

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Механічний факультет

Кафедра Метрології та безпеки життєдіяльності

## Дипломна робота

бакалавра

Аналіз напрямків поліпшення метрологічних характеристик  
електромагнітних витратомірів

Завідувач кафедри, д-р техн. наук, проф.

О . В. Полярус

Нормоконтролер, канд. техн. наук, доцент

І. В. Грайворонська

Керівник, канд. техн. наук, доцент

О. С. Букреєва

Студент гр. ММ-41

О. І. Плетньов

Харків – 2020

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет Механічний

Кафедра: Метрології та безпеки життєдіяльності

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр

Галузь знань: 15 «Автоматизація та приладобудування»

Спеціальність: 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

**Метрології та БЖД**

\_\_\_\_\_ **О. В. Полярус**

«    » \_\_\_\_\_ 2020 р

**З А В Д А Н Н Я  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

**Плетньову Олександрю Ігоровичу**

1. Тема роботи: «Аналіз напрямків поліпшення метрологічних характеристик електромагнітних витратомірів»

Керівник роботи Букреева Ольга Сергіївна, к.т.н., доцент.

затверджені наказом вищого навчального закладу від «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 року

№ \_\_

2. Строк подання студентом роботи 15 травня 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи: звіт з переддипломної практики

4. Перелік питань, які потрібно розробити: 1 Огляд нормативних основ виробництва та експлуатації електромагнітних витратомірів. 2 Особливості електромагнітних витратомірів. 3 Визначення напрямків поліпшення метрологічних характеристик електромагнітних витратомірів. 4 Висновки.

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

1. Титульний лист. 2. Мета і постановка задач дослідження. 3. Конструкція електромагнітних витратомірів. 4. Електромагнітний витратомір зі зменшенням розсіювання магнітної енергії. 5. Структурна схема електромагнітного витратоміра при змінному рівні заповнення каналу трубопроводу. 6. Структурна схема електромагнітного витратоміра, що виключає ураження електричним струмом. 7. Структурна схема електромагнітного витратоміра з комутаційним пристроєм. 8. Структурна схема електромагнітного витратоміра, що виключає адитивну похибку. 9. Висновки.

## 6. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання 5 лютого 2019 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Огляд нормативних основ виробництва та експлуатації електромагнітних витратомірів	26.02.2020	
2	Конструкція та принцип дії електромагнітних витратомірів	19.03.2020	
3	Аналіз напрямків поліпшення метрологічних характеристик електромагнітних витратомірів	16.04.2020	
4	Формування висновків по роботі. Оформлення дипломної роботи	07.05.2020	
5	Підготовка презентації та доповіді	21.05.2020	

**Студент**

\_\_\_\_\_ ( підпис )

**Плетньов О. І.**

\_\_\_\_\_ ( прізвище та ініціали )

**Керівник проекту (роботи)**

\_\_\_\_\_ ( підпис )

**Букрєєва О. С.**

\_\_\_\_\_ ( прізвище та ініціали )

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи: 67 с., 14 рис., 1 додаток, 12 джерел.

### ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ВИТРАТОМІР, ЗАКРИТИЙ ТРУБОПРОВІД, МАГНІТНА ІНДУКЦІЯ, МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, СТРУМОПРОВІДНА РІДИНА

Об'єктом роботи є метрологічні характеристики електромагнітних витратомірів.

Мета роботи – аналіз напрямків їх поліпшення для підвищення точності та єдності вимірювань.

Електромагнітні витратоміри можна використовувати у всіх випадках, коли необхідно визначити кількість речовини, що проводить струм. Встановлено нормативно-правові основи їх виробництва та експлуатації, а також визначено обов'язкові вимоги до цих витратомірів. Розглянуто їх конструктивні особливості.

Визначено такі напрямки поліпшення метрологічних характеристик електромагнітних витратомірів: зменшення розсіювання магнітної енергії, більш точне вимірювання витрати рідин зі складною кінематичною структурою потоку за допомогою комутаційного пристрою, вимірювання витрати при змінному рівні заповнення каналу трубопроводу, зниження матеріаломісткості, виключення ураження електричним струмом, виключення адитивної похибки.

Встановленні напрямки та запропоновані схеми можуть бути корисними для розробників та виробників електромагнітних витратомірів.

## ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Нормативно-правові основи виробництва та експлуатації електромагнітних витратомірів .....	6
1.1 Аналіз вимог законодавства.....	6
1.2 Огляд чинних нормативних документів.....	10
2 Особливості електромагнітних витратомірів .....	13
2.1 Класифікація витратомірів.....	13
2.2 Конструкція та принцип дії електромагнітних витратомірів.....	14
2.2.1 Витратоміри з електромагнітним перетворювачем витрати.....	15
2.2.2 Витратомір з електромагнітними перетворювачами швидкості потоку.....	20
2.3 Метрологічні характеристики та галузь використання електромагнітних витратомірів.....	23
3 Визначення напрямків поліпшення метрологічних характеристик електромагнітних витратомірів .....	27
3.1 Зменшення розсіювання магнітної енергії.....	27
3.2 Витрата зі складною кінематичною структурою потоку.....	29
3.3 Вимірювання витрати при змінному рівні заповнення каналу трубопроводу.....	33
3.4 Зниження матеріаломісткості, виключення ураження електричним струмом.....	39
3.5 Комутаційний пристрій.....	41
3.6 Виключення адитивної похибки.....	43
Висновки.....	48
Перелік посилань.....	49
Додаток А Ілюстративний матеріал до дипломної роботи.....	51

## ВСТУП

Витратоміри застосовуються у всіх випадках, коли необхідно визначити кількість речовини в однофазних потоках рідини (нафти, води тощо) чи газу або сипкої речовини. Оскільки система вимірювання витрати зазвичай показує миттєве значення витрати, то для визначення кількості рідини, що пройшла трубопроводом за певний проміжок часу, необхідно, витратомір об'єднати з лічильником. Таким чином, загальний об'єм речовини, що пройшов через витратомір, визначається інтегруванням по часу миттєвих значень витрати у послідовні моменти.

Електромагнітний метод вимірювання витрати більш ніж за 60 років добре зарекомендував себе в багатьох областях застосування. Цей метод можна використовувати для всіх рідин, що проводять струм: води, кислот, лугів, пульпи і багатьох інших. Типові області застосування – вимір рідин, заповнення, дозування і точне вимірювання у комерційному обліку. Електромагнітні витратоміри можуть вимірювати рідини з мінімальною електропровідністю. Серед галузей промисловості, що використовують даний принцип вимірювання, можна виділити водопостачання і водовідведення, хімічну, фармацевтичну, целюлозно-паперову та харчову. У зв'язку з цим, вимірювання електромагнітними витратомірами потребує підвищеної точності.

Тому об'єктом роботи є метрологічні характеристики електромагнітних витратомірів, а метою – розробка напрямків їх поліпшення для підвищення точності та єдності вимірювань. Для досягнення цієї мети були поставлені та послідовно розв'язані такі завдання:

- огляд електромагнітних витратомірів, їх класифікації та експлуатаційних особливостей;
- огляд нормативно-правових основ регулювання виробництва й експлуатації електромагнітних витратомірів та чинних нормативних документів;
- визначення напрямків поліпшення метрологічних характеристик електромагнітних витратомірів.

# 1 НОРМАТИВНО-ПРАВОВІ ОСНОВИ РЕГУЛЮВАННЯ ВИРОБНИЦТВА ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИТРАТОМІРІВ

## 1.1 Аналіз вимог законодавства

Первинним документом у галузі виробництва, експлуатації, повірки та калібрування ЗВТ є закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність», вимоги якого обов'язково стосуються законодавчо регульованої сфери. Сферою законодавчо регульованої метрології є визначені цим Законом види діяльності, щодо яких з метою забезпечення єдності вимірювань та простежуваності здійснюється державне регулювання стосовно вимірювань, одиниць вимірювання та ЗВТ [1].

У сфері законодавчо регульованої метрології застосовуються ЗВТ, які відповідають вимогам щодо точності, регламентованим для таких засобів, у встановлених умовах їх експлуатації. Законодавчо регульовані ЗВТ дозволяється застосовувати, випускати з виробництва, ремонту та в продаж і видавати напрокат лише за умови їх відповідності цьому закону та іншим нормативно-правовим актам, що містять вимоги до таких ЗВТ. До них відносяться також й електромагнітні витратоміри, які застосовують у таких галузях [1]:

- забезпечення захисту життя та охорони здоров'я громадян;
- контроль стану навколишнього природного середовища;
- контроль безпеки умов праці;
- контроль безпеки дорожнього руху та технічного стану транспортних засобів;
- торговельно-комерційні операції та розрахунки між покупцем (споживачем) і продавцем (постачальником, виробником, виконавцем), у тому числі під час надання транспортних, побутових, комунальних, телекомунікаційних послуг, послуг поштового зв'язку, постачання та/або споживання енергетичних і матеріальних ресурсів (електричної і теплової енергії, газу, води, нафтопродуктів тощо).

Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Технічного регламенту засобів вимірювальної техніки» встановлює суттєві вимоги до ЗВТ та стосується лічильників води, лічильників газу та пристроїв перетворення об'єму, лічильників активної електричної енергії, теплолічильників, вимірювальних систем для безперервного і динамічного вимірювання кількості рідин, крім води, автоматичних зважувальних приладів, таксометрів, матеріальних мір, приладів для вимірювання розмірів та аналізаторів вихлопних газів [2]. Таким чином, цей технічний регламент може стосуватися й електромагнітних витратомірів, якщо такий принцип дії має відповідний лічильник речовини, що проводить електричний струм.

До суттєвих вимог відносяться допустимі похибки, кліматичні умови навколишнього середовища, зовнішні механічні, електромагнітні та інші впливові умови, основні правила для випробувань і визначення похибок, вологість навколишнього середовища, відтворюваність, повторюваність, поріг реагування та чутливості, довговічність, надійність, придатність, захист від несанкціонованого втручання, інформація, нанесена на засіб вимірювальної техніки або така, яка його супроводжує, показання, подальша обробка даних з метою проведення торговельної операції, оцінка відповідності [2].

Крім того, цей технічний регламент встановлює особливі умови до лічильників води. За умови, якщо вони електромагнітні, ці вимоги необхідно враховувати у дипломній роботі. А саме [2]:

Виробник визначає нормовані робочі умови лічильника води, зокрема:

- 1) діапазон вимірювання витрати води:  $Q_3/Q_1 \geq 40$ ;  $Q_2/Q_1 = 1,6$ ;  $Q_4/Q_3 = 1,25$ ;
  - 2) діапазон температури води: від  $0,1\text{ }^\circ\text{C}$  до  $30\text{ }^\circ\text{C}$ ; від  $30\text{ }^\circ\text{C}$  до  $90\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- лічильник води може бути такої конструкції, яка забезпечує роботу в обох діапазонах;
- 3) відносний діапазон тиску води – від  $0,3$  бара до  $10$  бар для  $Q_3$ ;
  - 4) для джерела живлення: номінальне значення напруги змінного струму та/або граничні значення напруги живлення постійного струму.



Максимально допустима похибка (за модулем) для значень об'єму під час вимірювання витрат води від перехідної ( $Q_2$ ) (включно) і перевантажувальної ( $Q_4$ ) становить: 2 % - для води за температури менше 30 °С; 3 % - для води за температури більше 30 °С.

Максимально допустима похибка (за модулем) для значень об'єму, вимірювання витрат води від мінімальної ( $Q_1$ ) до перехідної ( $Q_2$ ) (включно) становить 5 % за будь-якої температури води.

Максимально допустима похибка лічильника води не повинна систематично надавати перевагу будь-якій стороні.

