-20 мА ПП 16...5000Гц	4...20 мА ПП 0...1,5 В	0...4 В 0...5 мА	4...20 мА	4...20 мА	4...20 мА	3,1 В
Діапазон температур, °С	+15...+35	+5...+60	+5...+50	+10...+45	-40...+65	-20...+70	-23...+55	-10...+70
Відносна чутливість	0,01	0,009	0,002	0,005	0,03	0,08	0,04	0,83
Маса, не більше, кг	2,5 (без ПП)	19	20	3,2	12	20,4	121,5	2,5
Час вимірювання, с	0,5	1	-	2	1	-	0,5	$10^{-4} \dots 10^{-6}$
Вартість, грн	40000	54000	171000	180000	16000	24500	-	3000
Абсолютна похибка, %	0,5...2,5	2,5... 4	0,15	0,2	2	0,05	0,2	0,01...0,05
Розміри, см ПП, БЕ	-, 22,5x11x6	43xø16, 30x27x7,5	26x21x7, 49x31x14	40x4x20, 13x5x18	32,5xø2,5, 25x14x5	0,5xø7,6, 81x20x33	45xø2,5, 14x18x10	4xø5, 12x7x4
Діапазон роб. частот, Гц	$0 \dots 10^6$	$0 \dots 10^6$	$0 \dots 10^6$	$0 \dots 10^6$	$0 \dots 10^6$	$0 \dots 10^6$	$0 \dots 10^9$	$10^3 \dots 10^7$
Комплексний показник технічного рівня	2,25	2,07	2,19	2,17	2,1	2,08	2,16	1,72

## ЛІТЕРАТУРА

1. Мікроелектронні сенсори фізичних величин : науково-навчальне видання / [В. Вуйцік, З. Ю. Готра, В. В. Григор'єв та ін.] ; під ред. З. Ю. Готри. – [том 1]. – Львів : Ліга-Прес, 2002. – 475 с. – ISBN 966-7483-78-9.
2. Пат. 34264 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 25/56. Сенсор вологості / З. Ю. Готра, О. З. Готра, К. Камуда, І. Є. Дубницька ; заявник та патентовласник держ. ун-т «Львівська політехніка». – № 99063429; заявл. 18.06.1999; опубл. 15.02.2001; Бюл. № 1.
3. Пат. 37047 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 25/56. Сенсор вологості / З. Ю. Готра, О. М. Мельник ; заявник та патентовласник держ. ун-т «Львівська політехніка». – № 2000031459; заявл. 14.03.2000; опубл. 16.04.2001; Бюл. № 3.
4. Пат. 34240 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 25/56. Сенсор вологості / З. Ю. Готра, О. З. Готра, К. Камуда, І. Є. Дубницька ; заявник та патентовласник держ. ун-т «Львівська політехніка». – № 99063374; заявл. 17.06.1999; опубл. 15.02.2001; Бюл. № 1.
5. Пат. 70166 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 25/56. Термопарний вологомір / Ю. О. Скрипник, В. Р. Курко, М. О. Суглоба ; заявник та патентовласник Київський нац. ун-т технологій та дизайну. – № 20031212734; заявл. 29.12.2003; опубл. 15.09.2004; Бюл. № 9.
6. Пат. 47924 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 25/56. Термоелектричний спосіб контролю вологості газових середовищ / Ю. О. Скрипник, В. Р. Курко ; заявник та патентовласник Київський нац. ун-т технологій та дизайну. – № 2001117580; заявл. 06.11.2001; опубл. 15.07.2002; Бюл. № 7.
7. Пат. 17937А УКРАЇНА, МКІ G 01 N 22/04. Спосіб дистанційного вимірювання вологості твердих матеріалів та пристрій для його здійснення / Ю. О. Скрипник, А. О. Потапов, І. С. П'ятін ; заявник та патентовласник Держ. акад. легкої пром-ті України. – № 94020511; заявл. 14.05.1993; опубл. 31.10.1997; Бюл. № 5.
8. Пат. 38067 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 22/04. Мікрохвильовий вимірювач вологості / Ю. О. Скрипник, І. М. Марченко ; заявник та патентовласник Київ. нац. ун-т технологій та дизайну – № 2000052974; заявл. 24.05.2000; опубл. 15.05.2001; Бюл. № 4.
9. Осадчук В. С. Сенсори вологості : навч. посіб. / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 208 с. – ISBN 966-641-055-9
10. Осадчук В. С. Напівпровідникові перетворювачі інформації : навч. Посіб. / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : ВНТУ, 2004. – 208 с.

11. Пат. 46385 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/12. Вимірювач вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик ; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № 2001074689; заявл. 05.07.2001; опубл. 15.05.2002; Бюл. № 5.

12. Пат. 46483 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/12. Напівпровідниковий пристрій для виміру вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик ; заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. – № 2001075284; заявл. 24.07.2001; опубл. 15.05.2002; Бюл. № 5.