Наслідки впливу електромагнітних завад на лічильник води повинні бути такими: зміна результату вимірювання не перевищує значення критичної зміни, або зареєстрований результат вимірювання не може інтерпретуватися як достовірний результат, наприклад, миттєва зміна не може інтерпретуватися, запам'ятовуватися або передаватися як результат вимірювання.

Після припинення дії електромагнітних завад лічильник води повинен:

- відновлювати свою роботу з похибкою не більше максимально допустимої похибки (за модулем);
- зберігати всі вимірювальні функції;
- забезпечувати відновлення всієї вимірювальної інформації, наявної безпосередньо перед впливом завади.

Значення критичної зміни дорівнює найменшому з двох таких значень:

- значенню, що відповідає добутку половини значення максимально допустимої похибки у верхній ділянці на виміряний об'єм;
- значенню, що відповідає добутку значення максимально допустимої похибки на отримане за одну хвилину за номінальної витрати значення об'єму.

Після проведення випробування на довговічність з урахуванням періоду часу, визначеного виробником, лічильник води повинен відповідати таким критеріям:

- 1) відхилення результату вимірювань після випробування на довговічність відносно первинного результату вимірювань не повинно перевищувати:

3 % виміряного об'єму між  $Q_1$  (включно) і  $Q_2$  (виключно);

1,5 % виміряного об'єму між  $Q_2$  (включно) і  $Q_4$  (включно);

2) похибка зареєстрованого значення об'єму після випробування на довговічність не повинна виходити за межі:

$\pm 6$  % виміряного об'єму між  $Q_1$  (включно) і  $Q_2$  (виключно);

$\pm 2,5$  % виміряного об'єму між  $Q_2$  (включно) і  $Q_4$  (включно) – для лічильників води, призначених для вимірювання кількості води з температурою від  $0,1$  °C до  $30$  °C;

$\pm 3,5$  % виміряного об'єму між  $Q_2$  (включно) і  $Q_4$  (включно) - для лічильників води, призначених для вимірювання кількості води з температурою від  $30$  °C до  $90$  °C.

Лічильник води повинен функціонувати під час встановлення в будь-якому положенні, якщо на маркуванні чітко не зазначено інше.

Виробник повинен зазначати, чи дозволяє конструкція лічильника води вимірювати зворотний потік. У цьому випадку об'єм такого потоку повинен відніматися від накопиченого об'єму або реєструватися окремо. Така ж максимально допустима похибка застосовується як до прямого, так і до зворотного потоку. Лічильники води, в яких не передбачено вимірювання зворотного потоку, повинні запобігати зворотному потоку або витримувати випадковий зворотний потік без будь-яких пошкоджень чи змін метрологічних характеристик.

Об'єм, що вимірюється, повинен відображатися в кубічних метрах.

Суб'єкт господарювання, що надає комунальні послуги, або уповноважена особа, яка має право встановлювати лічильник води, гарантує визначення додаткових вимог з метою забезпечення придатності лічильника для точних вимірювань споживання води, передбаченого або прогнозованого.

Виробник може вибрати такі процедури оцінки відповідності (та їх комбінації): V + F або V + D або H1.

Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Технічного регламенту законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки» встановлює вимоги, яким повинні відповідати ЗВТ, які призначені для застосування у сфері

законодавчо регульованої метрології, коли вони надаються на ринку та/або вводяться в експлуатацію для виконання завдань, пов'язаних з вимірюваннями [3].

Згідно з ним, ЗВТ повинні відповідати суттєвим вимогам, установленим цим технічним регламентом та у відповідних національних стандартах та технічних специфікаціях для певних ЗВТ. Ці суттєві вимоги – це загальні вимоги, допустимі похибки, кліматичні умови навколишнього середовища, зовнішні електромагнітні умови, зовнішні механічні умови, інші впливові величини (коливання напруги, коливання частоти напруги живлення, частотні електромагнітні поля джерела живлення, будь-яка інша величина, яка може вплинути значною мірою на точність ЗВТ), основні правила для випробувань і визначення похибок, вологість навколишнього середовища, повторюваність, відтворюваність, поріг реагування і чутливість, довговічність, надійність, придатність, захист від несанкціонованого втручання, інформація, нанесена на засоби вимірювальної техніки або така, що його супроводжує, показання, подальша обробка даних з метою проведення торговельної операції, оцінка відповідності.

ЗВТ можуть бути надані на ринку та/або введені в експлуатацію тільки у разі, коли вони відповідають вимогам цього технічного регламенту.

## 1.2 Огляд чинних нормативних документів

Щодо електромагнітних витратомірів, які безпосередньо їх стосуються, в Україні у даний час чинним є 5 гармонізованих національних нормативних документів.

Першим та найзагальнішим нормативним документом щодо електромагнітних витратомірів є словник термінів [4]. Цей стандарт установлює основні і загальні терміни щодо вимірювання витрати та кількості плинного середовища в закритих трубопроводах, такі як: загальні терміни в механіці рідини, невизначеності, загальні терміни, що стосуються пристроїв, прилади для диференційного тиску, вимірювання критичної витрати, методи за швидкістю та площею, трасувальні методи, електромагнітні методи, зважувальні та об'ємні

методи, методи нестабільності, методи змінної області, ультразвукові методи, лічильники та інші. Стосовно електромагнітних витратомірів цей стандарт встановлює такі визначення: електромагнітний витратомір, первинний пристрій (електромагнітного витратоміра), вторинний пристрій (електромагнітного витратоміра), вимірювальна труба (електромагнітного витратоміра), вимірювальні електроди, магнітне поле, сигнал електрода, сигнал потоку, квадратурна напруга, синфазна напруга, опорний сигнал.

ДСТУ 7266:2012 встановлює загальні технічні вимоги до електромагнітних, швидкісних та вихрових витратомірів [5].

Інший стандарт [6] рекомендує методи випробувань для оцінки ефективності електромагнітних витратомірів для рідин, що протікають в закритих каналах. Він визначає єдину процедуру перевірки робочих характеристик, коли витратомір піддається певним впливовим величинам, і методи представлення результатів вимірювань робочих характеристик. Цей стандарт застосовується тільки до промислово встановлених на трубі електромагнітних витратомірів. У ньому встановлені вимоги щодо загальної процедури тестування (загальні вимоги, встановлення труб, електромонтаж, тестова рідина, захоплення повітря, діапазон провідності, умови випробувань навколишнього середовища, стандартні еталонні умови навколишнього середовища, допустимий діапазон умов навколишнього середовища для тестових вимірювань, стандартні умови навколишнього середовища для контрольних вимірювань, номінальні умови калібрування під час випробувань, контрольні значення, допуски, стандартні умови для з'єднувального кабелю, вихідний сигнал, перевірка нуля, калібрування витратомірів), оцінювання впливу впливової величини (загальні положення, внутрішній вплив, температура рідини, провідність рідини, розподіл швидкостей, тиск рідини, зовнішній вплив, аберація електроживлення, електричні завади, вплив напруги, механічна вібрація та удар), тестування для оцінювання впливу інших впливових величин (магнітний вплив, вихідний опір навантаження, довгостроковий дрейф, блукаючі струми всередині рідини, радіоперешкоди).

Ще один стандарт [7] описує принцип і основні конструктивні особливості промислових електромагнітних витратомірів для вимірювання витрати провідної рідини в заповненому закритому трубопроводі. Він охоплює їх теоретичні вимоги (загальні положення, основні рівняння), конструкцію та принцип роботи (загальні положення, первинні пристрої, вторинні пристрої, вихід системи, вплив провідності рідини, ефект числа Рейнольдса, ефект профілю швидкості), проектування та практику монтажу (первинні пристрої, розмір, макет, вплив компоновання на розподіл швидкостей, положення електрода, забезпечення нульової перевірки, багатофазний потік через первинний пристрій, утримані тверді речовини, всмоктувані гази, фаза прослизання, підключення трубопроводів, регулювання трубопроводів, з'єднувальні частини, електрична установка, очищення та обслуговування первинного пристрою, вторинні пристрої, розташування, електрична установка), маркування обладнання (первинний пристрій, вторинний пристрій, обов'язкові дані, необов'язкові дані), умови калібрування та випробування (вологе калібрування, номінальні умови калібрування, інтерпретація результатів, випробування під тиском), аналіз невизначеності (загальний, визначення помилки, визначення стандартного відхилення, оцінювання невизначеності, розрахунок похибки вимірювання швидкості потоку, джерела помилок, поширення окремих невизначеностей).

Останній стандарт [8] визначає загальну довжину (довжину залягання обличчям до обличчя) для фланцевих електромагнітних витратомірів. Він містить інсталяційні розміри: розміри витратоміра, загальна довжина, фланцеве з'єднання та позначення.

У переліках національних стандартів, відповідність яким надає презумпцію відповідності ЗВТ суттєвим вимогам Технічного регламенту законодавчо регульованих ЗВТ та Технічного регламенту ЗВТ не містяться окремі стандарти на електромагнітні витратоміри. Тому обов'язковими є відповідність положенням цих технічних регламентів. Однак, у дипломній роботі також будемо керуватися й розглянутими гармонізованими національними стандартами.

## 2 ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИТРАТОМІРІВ

Згідно з [4], витратомір – прилад вимірювання витрати та складається з первинного пристрою, який генерує сигнал та дозволяє визначити швидкість потоку, й вторинного пристрою, який приймає з первинного сигнал і виводить, записує, перетворює і / або передає його, щоб отримати значення швидкості потоку. У свою чергу, витрата – кількість речовини, що проходить через переріз трубопроводу за одиницю часу. Кількість речовини може бути виміряна в одиницях маси чи об'єму. Одиниці маси дають більш повні відомості про кількість або витрату речовини, ніж одиниці об'єму, так як обсяг речовини, особливо газів, залежить від тиску і температури.

Витратоміри широко застосовують у різних сферах господарства, виробництва. Залежно від типу вимірюваного середовища, цілей використання і специфіки галузей застосування існують різні види таких приладів.

### 2.1 Класифікація витратомірів

Велика розмаїтість і складність вимог, що пред'являються до витратомірам і лічильників, стало причиною розробки і створення значного числа різновидів приладів. Умовно витратоміри і лічильники можна поділити на такі групи [9]:

- a) витратоміри, що використовують гідродинамічні методи: парціальні, змінного тиску, змінного рівня, обтікання, вихрові;
- b) витратоміри з безперервно рухомим тілом: камерні лічильники і витратоміри, силові, тахометричні;
- c) витратоміри, що засновані на різних фізичних явищах: акустичні, іонізаційні, оптичні, теплові, електромагнітні, ядерно-магнітні;
- d) витратоміри, що засновані на особливих методах: концентраційні, кореляційні, позначкові, з автоколивним тілом, з рухомою ділянкою трубопроводу, струменеві.

Серед приладів групи а виключно широке застосування отримали витратоміри зі змінним рівнем, що відносяться до приладів змінного перепаду тиску. Для малих витрат рідин і газів служать ротаметри й поплавкові прилади, які відносяться до витратомірів обтікання, дуже перспективні вихрові витратоміри.

З групи б значне застосування знаходять різні різновиди тахометричних витратомірів: турбінні, кулькові і камерні (роторні, з овальними шестернями), останні – в якості лічильників газу, нафтопродуктів та інших рідин.

Серед різноманітних приладів групи с частіше за інших застосовують електромагнітні витратоміри для вимірювання витрати електропровідних рідин й ультразвукові (різновид акустичних) для вимірювання рідин і часткового газу. Рідше зустрічаються теплові – для вимірювання малих витрат рідин і газів.

Позначкові і концентраційні витратоміри, які відносяться до групи d, служать для разових вимірювань, наприклад при перевірці промислових витратомірів на місці їх установки. Кореляційні прилади перспективні, зокрема, для вимірювання двофазних середовищ.