13. Пат. 33118 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 5/00. Напівпровідниковий датчик вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Е. В. Осадчук. ; заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. – № 98126388; заявл. 03.12.1998; опубл. 15.02.2001; Бюл. № 1.

14. Пат. 46381 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/12. Мікроелектронний давач вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук ; заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. - №2001074675; заявл. 05.07.2001; опубл. 15.05.2002; Бюл. № 5.

15. Пат. 33120 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 5/00. Пристрій для вимірювання вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Е. В. Осадчук ; заявник та патентовласник Вінн. держ. техн. ун-т. – № 98126390; заявл. 03.12.1998; опубл. 15.02.2001; Бюл. № 1.

16. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / О. В. Осадчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. – 303 с.

17. Пат. 43044 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 5/00. Мікроелектронний пристрій для виміру вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук ; заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. – № 2001010072; заявл. 03.01.2001; опубл. 15.11.2001; Бюл. № 10.

18. Пат. 49542 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/22. Ємнісний датчик вологості сипких матеріалів / О. В. Заболотний, В. А. Заболотний, М. Д. Кошовий ; заявник та патентовласник Харківський авіаційний ін-т. – № 2001128984; заявл. 25.12.2001; опубл. 16.09.2002; Бюл. № 9.

19. Пат. 48596 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/22. Ємнісний вимірювальний перетворювач / О. В. Заболотний, В. А. Заболотний, М. Д. Кошовий. ; заявник та патентовласник Харківський авіац. ін-т. – № 2001107200; заявл. 23.10.2001; опубл. 16.08.2004; Бюл. № 8.

20. Пат. 51222 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/22. Ємнісний датчик вологості / О. В. Заболотний, В. А. Заболотний, М. Д. Кошовий ; заявник та патентовласник Харківський авіац. ін-т. – № 2002020867; заявл. 04.02.2002; опубл. 15.10.2004; Бюл. № 10.

21. Пат. 62125 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/22. Ємнісний датчик вологості / О. В. Заболотний, М. Д. Кошовий, В. А. Заболотний ; заявник

та патентовласник Харківський авіац. ін-т. – № 2002120070; заявл. 13.12.2002; опубл. 15.12.2003; Бюл. № 12.

22. Пат. 53186 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/22. Ємнісний вимірювач вологості матеріалів / О. В. Заболотний, М. Д. Кошовий, В. А. Заболотний ; заявник та патентовласник Харківський авіац. ін-т. – № 2002042547; заявл. 01.04.2002; опубл. 15.01.2003; Бюл. № 1.

23. Пат. 69824 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/22. Датчик вологості нафтопродуктів / О. В. Заболотний, М. Д. Кошовий, Р. А. Казимов ; заявник та патентовласник Харків. авіац. ін-т. – № 20031211248; заявл. 09.12.2003; опубл. 15.09.2004; Бюл. № 9.

24. Пат. 33704 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/22. Первинний вимірювальний перетворювач вологості нафтопродуктів / О. В. Заболотний ; заявник та патентовласник Харків. авіац. ін-т. – № u200802016; заявл. 18.02.2008; опубл. 10.07.2008; Бюл. № 13.

25. Куцевол О. М. Радіочастотні методи вимірювання вологості зерна / О. М. Куцевол, В. О. Поджаренко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 3. – С. 5–7. – ISSN 1997-9266.

26. Пат. 75443 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/22. Спосіб вимірювання вологості капілярно-пористих матеріалів / В. О. Поджаренко, М. О. Куцевол, О. М. Куцевол ; заявник та патентовласник Вінницький держ. техн. ун-т. – № 2004031485; заявл. 01.03.2004; опубл. 17.04.2006; Бюл. № 4.

27. Куцевол О. М. Мікропроцесорний вологомір зерна / В. О. Поджаренко, М. О. Куцевол, О. М. Куцевол // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 4. – С. 16–18. – ISSN 1997-9266.

28. Пат. 68386 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 25/66. Спосіб визначення точки роси природного газу по волозі та пристрій для його здійснення / І. О. Дубчак, А. І. Лур'є, М. Ф. Ткаченко, О. Л. Швейкін, В. П. Плехоткін, О. В. Хвостова ; заявник та патентовласник Український наук.-досл. ін-т природних газів. – № 2001021175; заявл. 19.02.2001; опубл. 16.08.2004; Бюл. № 8.

29. Пат. 80214 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 25/66. Пристрій для визначення температури точки роси природного газу / А. І. Лур'є, В. П. Плехоткін, О. В. Хвостова, М. Ф. Ткаченко, О. О. Острожинський ; заявник та патентовласник дочірнє підприємство «Наук.-досл. ін-т нафтогаз. пром-ті». – № a200602141; заявл. 27.02.2006; опубл. 27.08.2007; Бюл. № 13.

30. Лур'є А. Й. Система контролю за вологістю природного газу. Організація та основні напрями діяльності / А. І. Лур'є, О. В. Хвостова // Нафтова і газова промисловість. – 2009. – № 2. – С. 60–62.

31. Грушка І. Г. Методи і засоби вимірювання вологості матеріалів та середовищ / І. Г. Грушка // Наук.праці УкрНДГМІ. – 2005. – № 254. – С. 169–187.
32. Пат. 84682 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 22/00, G 01 N 27/02, G 01 N 27/12, G 01 N 27/22. Волоконно-оптичний вологомір / І. Г. Грушка, Я. І. Грушка ; заявник та патентовласник І. Г. Грушка, Я. І. Грушка. – № а200500714; заявл. 26.01.2005; опубл. 25.11.2008; Бюл. № 22.
33. Пат. 3044 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/22. Чутливий конденсаторний елемент пристрою безперервного контролю вологості нафтопродуктів / А. П. Козлов, Є. І. Малаховський, Е. Е. Ефендієв ; заявник та патентовласник Центр дослід. і впрров. наук.-тех. розробок. – № 2003109717; заявл. 29.10.2003; опубл. 15.10.2004; Бюл. № 10.
34. Пат. 50133 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/22. Пристрій для безперервного контролю вологості нафтопродуктів, які транспортуються трубопроводом / А. Ш. Башхалієв, Є. І. Малаховський, А. П. Козлов, М. С. Якіменко, Г. П. Хотульов, О. Т. Богорош ; заявник та патентовласник Держ. наук.-виробниче під-во «Прилади, автоматика, системи». – № 2001106942; заявл. 12.10.2001; опубл. 15.10.2002; Бюл. № 10.
35. Датчики измерительных систем. / [Ж. Аш, П. Андре, Ж. Бофрон и др.] ; пер. с фран. А. С. Обухов. – Книга 2. – М. : Мир, 1992. – 424 с. – ISBN 5-03-001642-2.
36. Виглеб Г. Датчики / Г. Виглеб ; пер. с нем. М. А. Хацериова. – М. : Мир, 1989. – 196 с. – ISBN 5-03-000634-6.
37. Берлинер М. А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. – М. : Энергия, 1973. – 400 с.
38. Пат. 2130606 Российская Федерация, МКІ G 01 N 27/22. Устройство для измерения влажности сыпучих веществ / В. Ф. Калугин ; заявитель и патентообладатель Калугин В. Ф. – № 98105331/25; заявл. 23.03.1998; опубл. 20.05.1999; Бюл. № 14.
39. Пат. 2135984 Российская Федерация, МКІ G 01 N 22/04. Способ определения влагосодержания потока нефти одного месторождения / Г. Н. Ахобадзе ; заявитель и патентообладатель Ин-т проблем управления РАН. – № 98110768/09; заявл. 04.06.1998; опубл. 27.08.1999; Бюл. № 24.
40. Осадчук В. С. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі: навч. посіб. / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. Г. Вербицький. – Вінниця : ВНТУ, 2001. – 195 с.
41. Осадчук В. С. Напівпровідникові прилади з відємним опором : навч. посіб. / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 162 с.
42. Негатроника / [С. А. Гаряинов, А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, Н. А. Филинук.] – Новосибирск : Наука, 1995. – 320 с.

43. Філінюк М. А. Аналіз впливу зворотного зв'язку на параметри динамічного негatrona на польовому транзисторі / М. А. Філінюк, О. О. Лазарєв // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2000. – №6. – С. 94–97. – ISSN 1997-9266.
44. Філінюк М. А. Дослідження енергетичних властивостей нелінійної ємності / М. А. Філінюк, О. О. Лазарєв // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2000. – №4. – С. 92–95. – ISSN 1997-9266.
45. Осадчук В. С. Мікроелектронні сенсори температури з частотним виходом : навч. посіб. / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Н. С. Кравчук. – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 163 с. – ISBN 978-966-641-214-3.
46. Фрайден Дж. Современные датчики : справочник / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2005. – 592 с. – ISBN 5-94836-050-4.
47. Джексон Р. Г. Новейшие датчики. / Р. Г. Джексон ; пер. с англ. В. В. Лучинина. – М. : Техносфера, 2007. – 384 с.
48. Богачук В. В. Методи та засоби вимірювального контролю вологості порошкоподібних матеріалів : моногр. / В. В. Богачук, Б. І. Мокін. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 141 с.
49. A rapid-response humidity sensor based on BaNbO<sub>3</sub> nanocrystals / [M. Zhang, C. Hu, H. Liu at all] // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2009. – № 136. – P. 128–132.
50. Arshaka K. A ceramic thick film humidity sensor based on mnx ferrite / K. Arshaka, K. Twomey, D. Egan // Sensors. – 2002. – № 2. – P. 50–61.
51. Room temperature ammonia and humidity sensing using highly ordered nanoporous alumina films / [C. Dickey, K. Varghese, G. Ong at all] // Sensors. – 2002. – № 2. – P. 91–110.
52. Löfgren L. Low-power humidity sensor for RFID applications / L. Löfgren, B. Löfving // Cardiff University. Published by Whittles Publishing Ltd. – 2008.
53. Tao B. Capacitive humidity sensors based on Ni/SiNWs nanocomposites / [B. Tao, J. Zhang, F. Miao at all] // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2009. – № 136. – P. 144–150.
54. Pat. 0075445 USA, Int. Cl. G01R 27/26. Moisture sensor with capacitive measuring element and method of determining air humidity / Yves Luthi. – 22.04.2004.
55. Pat. 0055503 USA, Int. Cl. H01C 10/10. Capacitive humidity sensor / Katsunori Tanida. – 16.03.2006.
56. Pat. 0316673 USA, Int. Cl. G01N 27/22. Moisture sensor / R. Hoofman, J. Michelin. – 25.12.2008.
57. Duncan G. Measuring relative humidity in agricultural environments / G. Duncan, R. Gates, M. Montross // Biosystems and agricultural engineering, University of Kentucky. – 2005.