## 2.2 Конструкція та принцип дії електромагнітних витратомірів

Електромагнітний витратомір – витратомір, який створює магнітне поле, перпендикулярне потоку, що дозволяє вивести швидкість потоку з індукованої електрорушійної сили (ЕРС) провідної рідини в магнітному полі. Електромагнітний витратомір складається з основного пристрою і одного або декількох додаткових пристроїв [4, 6, 7]. Первинний пристрій електромагнітного витратоміра містить наступні елементи:

- електрично ізольована вимірювальна трубка, через яку протікає струмопровідна рідина, що підлягає вимірюванню;
- одна або кілька пар вимірювальних електродів, діаметрально протилежних, за якими вимірюється сигнал, що генерується в рідині;
- електромагніт для створення магнітного поля у вимірювальній трубці.

Первинний пристрій видає сигнал, пропорційний витраті, а в деяких випадках і опорний сигнал.

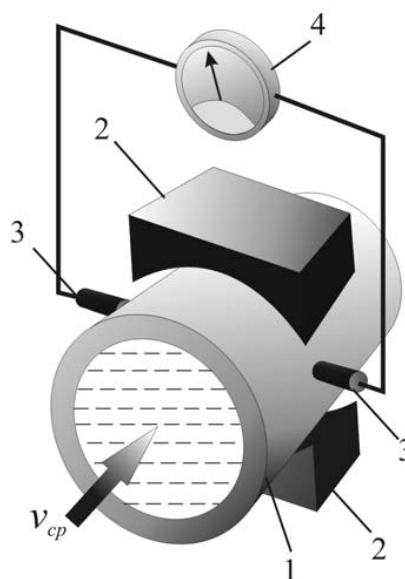
Вторинний пристрій – устаткування, яке містить схему, яка витягує сигнал потоку з сигналу електрода і перетворює його в стандартний вихідний сигнал, прямо пропорційний швидкості потоку. Це обладнання може бути встановлено на пристрої.

Витратоміри даного типу відносяться до безконтактних, тобто в них відсутній прямий контакт вимірюваного середовища з вузлами приладу. Ці витратоміри підрозділяються на прилади з електромагнітним перетворювачем витрати і прилади з електромагнітними перетворювачами швидкості потоку.

### 2.2.1 Витратоміри з електромагнітним перетворювачем витрати

Прилади з електромагнітним перетворювачем витрати засновані на взаємодії рідини, що рухається, з магнітним полем. Ця взаємодія підкоряється закону Фарадея, згідно з яким в рідині, що перетинає магнітне поле, індукується ЕРС, пропорційна швидкості руху рідини.

Принципова схема електромагнітного витратоміра показана на рисунку 2.1.



1 - трубопровід; 2 - котушки індуктивності; 3 - електроди; 4 - вимірювальний прилад

Рисунок 2.1 – Електромагнітний витратомір [10]



Трубопровід 1 з електропровідною рідиною, що переміщається в ньому, поміщений в магнітне поле, створюване двома котушками індуктивності (індукторами) 2. У стінки трубопроводу діаметрально протилежно в одному поперечному перерізі введені електроди 3 (урівень з внутрішнім діаметром труби). До електродів підключають будь-якої високочутливий вимірювальний прилад 4, шкала якого градуйована в одиницях швидкості або одиницях витрати.

Трубопровід виготовляють з ізоляційного матеріалу, для цієї мети використовують фторопласт, ебоніт, гуму і інші матеріали в залежності від властивостей вимірюваної рідини.

Відомо, що в рухомому провіднику, що перетинає силові лінії постійного магнітного поля, індуктується електрорушійна сила, величина якої визначається за формулою:

$$E = Blv, \quad (2.1)$$

де  $E$  – індукована в провіднику ЕРС;

$B$  – магнітна індукція;

$l$  – довжина провідника;

$v$  – швидкість руху провідника.

У разі вимірювання витрати рідини можна записати:

$$E = BDv_{cp}, \quad (2.2)$$

де  $D$  – внутрішній діаметр трубопроводу;

$v_{cp}$  – середня швидкість протікання рідини через поперечний переріз труби в зоні ЕРС, що індуктується.

Висловивши швидкість через об'ємну витрату  $Q$ , отримаємо (для трубопроводу круглого перетину):

$$E = 4BQ/\pi D, \quad (2.3)$$

З цієї формули випливає, що при однорідному магнітному полі ЕРС прямо пропорційна об'ємній витраті.

Отже, електромагнітний витратомір є по суті генератором, в якому провідником, що переміщається в магнітному полі, служить електропровідна рідина. Провідність рідини повинна бути не нижче  $10^{-5}$  -  $10^{-6}$  Сіменс, що відповідає провідності водопровідної води.

При вимірюванні витрати рідких металів, що мають електронну провідність, магнітну систему витратомірів утворюють постійні магніти, що створюють постійне магнітне поле. При вимірюванні витрати рідини з іонною провідністю для створення змінного магнітного поля застосовують електромагніти, що живляться змінним струмом. Пристрій останніх залежить від бажаної форми змінного магнітного поля. Серійно виготовляються витратоміри з рівномірним полем і полем, індукція якого задовольняє рівняння  $BW = \text{const}$ , тобто розподілена обернено пропорційно ваговій функції  $W$ .

Раніше, як правило, прагнули отримати в електромагнітних витратомірах якомога більш рівномірний магнітне поле. І тепер ще деякі серійно виготовлені витратоміри, особливо невеликих калібрів, мають таке поле. Його переваги: незалежність ЕРС від режиму течії (турбулентного або ламінарного) при симетричному вісі потоці, відсутність паразитного ЕРС від вихрових струмів Фуко, зменшення впливу кінцевих ефектів. Недолік рівномірного поля: велика протяжність магнітної системи уздовж трубопроводу ( $l/D = 3 \div 4$ ), внаслідок чого зростають маса, габаритні розміри, а також вартість перетворювача витрати і залежність ЕРС від ступеня деформації потоку при недостатній довжині прямої ділянки труби [10].

На рисунку 2.2 (а-д) показані магнітні системи, призначені для створення рівномірного магнітного поля.

Їх форма залежить від діаметра  $D$  трубопроводу. Так, для  $D$  значення параметра більше або дорівнює 25 мм зручний магнітопровід з шихтованої сталі з плоскими полюсами, між якими міститься труба (рисунок 2.2а). Але зі збільшенням  $D$  така система стає все більш громіздкою і вимагає значної витрати

трансформаторної сталі. У цих випадках доцільно електромагнітну систему робити в вигляді кількох шарів стрічки з магнітом'якого матеріалу, що охоплює трубу, а обмотку збудження розміщувати між стрічкою і трубою (рисунок 2.2б-2.2г). Недолік найпростішого різновиду такої системи, показаної на рисунку 2.2б, - великий повітряний зазор, а отже, і зайва витрата потужності. Для усунення цього недоліку стрічкового магнітопроводу надають форму еліпса (рисунок 2.2в) або овалу (рисунок 2.2г). При цьому магнітопровід наближається до труби в площині, перпендикулярній до площини розташування електродів, і повітряний зазор скорочується. Але тут довжина магнітних ліній в повітряному зазорі і рідини зменшується від центру труби до її краю. Щоб зберегти рівномірність магнітного поля, треба обмотку збудження розташовувати так, щоб магніторушійна сила зростала від країв труби до центру. Це поряд з вимогою повного заповнення обмоткою простору між трубою і магнітопроводом визначає геометрію останнього. Зі збільшенням діаметра труби  $D$  відбувається зменшення різниці осей овалу, і магнітопровід наближається за формою до кола. Тому для труб, що мають  $D$  значення параметра більше або дорівнює 300 мм, доцільно застосовувати круглий магнітопровід (рисунок 2.2д).

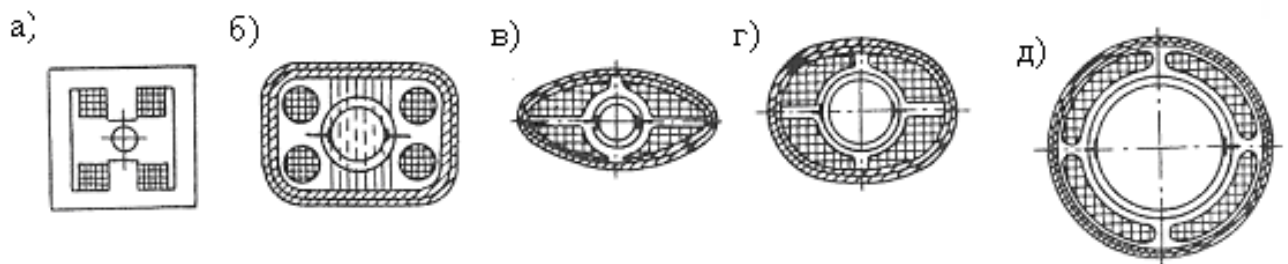


Рисунок 2.2 – Магнітні системи, що створюють рівномірний магнітне поле

До основних переваг постійного магнітного поля можна віднести:

- відносну простоту пристрою магнітної системи;
- можливість вимірювання витрат, що змінюються з високою частотою;
- відсутність численних перешкод, що виникають при застосуванні змінного магнітного поля;

– можливість вимірювання витрати речовин з низькою електричною провідністю.

Але постійному магнітному полю властивий суттєвий недолік – поляризація електродів, при якій змінюється опір перетворювача, а отже, з'являються суттєві додаткові похибки, що порушує нормальну роботу витратоміра. Поляризацію зменшують, застосовуючи електроди зі спеціальних матеріалів або спеціальні покриття для електродів (платинові, танталові).

У зв'язку з цим для вимірювання витрати звичайних рідин з іонною провідністю постійне магнітне поле не застосовують. Таке поле може бути використано для вимірювання витрати розплавлених металів, що мають електронну, а не іонну провідність.

Також електромагнітні витратоміри з постійним магнітним полем застосовують в лабораторіях і дослідницькій практиці при короткочасних вимірах, коли явище поляризації практично не помітно, і при вимірюванні швидкозмінних витрат, вимір яких при змінному магнітному полі неможливий.

В даний час в переважній більшості електромагнітних витратомірів застосовують змінне магнітне поле. Якщо магнітне поле змінюється в часі  $t$  з частотою  $f$ , то для трубопроводів круглого перерізу ЕРС дорівнює:

$$E = B_{max} \sin \omega t \times 4Q / \pi D, \quad (2.4)$$

де  $B_{max} = B / (\sin \omega t)$  – амплітудне значення магнітної індукції;

$\omega = 2\pi f$  – кругова частота.

При змінному магнітному полі електрохімічні процеси роблять менший вплив, ніж при постійному. Принципова схема електромагнітного витратоміра зі змінним магнітним полем наведена на рисунку 2.3.

В сучасних електромагнітних витратомірах для посилення сигналу, що знімається з перетворювача, використовують електронний підсилювач з великим вхідним опором. При цій умові в більшості випадків зміна опору перетворювача

при зміні параметрів контрольованого середовища не позначається на показаннях. Це важлива перевага електромагнітних витратомірів.

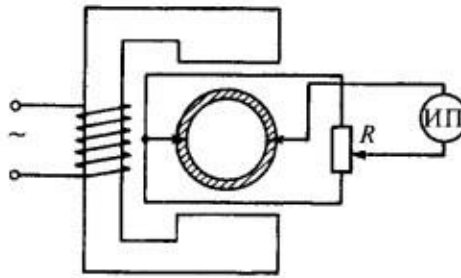


Рисунок 2.3 – Схема електромагнітного витратоміра зі змінним магнітним полем

У витратомірах зі змінним магнітним полем виникають перешкоди, як в перетворювачі, так і поза ним. В основному на похибку вимірювання впливають перешкоди: паразитні від зовнішніх ланцюгів; ємнісні від змінного струму, що живить електромагніт; індукційні («трансформаторні») від магнітного поля перетворювача. Перші дві перешкоди вдається усунути екрануванням приладу.