58. Pat. 0024110 USA, Int. Cl. G01N 27/12. Circuit configuration and method for measuring humidity / Gerhard Nikolaus. – 31.01.2008.

59. Pat. 0075318 USA, Int. Cl. G01R 27/26. Moisture sensor with capacitive measuring element / Yves Luthi. – 18.01.2004.

60. Pat. 2430752 GB, Int. Cl. G01D 5/24. Sensing system with output frequency dependent on sensor capacitance / Steven A Rosenau, Michael Louis Frank. – 04.04.2007.

61. Lee S. CMOS humidity sensor system using carbon nitride film as sensing materials / S. Lee, J. Lee, S. Chowdhury. // Sensors. – 2008. – № 8. – P. 2662–2672.

62. Пат. 20134 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 25/56. Датчик відносної вологості повітря / Ю. Г. Завьялов, В. І. Мартиненко, А. О. Лунін, А. П. Нагайченко ; заявник та патентовласник Київський нац. ун-т технологій та дизайну. – № 95083677; заявл. 04.08.1995; опубл. 25.12.1997; Бюл. № 6.

63. Пат. 55142 Российская Федерация, МКИ G 01 N 25/56. Конденсационный гигрометр / Ю. Н. Головач, И. В. Скогорев. ; заявитель и патентообладатель ОАО «ВЭЛНИИ». – № 2006106361/22; заявл. 04.08.2005; опубл. 28.02.2006; Бюл. № 3.

64. Пат. 33323 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 25/56. Спосіб вимірювання вологості газів / А. Н. Сухель, В. А. Михайлець, Ю. Д. Лукомський. ; заявник та патентовласник А. Н. Сухель, В. А. Михайлець, Ю. Д. Лукомський – № u200805819; заявл. 05.05.2008; опубл. 10.06.2008; Бюл. № 11.

65. Пат. 6459 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 25/66. Спосіб вимірювання вологості газу / Б. І. Педько, Г. Т. Кірін, В. Б. Коток, І. І. Волков, Ю. М. Кулик ; заявник та патентовласник дочірня компанія «Укртрансгаз». – № 20040806900; заявл. 17.08.2004; опубл. 16.05.2005; Бюл. № 5.

66. Пат. 19725 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 5/00. Конденсаційний гігрометр / Й. Й. Білинський, В. В. Онушко ; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200608580; заявл. 31.07.2006; опубл. 15.12.2006; Бюл. № 12.

67. Пат. 37873 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/00. Датчик для вимірювання вологості газового середовища / Ю. М. Бугай ; заявник та патентовласник ТОВ «Українські технології». – № 2000042394; заявл. 26.04.2000; опубл. 15.10.2002; Бюл. № 10.

68. Пат. 18290 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/12. Чутливий елемент датчика вологості / В. Л. Августімов, Д. І. Бідник, С. П. Костенко, О. В. Насипайко, А. І. Остапчук ; заявник та патентовласник акціонерне товариство «Родон». – № 94322144; заявл. 20.08.1990; опубл. 25.12.1997; бюл. № 6.

69. Визначення вольт-амперної характеристики частотного перетворювача вологості на основі двох КМДН-транзисторів з активним ін-



дуктивним елементом / [В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, О. С. Звягін] // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2007. – № 1(13). – С. 53–58. – ISSN 1681-7893.

70. Ємнісний сенсор вологості / [В. С. Осадчук, Л. В. Крилик, М. В. Євсєєва, О. С. Звягін] // Вісник Хмельницького національного університету. – 2008. – № 5. – С. 143–147.

71. Пат. 32338 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/12. Пристрій для контролю відносної вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, О. С. Звягін ; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200800395; заявл. 11.01.2008; опубл. 12.05.2008; Бюл. № 9.

72. Пат. 40938 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 22/04. Пристрій для вимірювання об'ємного вологовмісту і нейроно-поглинальних параметрів геологічних середовищ / С. Т. За вольський, В. В. Кулик, В. С. Месропян, І. О. Майстренко ; заявник та патентовласник Ін-т геофізики НАН України. – № 2000116661; заявл. 24.11.2000; опубл. 15.05.2003; Бюл. № 5.

73. Пат. 54195 Российская Федерация, МКІ G 01 N 27/22. Влагомер сыпучих веществ / В. В. Шорохов, А. И. Макаров, И. В. Маркин ; заявитель и патентообладатель ООО «Лепта». – № 2006101098/22; заявл. 23.07.2005; опубл. 17.01.2006; Бюл. № 1.

74. Пат. 55453 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/22. Спосіб вимірювання вологості та пристрій для його здійснення / Рудик А. В ; заявник та патентовласник Вінницький держ. техн. ун-т. – № 99116350; заявл. 23.11.1999; опубл. 15.04.2003; Бюл. № 4.

75. Пат. 75700 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/22. Спосіб вимірювання вологості / О. М. Куцевол, М. О. Куцевол, В. О. Поджаренко ; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № 2004032000; заявл. 18.03.2004; опубл. 15.05.2006; Бюл. № 5.

76. Пат. 79660 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 25/56, G 01 N 25/60. Датчик вологості сипучих матеріалів у потоці / В. Ф. Клабуков, К. В. Соснін, А. В. Просяник ; заявник та патентовласник ТОВ наук.-вироб. під-во «Агропроматоматизація». – № a200506495; заявл. 01.07.2005; опубл. 10.07.2007; Бюл. № 10.

77. Пат. 77818 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 25/56, G 01 N 27/22. Спосіб виміру вологості матеріалів, зокрема солей йодидів лужних металів / Б. В. Гриньов, О. Ю. Волошко, Б. Г. Заславський, О. М. Кісіль, О. В. Колесніков, В. Л. Самолов, Д. С. Сафронов, О. Г. Шишкін ; заявник та патентовласник Ін-т сцинтиляційних матеріалів НАН України. – № 20041210819; заявл. 27.12.2004; опубл. 15.01.2007; Бюл. № 1.

78. Пат. 61037 Российская Федерация, МКІ G 01 N 27/22. Устройство для измерения влажности кожевенного сырья / Д. С. Лычников, М. В. Антонова, Н. В. Берлова, И. М. Гордиенко, Л. К. Земцова, С. А. Крылова, Н. П. Кутепова, Г. В. Луковенко, А. И. Сапожникова ;

заявитель и патентообладатель Московская гос. акад. вет. медицины и биотехнологии им. К. И. Скрябина. – № 2006138176/22; заявл. 12.02.2006; опубл. 30.10.2006; Бюл. № 17.

79. Пат. 35081 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 22/04. Пристрій для контролю вологості тканини / А. П. Храпливий, О. М. Баржник, О. П. Єдинович, Ю. С. Решетняк. ; заявник та патентовласник Херсонський держ. тех. ун-т. – № 99084553; заявл. 10.08.1999; опубл. 15.03.2001; Бюл. № 2.

80. Пат. 9734 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/02. Пристрій для вимірювання вологості матеріалів з безперервним режимом роботи в часі / Ю. В. Шабатура, Ю. О. Дмитрієв, В. П. Бараболя, В. В. Богачук ; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200502686; заявл. 24.03.2005; опубл. 17.10.2005; Бюл. № 10.

81. Пат. 54155 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/22. Вологомір / Р. А. Провальний ; заявник та патентовласник Тернопільський держ. техн. ун-т. – № 2002054279; заявл. 24.05.2002; опубл. 17.02.2003; Бюл. № 2.

82. Нефтепродукты. Термины и определения : ГОСТ 26098-84. – [Действует от 1984-07-01]. – М. : Гос. ком. СССР по стандартам, 1984. – 11 с. – (Межгосударственный стандарт).

83. Масла трансформаторные. Технические условия : ГОСТ 982-80. – [Действует от 1982-01-01]. – М. : Стандартиформ, 2001. – 6 с. – (Межгосударственный стандарт).

84. Масла индустриальные. Технические условия : ГОСТ 20799-88. – [Действует от 1990-01-01]. – М. : Стандартиформ, 2006. – 5 с. – (Межгосударственный стандарт).

85. Масла авиационные. Технические условия : ГОСТ 21743-76. – [Действует от 1978-01-01]. – М. : Гос. ком. СССР по стандартам, 1987. – 4 с. – (Межгосударственный стандарт).