Для виключення трансформаторної ЕРС використовують різні способи. Один із способів полягає в застосуванні двох індукційних перетворювачів (з самостійними магнітами), включених таким чином, що магнітні поля в них спрямовані в протилежні сторони. Додаткові ЕРС взаємоіндукції при цьому (як рівні за величиною і за фазою, але протилежні по напрямку) взаємно знищуються в первинній обмотці вихідного трансформатора.

Комплект загальнопромислового електромагнітного витратоміра складається з перетворювача витрати і вимірювального блоку. Конструктивно перетворювач включає два вузла – трубу й електромагніт. Перетворювач містить також контур для пригнічення трансформаторної ЕРС.

### 2.2.2 Витратомір з електромагнітними перетворювачами швидкості потоку

Для великих діаметрів труб розроблені витратоміри з електромагнітними перетворювачами швидкості. Вони простіше і дешевше. Зі збільшенням діаметра

труби ці переваги посилюються. Але витратоміри з перетворювачами швидкості вимагають великих прямих ділянок труб.

На рисунку 2.4 (а, б) показані два варіанти подібних перетворювачів [11].

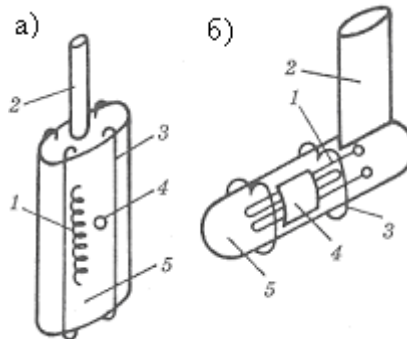


Рисунок 2.4 – Схема електромагнітного перетворювача швидкості з віссю

В трубопровід в місце знаходження середньої швидкості вводиться за допомогою штанги 2 пустотіла обтічник 5, в якому розміщені обмотка збудження магнітного поля 1 і електроди 4. Через 3 позначені силові лінії магнітного поля. Ось перетворювача (обтічника) на рисунку 2.4а паралельна штанзі і перпендикулярна до потоку, а на рисунку 2.4б паралельна потоку і перпендикулярна до штанги. Перший перетворювач зручніше вводити в трубопровід, але у нього електроди знаходяться там, де відбувається зрив вихрив з обтічника, що викликає сильну пульсацію сигналу, яку треба пригнічувати в вимірювальній схемі.

Істотно відрізняється від усіх розглянутих витратомірів з електромагнітними перетворювачами швидкості новий витратомір типу площа-швидкість-градієнт, труб великого діаметру, що не мають достатнього прямого ділянки, коли профіль швидкостей може бути сильно деформований (рисунок 2.5).

Перетворювачі швидкості у нього відповідають рисунку 2.4б, але відстань між електродами 60 мм і розташовані так, що лінії, що з'єднують електроди, спрямовані по радіусу труби. Це дозволяє вимірювати радіальні градієнти швидкості. Сигнали з електродів 1 проходять через підсилювачі 5, на виході з яких групуються в два канали. радіусу, а по іншому – з електродів, що знаходяться на меншому радіусі.

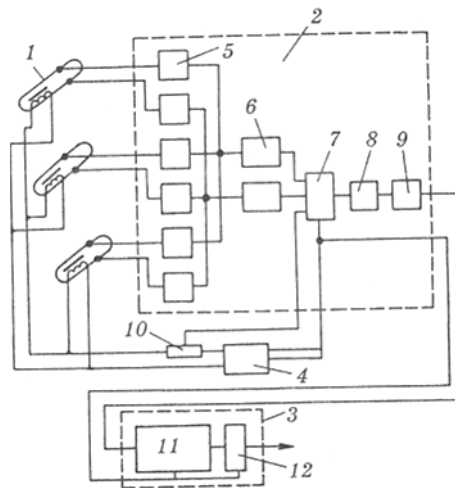


Рисунок 2.5 – Блок-схема витратоміра типу площа-швидкість-градієнт

По одному надходять сигнали з електродів, розташованих на колі більшого діаметра. Сигнали в кожному каналі складаються в суматорах 6 і подаються в комутатор 7, куди подається також сигнал з опорного опору 10, що характеризує силу струму в індукторі, що надходить від блоку живлення 4. Комутатор 7 через підсилювач 8 і перетворювач «напруга-частота» 9 пов'язаний з мікропроцесором 11, який управляє комутатором і блоком живлення, так що індуктори перетворювачів живляться періодично повторюваними однополярними прямокутними імпульсами тривалістю 330 мс і інтервалом між ними 670 мс. Вимірювальний сигнал з кожного електрода – це різниця сигналів при наявності магнітного поля і при його відсутності. Це виключає вплив поляризації електродів на покази. Крім того, мікропроцесор перетворює частотні вхідні сигнали в двійковий код і робить обробку сигналів і обчислення витрат відповідно до заданої програми. На виході мікропроцесора є цифро-аналоговий перетворювач 12. Елементи 5-9 знаходяться в блоці підготовки сигналів 2, а мікропроцесор 11 і перетворювач 12 в вимірювально-обчислювальному пристрої 3. Регулятор потоку типу площа-швидкість-градієнт призначений для труб діаметром від 1250 мм до 3600 мм і на максимальні витрати від 0,63 м/с до 50 м/с. Основна похибка – значення параметра плюс мінус 1,5 %, вихідний сигнал від 0 мА до 5 мА та від 4 мА до 20 мА, споживана потужність не більше 200 ВА [11].

## 2.3 Метрологічні характеристики та галузь використання електромагнітних витратомірів

Похибка електромагнітних витратомірів визначається в основному похибками їх градуювання і похибками вимірювання різниці потенціалів ЕРС. Однак електрохімічні процеси в потоці рідини, різні перешкоди і наведення, мінливість напруги живлення та інші, на даний момент не дозволяють отримати тієї потенційно високої точності вимірювань витрати, яка випливає з принципу дії даного типу витратомірів. Так, виготовлені в СРСР електромагнітні витратоміри, незважаючи на індивідуальне градуювання (на високоточних витратомірних стендах) і досить досконалі засоби вимірювання ЕРС, мають клас точності від 1,0 % до 2,5%.

Проте електромагнітні витратоміри широко застосовують в металургійній, біохімічній і харчовій промисловості, в будівництві, в медицині, так як вони малоінерційні в порівнянні з витратомірами інших типів. Витратоміри незамінні в тих процесах автоматичного регулювання, де запізнення грає істотну роль, або при вимірюванні швидко мінливих витрат.

Гідравлічні втрати на приладі мінімальні, тому що первинні перетворювачі електромагнітних витратомірів не мають частин, що виступають всередину трубопроводу, звужень або змін профілю. Ці витратоміри використовують в біохімічній і харчовій промисловості, де домінуючими є вимоги до стерильності вимірювань середовища, так як перетворювач витратоміра і технологічний трубопровід можна чистити і стерилізувати без демонтажу. Відсутність порожніх заглиблень виключає застій і коагулювання вимірюваного продукту.

Електромагнітні витратоміри можна монтувати в будь-якому положенні на відстанях, рівних не менше 20 діаметрів трубопроводу після місцевих опорів і не менше восьми діаметрів до місцевих опорів. Також конструкція первинних перетворювачів дозволяє застосовувати новітні ізоляційні, антикорозійні і інші покриття, що дає можливість вимірювати витрати агресивних і абразивних середовищ.



Зазначені переваги і забезпечили досить широке поширення електромагнітних витратомірів, незважаючи на їх відносну конструктивну складність і необхідність ретельного щоденного технічного догляду (підрегулювання нуля, підналаштування і т.п.).

Електромагнітні витратоміри застосовують для вимірювання дуже малих ( $3 \times 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/с) витрат (наприклад, для вимірювання витрати крові по кровоносних судинах) і великих витрат рідин (3 м<sup>3</sup>/с). Причому діапазон виміру витратоміра одного типорозміру досягає значення 10:1, тобто досить великий [9].

Діапазон вимірюваних швидкостей потоку електромагнітними витратомірами становить від одиниць міліметрів в секунду до 10-15 метрів в секунду. Похибки вимірювання лежить в межах від 0,25 % до 1% в діапазоні швидкостей від 0,3 м/с до максимуму (діапазон 1:30). На менших швидкостях (від 0,03 м/с до 0,3 м/с) похибка збільшується, але розкид між вимірами (повторюваність) ще залишається близько 0,1 % - 0,25 %. Для багатьох застосувань, наприклад, при використанні електромагнітних витратомірів в технологічних установках, стабільність і повторюваність набагато важливіше абсолютної точності.

Методика визначення необхідного діаметра витратоміра заснована на правильній оцінці робочого діапазону швидкостей середовища. У більшості випадків слід прагнути до швидкості потоку від 1 м/с до 5 м/с. Для корозійних середовищ нормальною швидкістю є діапазон від 1 м/с до 3 м/с. Швидкість нижче зазначеної буде погіршувати точність вимірювань, а перевищення верхнього рівня скоротить термін служби витратоміра.

Також на точність показань впливає розчинене у воді повітря. Від нього неможливо позбутися, і його наявність призводить до завищення результатів вимірювань. Крім того, дуже великі бульбашки (близько розміру електродів) призводять до сильного зашумлення вихідного сигналу. В таких умовах рекомендується застосування витратоміра з великим діаметром і більш низькою швидкістю потоку.

Номинальна точність гарантується при певних умовах, наприклад, стандартною вимогою є вимога прямих ділянок: 5 діаметрів до і 2 після витратоміра.

Для виключення невизначених значень на швидкостях нижче зони гарантованої роботи слід передбачати відсічення показань близько нуля.

Важливою умовою нормальної роботи магнітних витратомірів є електричне заземлення на робоче середовище по обох кінцях каналу, тому що витратомір є частиною ланцюга поточних через середу електричних струмів. Погана якість заземлення призводить до зрушення нуля на вимірювальному виході витратоміра.

При високих вимогах до точності і постійній роботі на маленьких швидкостях може знадобитися додаткове періодичне очищення електродів від відкладень, так як в цьому випадку не забезпечується ефективне промивання електродної зони.

Універсальність електромагнітного методу вимірювання обумовлюється також і широкими функціональними можливостями, які дозволяють створити безінерційний вимірювач з лінійної градуйованою характеристикою, характер якої не залежить від фізико-хімічних властивостей вимірюваного середовища.

На сьогоднішній день розроблені методики і проведені експериментальні фундаментальні дослідження створених електромагнітних витратомірів для трубопроводів великих діаметрів, виконаних з використанням магніто-гідродинамічних перетворювачів витрати з локальним магнітним полем. Такі витратоміри мають лінійну градувальну характеристику і похибка вимірювання витрати не більш 1,0 %.

Але витратоміри даного типу непридатні для вимірювання витрати газів, а також рідин з малою електропровідністю, що є їх істотним недоліком. Але застосування розроблюваних в даний час спеціальних автокомпенсувальних пристроїв дозволить істотно знизити вимоги до електропровідності вимірюваних середовищ і створити електромагнітні витратоміри для вимірювання витрати будь-яких рідин, в тому числі і нафтопродуктів.

Таким чином, можна виділити наступні основні переваги та недоліки електромагнітних витратомірів.

Перевагами електромагнітних витратомірів є:

- незалежність показань від в'язкості і щільності вимірюваної речовини;
- можливість реалізації методу для дуже великих діаметрів трубопроводів і відсутність при цьому додаткового динамічного опору;
- лінійність шкали;
- потрібність в менших довжинах прямих ділянок труб, ніж у інших витратомірів;
- висока швидкодія;
- можливість вимірювання агресивних, абразивних і в'язких рідин;
- працездатність при високому тиску середовища – до 100 МПа.