86. Пат. 29839 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 25/56. Спосіб кількісного визначення вмісту води в паливі та паливно-мастильних матеріалах / В. П. Кувачов, В. Ф. Мовчан, Д. А. Катюха ; заявник та патентовласник Таврійський держ. агротехн. ун-т. – № u200711612; заявл. 22.10.2007; опубл. 25.01.2008; Бюл. № 1.

87. Пат. 42355 УКРАЇНА, МКІ C 10 G 7/00. Спосіб підготовки та стабілізації нафти / П. В. Темченко, П. М. Демченко, Ю. О. Зарубін, В. І. Красько, П. П. Панченко, П. В. Тарабарінов, І. М. Купер, Б. М. Гринишин, П. Г. Курпіта, І. В. Копач, М. П. Гнип, В. П. Петриняк, І. Я. Бойчук, О. В. Васьків, Я. С. Тринів ; заявник та патентовласник ВАТ «Укрнафта» – № 2001010553; заявл. 25.01.2001; опубл. 15.10.2001; Бюл. № 9.

88. Пат. 40499 УКРАЇНА, МКІ C 10 G 7/04, C 10 G 33/00. Спосіб збезводнення та знесолення нафти / В. М. Пономарьов, М. В. Кошо-

вещь ; заявник та патентовласник ЗАТ «Северодонецкий оргхім» – № 2001032070; заявл. 29.03.2001; опубл. 16.07.2001; Бюл. № 6.

89. Пат. 60834 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 21/81. Волоконно-оптичний вологомір / Л. І. Козич, Н. П. Фролова ; заявник та патентовласник Ужгородський нац. ун-т. – № 2003031890; заявл. 03.03.2003; опубл. 15.10.2003; Бюл. № 10.

90. Пат. 57466 Российская Федерация, МКІ G 01 N 27/22. Полнодиапазонный поточный влагомер сырой нефти (варианты) / Полторацкий В. М ; заявитель и патентообладатель «Центр разраб. нефтедоб. оборуд.». – № 2006108871/22; заявл. 11.08.2005; опубл. 21.03.2006; Бюл. № 5.

91. Пат. 48806 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/00. Пристрій для вимірювання вологості нафтопродуктів / Г. Г. Башук, Л. М. Пелех ; заявник та патентовласник ВАТ «Рівнеазот» – № 2001128674; заявл. 17.12.2001; опубл. 15.08.2002; Бюл. № 8.

92. Пат. 2135985 Российская Федерация, МКІ G 01 N 22/04. Проточный измеритель влажности нефтепродуктов / В. В. Галицын ; заявитель и патентообладатель Б. Б. Булгаков, А. Б. Булгаков. – № 98102039/09; заявл. 05.02.1998; опубл. 27.08.1999; Бюл. № 24.

93. Пат. 54190 Российская Федерация, МКІ G 01 N 22/04. Устройство для измерения влагосодержания дизельного топлива / Д. А. Ломоносов, Ф. М. Мурманцев ; заявитель и патентообладатель Приморская гос. сельхоз. академия. – № 2006102694/22; заявл. 09.07.2005; опубл. 30.01.2006; Бюл. № 4.

94. Pat. 4240028 USA, Int. Cl. G01R 27/26. Means and method for determining water saturation of oil / Lorne A. Davis, Jr. – № 33937; filed 27.04.1979; print 16.12.1980.

95. Пат. 34555 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 22/00. Пристрій для вимірювання вологості / Л. В. Крилик, Ю. С. Кравченко, О. С. Звягін, О. М. Мельничук ; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200804581; заявл. 10.04.2008; опубл. 11.08.2008; Бюл. № 15.

96. Пат. 39894 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/22. Ємнісний сенсор для вимірювання вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. С. Звягін ; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № 200814033; заявл. 05.12.2008; опубл. 10.03.2009; Бюл. № 5.

97. Пат. 40284 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/22. Сенсор для вимірювання вологості / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, О.С. Звягін ; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № 200814052; заявл. 05.12.2008; опубл. 25.03.2009; Бюл. № 6.

98. Стенцель Й. І. Метрологія та технологічні вимірювання в хімічній промисловості. Аналітичні прилади і методи контролю. Ч. 2. : на-

вч. посіб. / Й. І. Стенцель. – Луганськ : вид-во Східноукраїнського нац. ун-ту, 2000. – 263 с. – ISBN 966-590-229-6.

99. Нефть и нефтепродукты. Метод определения содержания воды : ГОСТ 2477-65. – [Действует от 1966-01-01]. – М. : Стандартинформ, 2002. – 6 с. – (Межгосударственный стандарт).

100. Крилик Л. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі вологості на основі напівпровідникових структур з від'ємним опром : дис. кандидата тех. наук : 05.13.05 / Крилик Людмила Вікторівна. – Вінниця, 2005. – 221 с.

101. Нефть и нефтепродукты. Диэлькометрический метод определения влажности : ГОСТ 14203-69. – [Действует от 1970-01-01]. – М. : Стандартинформ, 2006. – 6 с. – (Межгосударственный стандарт).

102. Осадчук В. С. Проблеми вимірювання вологості нафтопродуктів та метод підвищення його точності / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. С. Звягін // Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління. – 2010. – № 1(27). – С. 135–139. – ISSN 1810-3049.

103. Осадчук В. С. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 275 с. – ISBN 966-7199-67-3.

104. Осадчук О. В. Ємнісний сенсор для вимірювання вологості нафтопродуктів / О. В. Осадчук, О. С. Звягін, М. В. Євсєєва // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2009. – № 2. – С. 40–43.

105. Осадчук О. В. Вологочутливий ємнісний сенсор для вимірювання вологості нафтопродуктів / О. В. Осадчук, О. С. Звягін, Л. В. Крилик // Вісник національного університету «Львівська політехніка». Автоматика, вимірювання та керування. – 2010. – № 665. – С. 174–178. – ISSN 0321-0499.

106. Ємнісний сенсор вологості гребінцевої структури на основі полімерних матеріалів / [В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, М. В. Євсєєва] // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2006. – № 2(12). – С. 229–234. – ISSN 1681-7893.

107. Теория диэлектриков / [Н. П. Богородицкий, Ю. М. Волокобинский, А. А. Воробьев, Б. М. Таргев]. – М.-Л. : Энергия, 1965. – 344 с.

108. Мосин О. В. Всё о воде. Вязкость воды [Электронный ресурс] / О. В. Мосин. – Режим доступа к статье: <http://www.o8ode.ru/article/answer/pnanetwater/vyazkost.htm>.

109. Горошков Б. И. Элементы радиоэлектронных устройств : справочник / Б. И. Горошков. – М. : Радио и связь, 1988. – 176 с. – ISBN 5-256-00069-1.

110. Сисоєв В. М. Основи радіоелектроніки : підручник / В. М. Сисоєв. – К. : Вища школа, 2004. – 279 с. – ISBN 966-642-018-X.
111. Осадчук В. С. Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором : моногр. / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 184 с.
112. Пат. 44927 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/12. Пристрій для визначення вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, О. С. Звягін, К. Ю. Іоніна ; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200902969; заявл. 30.03.2009; опубл. 26.10.2009; Бюл. № 20.
113. Звягін О. С. Мікроелектронний частотний перетворювач для вимірювання вологості нафтопродуктів / О. С. Звягін, О. В. Осадчук // II-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю : міжнар. наук.-техн. конф., Вінниця 23–26 вер. 2009 р. : тези допов. – 2009. – С. 308–312. – ISBN 978-966-2190-11-3.
114. Звягін О. С. Частотний перетворювач вологості / О. С. Звягін, О. В. Осадчук // Сучасні проблеми радіоелектроніки та телекомунікацій «РТ-2011» : міжнар. молод. наук.-тех. конф., Севастополь 11–15 квітня 2011 р. : тези доповіді. – 2011. – С. 278.
115. Осадчук В. С. Математична модель мікроелектронного частотного перетворювача вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. С. Звягін // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 3. – С. 113–117. – ISSN 1997-9266.
116. Электрические измерения. Средства и методы измерений : учеб. пособие для вузов / [К. П. Дьяченко, Д. И. Зорин, П. В. Новицкий и др.] ; под ред. Е. Г. Шрамкова. – М. : Высшая школа, 1972. – 520 с.
117. Пат. 50817 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/12. Вимірювач вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. С. Звягін ; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200913291; заявл. 21.12.2009; опубл. 25.06.2010; Бюл. № 12.
118. Осадчук В. С. Математична модель частотного перетворювача вологості з конденсаторною циліндричною структурою / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. С. Звягін // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 1. – С. 140–146. – ISSN 1997-9266.
119. Осадчук В. С. Математична модель частотного перетворювача вологості нафтопродуктів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. С. Звягін // Вісник Хмельницького національного університету. – 2010. – № 4. – С. 89–94.
120. Пат. 88831 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/00. Перетворювач вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, О. С. Звягін ; заяв-

ник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № а200804584; заявл. 10.04.2008; опубл. 25.11.2009; Бюл. № 19.

121. Пат. 42213 УКРАЇНА, МКІ G 01 N 27/12. Вимірювач вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, О. С. Звягін, А. Ю. Савицький ; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т. – № u200900894; заявл. 06.02.2009; опубл. 25.06.2009; Бюл. № 12.

122. Звягін О. С. Вимірювач вологості нафтопродуктів / О. С. Звягін, О. В. Осадчук, В. С. Осадчук // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування : міжнар. наук.-тех. конф., Вінниця 8–9 жовтня 2009 р. : тези доповіді. – 2009. – С. 67.