До недоліків слід віднести:

- неможливість використання витратомірів для непровідних рідин (вуглеводні, аміак, кислоти та ін.);
- наявність додаткової похибки від величини електропровідності рідини;
- можливість відкладення магнетиту на стінках вимірювального трубопроводу витратоміра і значне збільшення похибки при наявності оксидів заліза у воді;
- необхідність розрізання трубопроводу, приварювання фланців і установки вимірювального трубопроводу, що часто неможливо.

Таким чином, електромагнітний метод вимірювання витрати дозволяє створювати вимірювальні прилади з високими метрологічними та експлуатаційними характеристиками.

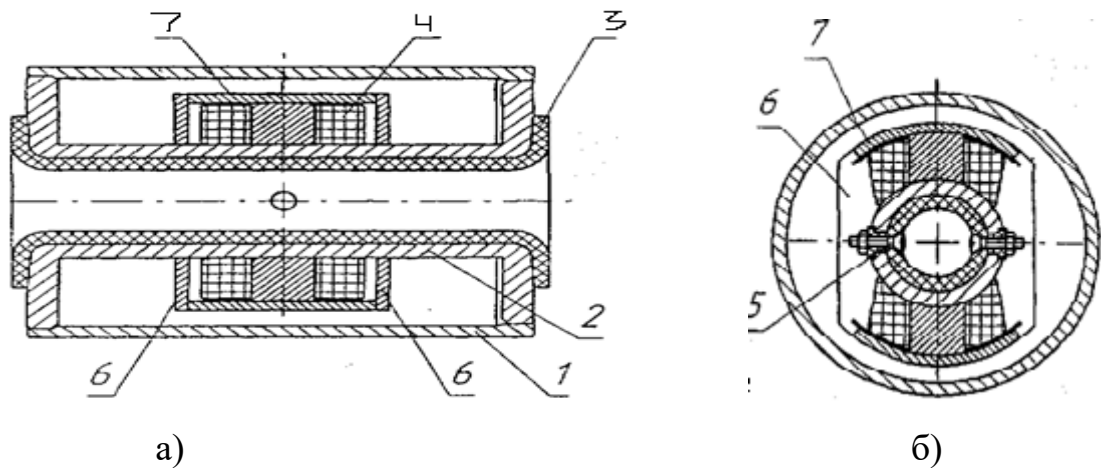
Отже, при проектуванні сучасних електромагнітних витратомірів необхідно вирішувати ряд завдань, основними з яких є наступні:

- 1) вимірювання в трубопроводах великого діаметру;
- 2) вимірювання середовищ з низькою провідністю;
- 3) можливість використання приладів в автономному режимі живлення і передачі інформації на великі відстані без втрат і спотворень.

### 3 ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМКІВ ПОЛІПШЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИТРАТОМІРІВ

#### 3.1 Зменшення розсіювання магнітної енергії

Зменшення розсіювання магнітної енергії, збільшення екранування від зовнішніх магнітних полів без значного підвищення вартості приладу може забезпечити спеціальна конструкція електромагнітного витратоміру (рисунок 3.1-3.2).



а – вид спереду, б – вид з боку

1 – корпус, 2 – екран, 3 – неелектропровідна ізоляція, 4 – полюса електромагніту, 5 – електроди,  
6 – пластини, 7 – скоби

Рисунок 3.1 – Електромагнітний витратомір зі зменшенням розсіювання магнітної енергії

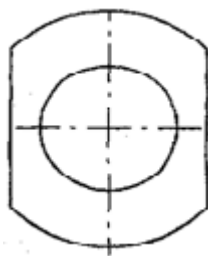


Рисунок 3.2 – Пластина магнітопроводу

Електромагнітний витратомір (рисунок 3.1) містить корпус 1, виконаний з алюмінію і має форму труби. У корпус поміщено ділянку трубопроводу 2, виконаного з немагнітного матеріалу. Внутрішня поверхня трубопроводу покрита шаром неелектропровідної ізоляції 3, наприклад фторопластом. Трубопровід встановлений між полюсами електромагніту 4. У трубопроводі встановлено електроди 5. Вони повинні бути встановлені в площині, перпендикулярній напрямку силових ліній поля електромагніту. По обидва боки електромагніту на трубопровід 2 надіті дві пластини 6, встановлені паралельно один одному.

Пластини 6 з'єднані один з одним скобами 7, які встановлені паралельно осі трубопроводу 2 і жорстко з'єднані з відповідним сердечником електромагніта. Частина кожної пластини магнітопроводу, сполучена зі скобою, виконана в формі частини кола, а скоба виконана у формі циліндричної поверхні, радіус якої дорівнює радіусу кола пластини. Скоби і пластини виконані з електротехнічної сталі. Ширина скоб може дорівнювати ширині пластин, але може бути і ширше. У другому випадку екрануючі властивості магнітопроводу будуть краще.

У даному випадку витратомір міститиме виконаний з алюмінію трубчастий корпус, в якому розміщена ділянка трубопроводу, виготовленого з немагнітного матеріалу і покритого всередині шаром неелектропровідної ізоляції (наприклад, фторопластом). Трубопровід поміщений між полюсами електромагніта і забезпечений електродами. По різні боки від електромагніту на трубопровід надіті дві встановлені паралельно один одному пластини, з'єднані двома скобами, кожна з яких проходить через відповідний сердечник, що утворюють магнітопровід. У варіанті витратоміра частина кожної пластини магнітопроводу, сполучена зі скобою, виконана в формі частини кола, а скоба виконана у формі циліндричної поверхні, радіус якої дорівнює радіусу кола пластини. Це забезпечить підвищення чутливості і точності вимірювання завдяки тому, що магнітопровід виконує функцію магнітного екрану.

Зміна конструкції магнітопроводу призводить до зміни конфігурації магнітних силових ліній у витратомірі: ліквідовані додаткові магнітні ланцюги, утворені електромагнітом і фланцями корпусу. Через те, що магнітопровід екранує

більшу частину електромагніту, він виконує функцію захисного екрану. Технічний результат, який при цьому досягається, полягає в зменшенні втрат магнітного поля за рахунок зменшення його розсіювання і збільшенні екрануючих властивостей магнітопроводу від впливу зовнішніх магнітних полів.

### 3.2 Витрата зі складною кінематичною структурою потоку

Іншим напрямком поліпшення метрологічних характеристики витратомірів є такий, що дозволить більш точно вимірювати витрату рідин зі складною кінематичною структурою потоку.

Метою визначеного напрямку є підвищення точності вимірювання витрати при складних розподілах швидкості потоку в робочому обсязі каналу витратоміра. Ця мета досягається тим, що в удосконаленому витратомірі є можливість обчислювати витрату з урахуванням поправки на асиметрію розподілу швидкості по двох взаємно ортогональних напрямків поперечного перерізу каналу.

Як відомо, будь-яку складну кінематичну структуру потоку можна уявити як суму двох структур, описуваних за взаємно ортогональними напрямками поперечного перерізу каналу, пересічних в центрі каналу.

Відмінністю витратоміра у тому, що він має два однакових чутливих елемента, розміщених поруч на одній трубі, але розгорнутих по осі каналу відносно один одного на  $90^\circ$ . Труба з двома чутливими елементами охоплена одним загальним циліндричним магнітопроводом, причому вісь магнітопроводу збігається з віссю каналу. Для того щоб робочі перетини каналу з електродами обох чутливих елемента були б максимально наближені, індукційні котушки розташовані на трубі в шаховому порядку в два ряди таким чином, що суміжні котушки практично примикають своїми гранями ромба один до одного, а гострими кутами ромба до електродів. При цьому кожна пара електродів і пара індукційних котушок взаємно розташовані на трубопроводі за традиційною схемою електромагнітного витратоміра. Кожна індукційна котушка розташована на трубі короткою діагоналлю вздовж твірної труби, а довгою діагоналлю – по периметру труби.

Причому котушки на трубі розташовуються таким чином, що довгі осі ромба котушок складають частину периметра труби, на якому розташовані електроди, а зовнішня сторона кожної котушки гострими кутами ромба близько примикає до електродів, встановлених на трубі протилежно один одному по діаметру каналу.

Причому площини, що проходять через лінію, що сполучає електроди і вісь труби кожного чутливого елемента, повернені щодо один одного навколо осі каналу на  $90^\circ$ . Вимірювальний пристрій забезпечує вимір сигналів електродів і струмів живлення у двох чутливих елементів. Алгоритм обчислення витрат має вигляд:

$$Q = a \cdot \left( \frac{U_{11}}{I_{11}} + \frac{U_{21}}{I_{21}} \right) \cdot \left[ 1 + b \cdot \left( \frac{U_{12}}{I_{12}} + \frac{U_{22}}{I_{22}} \right) + c \cdot \left( \frac{U_{12}}{I_{12}} + \frac{U_{22}}{I_{22}} \right) + \dots \right], \quad (3.1)$$

де  $U_{11}, U_{12}, I_{11}, I_{12}$  відносяться до першого чутливого елемента,

$U_{21}, U_{22}, I_{21}, I_{22}$  відносяться до другого чутливого елемента;

$U_{11}, I_{11}$  – напруга між електродами першого чутливого елемента і струм живлення індуктора при зустрічному включенні котушок збудження магнітного поля;

$U_{21}, I_{21}$  – напруга між електродами другого чутливого елемента і струм живлення індуктора при зустрічному включенні котушок збудження магнітного поля;

$U_{12}, I_{12}$  – напруга між електродами і струм живлення індуктора першого чутливого елемента при зустрічному включенні котушок збудження магнітного поля;

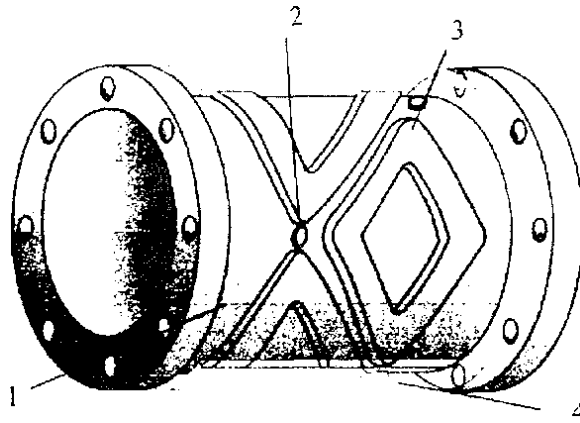
$U_{22}, I_{22}$  – напруга між електродами і струм живлення індуктора другого чутливого елемента при зустрічному включенні котушок збудження магнітного поля;

$b, c$  – коефіцієнти, що визначаються розрахунковим або експериментальним методами.

Таким чином обчислюються поправки на асиметрію потоку по двох взаємно перпендикулярних напрямках поперечного перерізу каналу. Одна поправка визначається по лінії, перпендикулярній площині, що проходить через вісь каналу і пару електродів першого чутливого елемента, а інша – по лінії, перпендикулярній площині, що проходить через вісь каналу і пару електродів другого чутливого елемента.

Завдяки цьому забезпечується підвищення точності вимірювання витрати при складному профілі швидкості потоку (тобто при складній кінематичній структурі потоку).

Конструкцію електромагнітного витратоміра пояснює рисунок 3.3.



1 – труба, 2 – електроди, 3. – котушка, 4 – магнітопровід циліндричної форми

Рисунок 3.3 – Електромагнітний витратомір для вимірювання витрати зі складною кінематичною структурою потоку

На ньому зображена схема розташування котушок і електродів на трубі витратоміра. Електромагнітний витратомір має трубу 1, виконану з немагнітного і неелектропровідного матеріалу. У трубі встановлено дві пари електродів. Електроди 2 кожної пари розташовані по периметру труби діаметрально один до одного в двох різних площинах поперечного перерізу каналу. Згадані перетини каналу, в яких розташовані відповідні пари електродів, розміщені по осі труби на відстані, рівній приблизно половині зовнішнього розміру короткої діагоналі ромбовидної індукційної котушки. Причому площини, що проходять через



відповідні пари електродів і вісь каналу, знаходяться під кутом  $90^\circ$  один до одного. На зовнішній поверхні труби розташовані в шаховому порядку, в два ряди чотири ромбовидні індукційні котушки. Кожна котушка з короткою діагоналлю ромба розташована вздовж твірної труби, а довгою діагоналлю ромба по периметру труби. Між гострими кутами суміжних котушок розташовані електроди, а гранями ромба індукційні котушки близько розташовані один до одного. Витратомір має магнітопровід 4 циліндричної форми. Він розташований співвісно з трубою і охоплює трубу з електродами і чотирма індукційними котушками.

Робота витратоміра полягає в наступному. На горизонтальній ділянці технологічного трубопроводу витратомір встановлюється таким чином, щоб осі, що з'єднують кожен пару електродів, перебували під кутом  $45^\circ$  до горизонтальної площини. За допомогою вимірювального пристрою проводиться періодичне і послідовне підключення індукційних котушок і електродів кожного чутливого елемента до загального джерела живлення. Внаслідок протікання струму по витках індукційних котушок в робочому обсязі каналу збуджується магнітне поле, спрямоване перпендикулярно площині, що проходить через вісь електродів і вісь каналу відповідного чутливого елемента. При русі електропровідної рідини по каналу труби в його робочому обсязі, відповідно до закону Фарадея індукується електричне поле, напруженість якого пропорційна швидкості потоку рідини. Регулятор потоку має вимірювальний пристрій, за допомогою якого вимірюються різниця потенціалів між електродами кожного чутливого елемента і струмом живлення індукційних котушок. Вимірювання сигналів кожного чутливого елемента проводиться по черзі в двох режимах. Один з режимів вимірювання відповідає традиційному включенню індукційних котушок до джерела живлення, при якому магнітні поля котушок взаємно складаються. А інший режим вимірювання відповідає зустрічному включенню індукційних котушок до джерела живлення, при якому магнітні поля котушок взаємно віднімаються. При першому режимі вимірювання сигнал між електродами кожного чутливого елемента характеризує приблизну середню швидкість потоку, а при другому режимі вимірювання сигнал між електродами характеризує асиметрію розподілу

швидкості потоку по лінії, перпендикулярній площині, що проходить через осі електродів і каналу. Значення об'ємної витрати  $Q$  визначається за формулою (3.1).

### 3.3 Вимірювання витрати при змінному рівні заповнення каналу трубопроводу

Відомі електромагнітні витратоміри для вимірювання витрати електропровідних рідин, що мають ділянку трубопроводу з немагнітного матеріалу, електромагнітну систему (індуктор), що складається з магнітопровода і котушок збудження, електродів, що контактують з вимірюваною рідиною, і вимірювального пристрою. Недоліком таких витратомірів є низька чутливість до зміни рівня заповнення каналу вимірюваним середовищем і тому їх низька точність вимірювання.

Цей недолік частково усунений в електромагнітному витратомірі [12], призначеному для вимірювання потоків при неповній заповненості каналу.

Електромагнітний витратомір [12] також має ділянку трубопроводу, виконаний з немагнітного і неелектропровідних матеріалу, дві котушки збудження, що мають загальну вісь, перпендикулярну осі каналу, і магнітний корпус, що охоплює трубопровід з котушками порушення. На відміну від згаданого витратоміра [12] має не одну, а кілька пар електродів, наприклад дві або три пари, розташовані в центральному перерізі трубопроводу по його периметру. За допомогою керованого комутаційного пристрою витратоміра здійснюється програмне перемикання котушок збудження до джерела живлення: по чергове, згідне і зустрічне включення обох котушок. Залежно від схеми включення котушок в каналі витратоміра створюється різний розподіл магнітного поля.

Вимірювальний пристрій витратоміра багатоканальний з числом каналів, відповідним числу пар електродів.

В основі роботи електромагнітного витратоміра лежить взаємодія рухомої електропровідної рідини з магнітним полем, що підкоряється закону електромагнітної індукції. Особливість роботи відомого витратоміра [12] полягає в

наступному. При русі потоку по каналу в рідині виникає електричне поле, яке визначається швидкістю потоку, розподілом магнітного поля в каналі і «живим» перетином, тобто площею поперечного перерізу потоку рідини. При цьому магнітне поле збудження періодично змінюється в залежності від різної схеми включення котушок. Сигнали, що знімаються парами електродів, посилюються в вимірювальній пристрої витратоміра і запам'ятовуються. Таким чином готується база даних при магнітних полях, утворених різними включеннями котушок до джерела живлення. Далі обчислювальній пристрій за спеціальним алгоритмом розраховує середню швидкість потоку і площа «живого перетину», а отже, і об'ємна витрата вимірюваного середовища.

Недоліком витратоміра [12] є слабка чутливість до зміни «живого» перетину потоку. Це пояснюється тим, що магнітне поле, утворене котушками збудження, вісь яких вертикальна і перпендикулярна осі каналу, створює потенційне електричне поле в потоці рідини. Залежність електричного поля в каналі витратоміра від зміни граничних умов, тобто від зміни рівня заповнення каналу рідиною, визначається тільки неоднорідністю розподілу магнітного поля уздовж вертикальної осі, викликаній зміною компоненти магнітного поля, спрямованого уздовж осі каналу. При вживаному в витратомірі [12] розташуванні котушок компонента магнітного поля, спрямована уздовж осі каналу, невелика і визначається протяжністю індуктора уздовж твірної трубопроводу. Чим коротше індуктор уздовж каналу, тим ця компонента вище, тобто тим вище чутливість витратоміра до зміни рівня заповнення каналу, однак при цьому знижується чутливість витратоміра до швидкості потоку, тому що зменшується компонента магнітного поля, спрямована по вертикалі, тобто перпендикулярно лініям, що з'єднує пари електродів. Тут слід зазначити, що при безнапірному перебігу рідини по трубопроводу зі зміною витрати майже пропорційно йому змінюється «живий» перетин потоку і майже не змінюється його середня швидкість.

Витратомір, виконаний за пропонованого винаходу, вільний від цього недоліку: має високу чутливість як до швидкості потоку, так і до зміни площі «живого» перетину потоку.

Пропонований електромагнітний витратомір відрізняється тим, що має додатково дві котушки збудження із загальною віссю, що збігається з віссю каналу витратоміра. Ці додаткові котушки розташовані на трубопроводі, включені назустріч один одному і рівновіддалені від центрального перетину каналу, в якому розташовані електроди.

Конструкція і принцип дії витратоміра пояснюють рисунки 3.4-3.6.

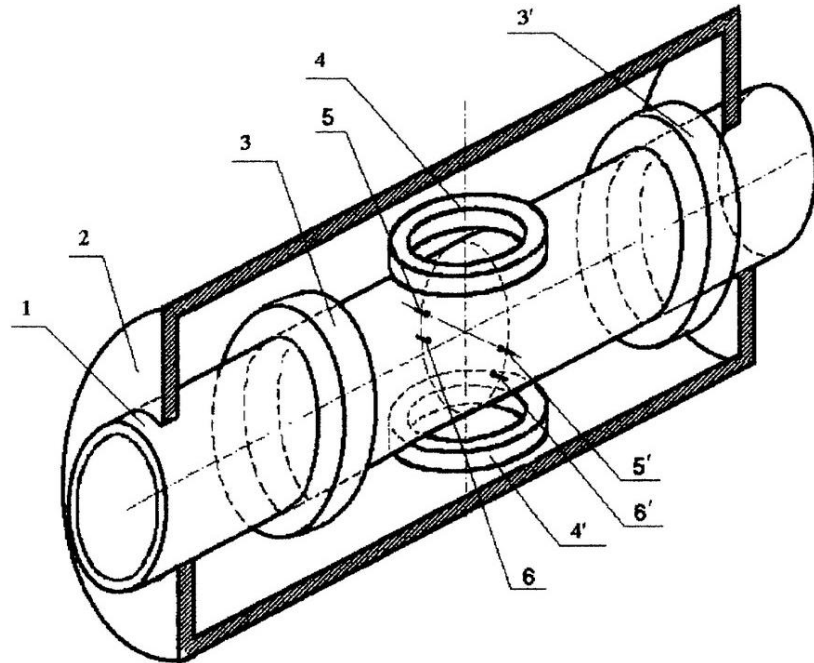


Рисунок 3.4 – Електромагнітний витратомір для вимірювання витрати в трубах великого діаметра при змінному рівні заповнення каналу

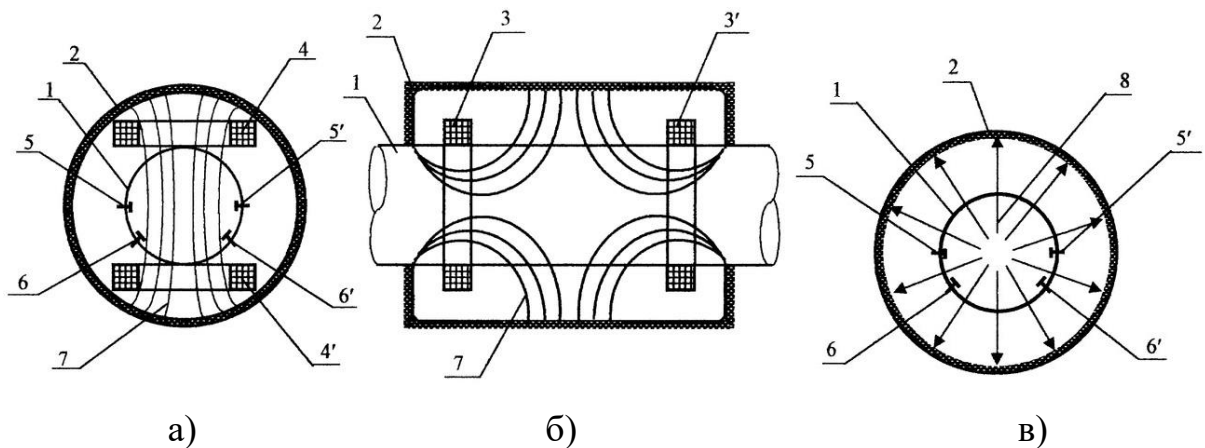


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд електромагнітного витратоміра при змінному рівні заповнення каналу трубопроводу

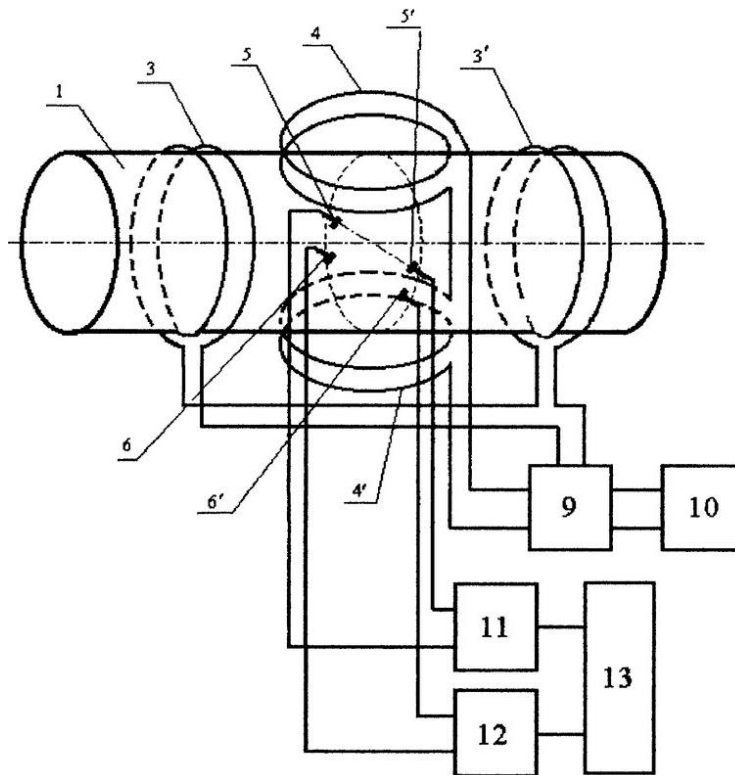


Рисунок 3.6 – Структурна схема електромагнітного витратоміра при змінному рівні заповнення каналу трубопроводу

На рисунку 3.4 зображена конструкція витратоміра, де 1 – ділянка трубопроводу, виконана з немагнітного і неелектропровідного матеріалу; 2 – корпус витратоміра, який одночасно є магнітопроводом; 3 і 3"- дві котушки збудження, розташовані на трубопроводі, їх загальна вісь збігається з віссю каналу, а площині витків паралельні поперечним перерізом каналу; 4 і 4" – дві котушки збудження, їх загальна вісь перпендикулярна осі каналу; 5 і 5"- пара електродів, розташована по діаметру каналу, що з'єднує їх лінія перпендикулярна осі каналу; 6 і 6" – пара електродів, розташована по хорді, паралельної лінії електродів 5 і 5".