123. Звягін О. С. Мікроелектронний частотний перетворювач вологості на основі від'ємного опору / О. С. Звягін, О. В. Осадчук // Радіоелектроніка і молодь у ХХІ столітті : міжнар. молод. форум, Харків 18–20 квітня 2011 р. : тези доповіді. – 2011. – С. 84.

124. Митин Д. К. Мониторинг присутствия воды в нефти и маслах - защита ваших инвестиций / Д. К. Митин, И. М. Озеричкий // Территория Нефтегаз. – 2006. – № 2. – С. 18–19. – ISSN 2072-2745.

125. Глушков Э. И. Новые решения в проектах систем измерения количества и показателей качества нефти, нефтепродуктов и газа ОАО «Нефтеавтоматика» / Э. И. Глушков, Р. В. Аскарров // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2009. – № 4. – С. 12–14.

126. Система измерения количества и показателей качества нефти (СИКН) [Электронный ресурс] / Режим доступа к статье : <http://elesy.ru/engineering/resheniya-po-napravlenijam/neftepererabotka/sikn.aspx>.

127. Система измерения количества и показателей качества нефти [Электронный ресурс] / Режим доступа к статье : [http://eng.ozna.ru/katalog/roizvodstvo\\_oborudovaniyaa/istemy\\_ucheta\\_i\\_izmereniya\\_parametrov\\_nefti\\_zhidkosti\\_i\\_gaza/istemy\\_izmerenij\\_kolichestva\\_i\\_pokazatelej\\_kachestva\\_nefti](http://eng.ozna.ru/katalog/roizvodstvo_oborudovaniyaa/istemy_ucheta_i_izmereniya_parametrov_nefti_zhidkosti_i_gaza/istemy_izmerenij_kolichestva_i_pokazatelej_kachestva_nefti).

128. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения количества извлекаемых из недр нефти и нефтяного газа. Общие метрологические и технические требования : ГОСТ Р 8.615-2005. – [Действует от 2006-03-01]. – М. : Стандартинформ, 2007. – 31 с. – (Национальный стандарт Российской Федерации).

129. Коледов Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок / Л. А. Коледов. – М. : Радио и связь, 1989. – 400 с. - ISBN 2-256-00142-6.

130. Мирский Г. Я. Электронные измерения / Г. Я. Мирский. – М. : Радио и связь, 1986. – 440 с.

131. Яценков В. С. Микроконтроллеры Microchip с аппаратной поддержкой USB / Яценков В. С. – М. : Горячая линия–Телеком, 2008. – 400 с. – ISBN 978-5-9912-0030-1.

132. Засоби та методи вимірювань неелектричних величин : підручник / [Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець, Б. І. Стадник та ін.] ; під ред. Є. С. Поліщука. – Львів : Вид-во «Бескид Біт», 2008. – 618 с. – ISBN 966-8450-22-1.

133. Дорожовець М. М. Опрацювання результатів вимірювання : навч. посіб. / М. М. Дорожовець. – Львів : Вид-во нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2007. – 624 с. – ISBN 978-966-553-640-6.

134. Нефедов В. И. Метрология и радиоизмерения в телекоммуникационных системах : учеб. пособие / В. И. Нефедов, В. И. Хахин ; под ред. В. И. Нефедова. – М. : Высшая школа, 2001. – 383 с.

135. Стабилизатор напряжения LM7805 документация [Электронный ресурс]. – Режим доступа к статье : <http://www.avtlab.com/node/29>.

136. Пождаренко В. О. Вимірювання і комп'ютерно-вимірювальна техніка / В. О. Пождаренко, В. В. Кухарчук. – К. : НМК ВО, 1991. – 240 с.

137. Райс В. Как работают аналогово-цифровые преобразователи и что можно узнать из спецификации на АЦП. [Электронный ресурс] / В. Райс // Компоненты и технологии. – 2005. – № 3. – Режим доступа к статье : <http://www.efo.ru/doc/Silabs/Silabs.pl?2089>.

138. Электрические измерения : учебник для вузов / [Л. И. Байда, Н. С. Добротворский, Е. М. Душин и др.] ; под ред. А. В. Фремке и Е. М. Душина – Л. : Энергия, 1980. – 392 с.

139. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю: навч. посіб. / [Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк]. – Вінниця: ВДГУ, 2001. – 219 с.

**Осадчук Володимир Степанович,  
Осадчук Олександр Володимирович,  
Звягін Олександр Сергійович**

**ЧАСТОТНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ КОНТРОЛЮ  
ВОЛОГОСТІ НАФТОПРОДУКТІВ**

Монографія

Редактор Н. Мазур

Оригінал–макет підготовлено О. В. Осадчуком, О. С. Звягіним

Підписано до друку 10.04.2014 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 8,78  
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) прим. Зам № В2014-14

Вінницький національний технічний університет,  
КІВЦ ВНТУ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.  
21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.