На рисунку 3.5 зображено розподіл магнітного поля в каналі, викликане різними парами котушок збудження. На рисунку 3.5.а зображено розподіл магнітного поля, утвореного двома котушками збудження, загальна вісь яких перпендикулярна осі каналу, де 1 – трубопровід, 2 – корпус і одночасно магнітопровід, 4 і 4" – котушки збудження, загальна вісь яких перпендикулярна осі каналу, 5 і 5" – електроди, розташовані по діаметру каналу, 6 і 6" – електроди, розташовані по хорді, 7 – силові лінії магнітного поля. На рисунку 3.5б зображено

розподіл магнітного поля в каналі, утвореного котушками збудження, загальна вісь яких збігається з віссю каналу, де 1 – трубопровід, 2 – корпус і одночасно магнітопровід, 3 і 3" – котушки збудження, загальна вісь яких збігається з віссю каналу, 7 – силові лінії магнітного поля. На рисунку 3.5в зображено розподіл магнітного поля в центральному перерізі каналу (де розташовані електроди), утворене двома котушками порушення, загальна вісь яких збігається з віссю каналу, де 1 – трубопровід, 2 – корпус і одночасно магнітопровід, 5 і 5" – пара електродів, розташована по діаметру каналу, 6 і 6" – пара електродів, розташована по хорді, 8 – радіальна компонента магнітного поля.

На рисунку 3.6 зображена схема витратоміра, де 1 – трубопровід, 3 і 3" – котушки збудження, загальна вісь яких збігається з віссю каналу, 4 і 4" – котушки збудження, загальна вісь яких перпендикулярна осі каналу, 5 і 5" – пара електродів, розташована по діаметру каналу, 6 і 6" – пара електродів, розташована по хорді, 9 – комутатор, 10 – джерело живлення, 11 – вимірювальний канал сигналу, що знімається з пари електродів 5 і 5", 12 – вимірювальний канал сигналу, що знімається з пари електродів 6 і 6", 13 – обчислювач.

Робота витратоміра полягає в наступному.

Якщо рівень рідини в каналі знаходиться між повним заповненням і половиною поперечного перерізу каналу, то вимірювання витрати проводиться шляхом обробки сигналів, що знімаються з пари електродів, які розташовані по діаметру каналу (5 і 5", рисунок 3.3). Якщо рівень заповнення знаходиться нижче розташування електродів 5 і 5", то сигнал з них буде відсутній через розімкнутість електродів електропровідної рідиною. В цьому випадку вимірювання витрати здійснюється шляхом обробки сигналів, що знімаються тільки з пари електродів, які розташовані по хорді (6 і 6", рисунок 3.3) і омиваються вимірюваним середовищем.

Вимірювання витрати здійснюється при двох режимах включення котушок збудження, які створюються по черзі. Коли до джерела живлення підключені котушки, вісь яких перпендикулярна осі каналу, то в центральному перерізі каналу утворюється в основному вертикальна компонента магнітного поля (рисунок 3.2а);

в цьому випадку сигнал, що збуджується на електродах, визначається середньою швидкістю потоку і мало залежить від рівня заповнення каналу. Сигнал, що знімається з електродів, запам'ятовується обчислювачем. Потім відключаються котушки збудження 3 і 3" і джерело живлення 10 підключається до котушок 4 і 4", загальна вісь яких збігається з віссю каналу (рисунок 3.6). Оскільки ці котушки включені назустріч один одному, то в центральному перерізі каналу виникає значна радіальна компонента магнітного поля, яка різко змінюється по радіусу труби, швидко зменшуючись до центру каналу до нуля (рисунок 3.5б-3.5в). Сигнал, що виникає від взаємодії цього магнітного поля з потоком рідини, має високу чутливість до зміни рівня заповнення каналу і швидкості руху вимірюваного середовища. При повному заповненні каналу сигнал між електродами 5 і 5" дорівнює нулю в силу повної симетрії електричного поля щодо лінії 5-5". У міру зниження рівня рідини сигнал на електродах 5 і 5" збільшується і досягає максимального значення, коли рівень наближається до лінії, що з'єднує розглянуту пару електродів. В тому випадку, якщо рівень рідини опустився нижче розташування електродів 5 і 5", то вимірювання витрати та рівня проводиться за сигналами, що знімається з електродів 6 і 6 ". Отриманий сигнал запам'ятовується обчислювачем. за результатами вимірювань сигналів, що відповідають двом режимам живлення котушок збудження, обчислюється об'ємна витрата рідини і рівень заповнення каналу.

Використання запропонованого рішення дозволяє розширити функціональні можливості електромагнітного способу вимірювання витрати: вимірювати витрату при змінному рівні заповнення каналу трубопроводу з високою чутливістю як до швидкості потоку, так і до зміни площі «живого» перетину потоку.

Прилад надає можливість вимірювання витрати електромагнітним способом в трубопроводах великих діаметрів при неповністю заповненому каналі, тобто змінюваному рівні заповнення каналу, і в напірних трубопроводах при вимірюванні витрати багатofазних середовищ, наприклад пульп.

### 3.4 Зниження матеріаломісткості, виключення ураження електричним струмом

Відомий витратомір типу РЕН-1, призначений для вимірювання витрати рідких середовищ з питомою провідністю від  $10^{-3}$  См/м до 10 См/м, що складається з первинного вимірювального перетворювача, що включає немагнітну трубу і вузол електромагніту, підсилювача попереднього УП-ЕМР, вимірювального пристрою. Крім того існує витратомір типу ІР-61, що складається з первинного перетворювача, що включає немагнітну трубу і вузол електромагніту, і передавального вимірювального перетворювача, що включає підсилювальний пристрій, буферний підсилювач, підсилювач різницевого сигналу, синхронний детектор, фільтр низьких частот, підсилювач постійного струму, пристрій негативного зворотного зв'язку, компенсаційний стабілізатор.

Недоліками цих витратомірів є велика матеріаломісткість, складність конструкції, небезпека ураження електричним струмом.

Прилад (рисунок 3.7) містить первинний 1 і передавальний 2 вимірювальні перетворювачі, немагнітну трубу 3, електроди 4, постійний магніт 5, блок порівняння 6, блок формування імпульсів «Запис» 7, реверсивний лічильник 8, блок формування імпульсів «Скидання» 9, цифроаналоговий перетворювач 10, генератор імпульсів 11, блок пам'яті 12, блок індикації 13, блок формування уніфікованого аналогового сигналу.

Вирішення цих проблем може бути досягнуто тим, що в електромагнітному витратомірі, що складається з первинного вимірювального перетворювача, що включає немагнітну трубу з встановленими в ній діаметрально протилежно двома електродами і формувач магнітного поля, а також передавального вимірювального перетворювача, формувач магнітного поля виконаний у вигляді постійного магніту, а передавальний вимірювальний перетворювач містить блок порівняння, вхід якого з'єднаний з одним з електродів, первинного вимірювального перетворювача, блок формування імпульсу «Запис», вхід якого з'єднаний з виходом блоку порівняння, реверсивний лічильник, вхід якого з'єднаний з виходом блоку



порівняння, блок формування імпульсу «Скидання», вхід якого з'єднаний з виходом реверсивного лічильника, цифро-аналоговий перетворювач, вхід якого з'єднаний з виходом блоку формування імпульсу «Скидання», а вихід через потенціометр з'єднаний з іншим електродом первинного перетворювача, генератор імпульсів, вихід якого з'єднаний з входами цифроаналогового перетворювача і реверсивного лічильника, блок пам'яті, входи якого з'єднані з виходами блоку формування імпульсу «Запис» і реверсивного лічильника, блок індикації, вхід якого з'єднаний з виходом блоку пам'яті, блок формування уніфікованого сигналу, вхід якого з'єднаний з виходом блоку пам'яті.

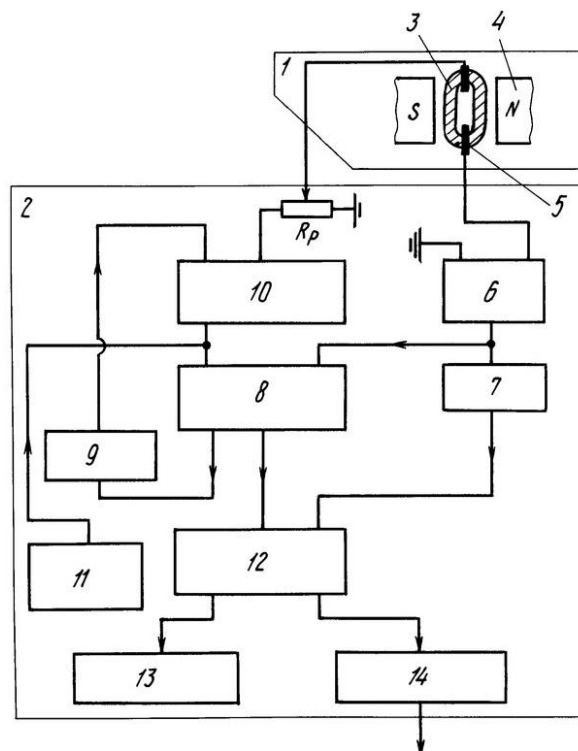


Рисунок 3.7 – Структурна схема електромагнітного витратоміра, виключає ураження електричним струмом

Прилад працює так. Імпульси з генератора 11 надходять на цифро-аналоговий перетворювач 10 і реверсивний лічильник 8. На виході цифро-аналогового перетворювача формується ЕРС ( $E_K$ ) постійного струму, пропорційна числу імпульсів, що надходять на цифро-аналоговий перетворювач, і через потенціометр  $R_P$  надходить на електрод первинного вимірювального

перетворювача. З іншого електрода первинного вимірювального перетворювача ЕРС ( $E_{\text{вим}}$ ) через блок порівняння 6 надходить на реверсивний лічильник 8 і блок формування імпульсів «Запис» 7. При  $E_{\text{вим}} > E_{\text{к}}$  імпульси, що надходять з генератора 11 на реверсивний лічильник 8, підсумовуються, а при  $E_{\text{вим}} < E_{\text{к}}$  віднімаються. При  $E_{\text{вим}} = E_{\text{к}}$  схема порівняння видає сигнал управління на реверсивний лічильник 8 і сигнал «Запис» на схему «Пам'ять» 12. Таким чином,  $E_{\text{вим}}$  пропорційна числу імпульсів, що надходять на реверсивний лічильник 8. Сигнал управління «Скидання» буде сформований блоком 9 при обнуленні реверсивний лічильник 8 останнім імпульсом віднімання. Після сигналу «Скидання» цикл повторюється.

Така схема сприяє спрощенню конструкції, зниженню матеріаломісткості, виключенню небезпеки ураження електричним струмом.

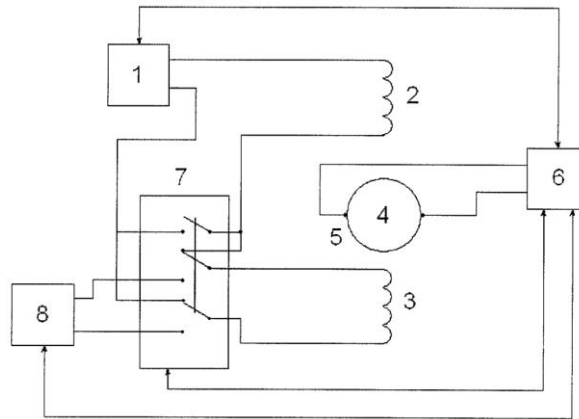
### 3.5 Комутаційний пристрій

Комутаційний пристрій в електромагнітному витратомірі дозволяє вимірювати витрату в трубопроводах електропровідних рідин зі складною кінематичною структурою потоку.

Такий витратомір дозволяє використовувати первинний перетворювач витрати від витратоміра загальнопромислового застосування без зміни його конструкції. Змінам підлягають тільки схема вимірювання приладу і програмне забезпечення. Електромагнітний витратомір, який має дві індукційні котушки, джерело живлення, вимірювально-обчислювальний пристрій, вхід якого приєднаний до електродів, і інтегруючий пристрій, причому керуючі ланцюги вимірювально-обчислювального пристрою з'єднані з джерелом живлення і інтегруючим пристроєм, що відрізняється тим, що є комутаційний пристрій, керуючий ланцюг якого з'єднано з вимірювально-обчислювальним пристроєм (рисунок 3.8).

Робота витратоміра полягає в наступному. Регулятор потоку працює в двох режимах, що періодично перемикаються за допомогою комутаційного пристрою: в режимі вимірювання різниці потенціалів між електродами і в режимі вимірювання

магнітної проникності вимірюваного середовища. Перший режим вимірювання відповідає вихідному положенню комутаційного пристрою, зображеному на кресленні. Другий режим відповідає положенню комутаційного пристрою, перемикаючого щодо вихідного.



1 – джерело живлення, 2 – індукційні котушки, 3 – індукційні котушки, 4 – труба з електродами, 5 – електрод, 6 – вимірювально-обчислювальний пристрій, 7 – комутаційний пристрій, 8 – пристрій, що інтегрує

Рисунок 3.8 – Структурна схема електромагнітного витратоміра з комутаційним пристроєм

У першому режимі схема з'єднань індукційних котушок відповідає їх послідовному включенню до джерела струму живлення. Внаслідок протікання змінного струму по витках обох індукційних котушок в робочому обсязі каналу збуджується змінне магнітне поле, спрямоване перпендикулярно площині, що проходить через вісь електродів і вісь каналу. При русі електропровідної рідини по каналу труби в його робочому обсязі, відповідно до закону Фарадея індукується електричне поле, напруженість якого пропорційна швидкості потоку рідини. Різниця потенціалів між електродами  $U$  визначається виразом:

$$U = \mu \cdot H \cdot V \cdot D, \quad (3.2)$$

де  $\mu$  – магнітна проникність вимірюваного середовища;

$H$  – напруженість магнітного поля в каналі труби;

$V$  – швидкість потоку вимірюваного середовища;

$D$  – діаметр каналу.

У режимі вимірювання магнітної проникності вимірюваного середовища до джерела струму живлення підключена тільки одна індукційна котушка. При цьому друга індукційна котушка підключена до пристрою, що інтегрує. В цьому режимі вимірювання друга індукційна котушка виконує функції індукційної котушки опорного сигналу. При цьому виконується вимір відповідно до виразу:

$$U_{\mu} = k_0 \cdot \mu \cdot H, \quad (3.3)$$

Витрата вимірюваного середовища обчислюється в результаті обробки вимірювань обох режимів за допомогою вимірювально-обчислювального пристрою за формулою:

$$Q = \alpha_0 \cdot \frac{U}{U_{\mu}}, \quad (3.4)$$

де  $\alpha_0$  – градуйований коефіцієнт.

Перевагою цього витратоміру є можливість використання первинного перетворювача витрати від витратоміра загальнопромислового застосування без зміни його конструкції. Змінам підлягають тільки схема вимірювання приладу і програмне забезпечення.

### 3.6 Виключення адитивної похибки

Спеціальна конструкція витратоміру дозволяє виключити адитивну похибку вимірювання, викликану амплітудою і фазовою похибкою складових магнітного поля, обумовлену втратами в ланцюзі збудження перетворювача витрати. Крім

того, точність вимірювання витрати збільшується також через виключення впливу фазових похибок і перешкод в ланцюзі формування знакового сигналу (рисунок 3.9).

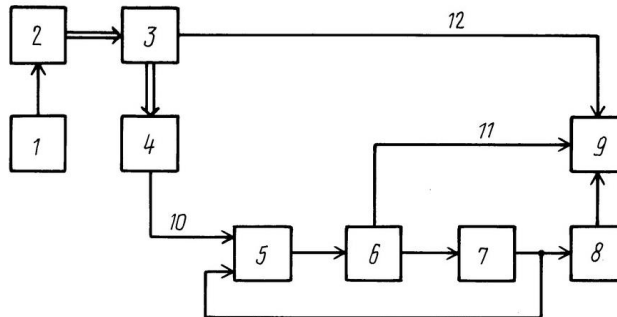


Рисунок 3.9 – Структурна схема електромагнітного витратоміра, що виключає адитивну похибку

Витратомір містить послідовно з'єднані генератор 1 імпульсів, лічильник 2, постійний запам'ятовуючий пристрій 3, цифроаналоговий перетворювач 4, диференційний підсилювач 5, перетворювач 6 витрати, повторювач 7 напруги, вихід якого з'єднаний з другим входом диференціального підсилювача 5. Крім того, витратомір містить інтегратор 8, вхід якого з'єднаний з виходом повторювача 7, і чутливий до фази вимірювач 9 відношення, перший вхід якого з'єднаний з другим виходом перетворювача 6 витрати, другий вхід – з виходом інтегратора 8, а третій вхід – з другим виходом постійного запам'ятовуючого пристрою 3.

Регулятор потоку працює наступним чином. Під дією цифрового сигналу, що надходить з генератора 1, лічильник 2 виробляє код, значення якого лінійно змінюється в часі. Цей код, вступаючи на адресний вхід постійного запам'ятовуючого пристрою 3, відтворює за допомогою цифроаналогового перетворювача 4, вхід якого з'єднаний з виходом даних постійного запам'ятовуючого пристрою 3, записану в постійний запам'ятовуючий пристрій 3 функцію відповідно до виразу:

$$U_{10}(t) = U_m \cdot [\cos(\omega t) - 6 \cdot \cos(3\omega t) + 5 \cdot \cos(5\omega t)], \quad (3.5)$$

Цей сигнал через підсилювач 5 надходить на обмотку збудження перетворювача 6 витрати, за допомогою якої в активній зоні цього перетворювача створюється магнітне поле.

В активну зону перетворювача 6 витрати вбудований перетворювач індукції магнітного поля, вихідний сигнал якого через повторювач 7 надходить на інвертований вхід диференціального підсилювача 5, утворюючи ланцюг зворотного зв'язку.

Передача ланцюга зворотного зв'язку визначається перетворювачем індукції, напруга на виході якого, дорівнює напрузі зворотного зв'язку, визначається виразом:

$$E_2(t) = j\omega W_2 S_2 B(t), \quad (3.6)$$

де  $W_2$ ,  $S_2$  – кількість і площа витків перетворювача індукції; відповідно;

$B$  – індукція магнітного поля перетворювача витрати.

Цей вислів справедливий для роботи перетворювача індукції на досить високоомних навантаження. Для виконання цієї умови в схемі передбачений повторювач 7, що має високий вхідний опір, а котушка індуктивності перетворювача індукції виконана з малою власною ємністю.

Коефіцієнт передачі підсилювача, охопленого негативним зворотним зв'язком, визначається виразом:

$$K(j\omega) = \frac{B(t)}{U_{10}(t)} = \frac{1}{j\omega W_2 S_2}, \quad (3.7)$$

Магнітне поле, створюване при цьому в активній зоні перетворювача витрати, має наступну структуру:

$$B(t) = \frac{U_m}{\omega \cdot W_2 \cdot S_2} [\sin(\omega t) - 2 \cdot \sin(3\omega t) + \sin(5\omega t)], \quad (3.8)$$

Під дією цього поля на електродах перетворювача 6 витрати виробляється сигнал, пропорційний швидкості руху рідини, що надходить на вхід основного сигналу чутливого до фази вимірювача 9 відношення. Структура сигналу визначається виразом (3.8). Сигнал перетворювача індукції перетворювача 6 витрати через повторювач 7 і інтегратор 8 надходить на вхід опорного сигналу чутливого до фази вимірювача 9 відношення. Очевидно, структура цього сигналу також визначається виразом (3.8). На вхід управління чутливого до фази детектором чутливого до фази вимірювача 9 відношення надходить цифровий знаковий сигнал з додаткового виходу постійного запам'ятовуючого пристрою 3, який визначається виразом:

$$S(t) = S_g(\sin(\omega t)), \quad (3.9)$$

Значення знакового сигналу записані в постійний запам'ятовуючий пристрій 3 синфазні з функцією відповідно до виразу (3.5), тобто це означає, що кожному значенню часу виразу (3.5) і рівного йому значенням у виразу (3.9) відповідає адреса постійного запам'ятовуючого пристрою, по якому записуються значення функції відповідно до виразів (3.5) і (3.9). Чутливий до фази вимірювач 9 відношення здійснює комутацію знаків основного і опорного сигналів по закону, який визначається знаковим сигналом, і вимірює ставлення середньовипрямлених значень, отриманих після комутації сигналів. При цьому пригнічується синфазна складова залишкового сигналу, яка не залежить від частоти живлення, найбільш характерна для трансформаторної перешкоди перетворювача витрати, структура якої визначається виразом:

$$U_{11c\phi}(t) = U_m [\sin(\omega t)(-6 \sin(3\omega t) + 5 \sin(5\omega t))], \quad (3.10)$$

Складова залишкового сигналу, пропорційна частоті живлення, найбільш характерна для ємнісної перешкоди, також пригнічується. Структура цієї складової визначається виразом:

$$U_{11w}(t) = Um[\sin(\omega t) - 18\sin(3\omega t) + 25\sin(\omega t)], \quad (3.11)$$

Як впливає з виразів (3.10) і (3.11), середньовипрямлене значення названих складових визначаються виразами:

$$\begin{aligned} U_{11cf} &= U_m \cdot \frac{2}{\pi} \cdot (1 - 2 + 1) = 0. \\ U_{11w} &= U_m \cdot \frac{2}{\pi} \cdot (1 - 6 + 5) = 0. \end{aligned} \quad (3.12)$$

З цих виразів видно, що вимір середньовипрямленого значення за наведеним алгоритмом дозволяє виключити складові залишкового сигналу нульовий і першого ступеня частоти живлення перетворювачі витрати.



## ВИСНОВКИ

У дипломній роботі досліджено напрямки підвищення метрологічних характеристик електромагнітних витратомірів. Встановлено нормативно-правові основи їх виробництва та експлуатації, а також визначено обов'язкові вимоги до цих витратомірів. Розглянуто конструктивні особливості електромагнітних витратомірів з електромагнітними перетворювачами витрати та швидкості потоку. Встановлено метрологічні характеристики, які можуть бути удосконалені.

Визначено такі напрямки поліпшення метрологічних характеристик електромагнітних витратомірів: зменшення розсіювання магнітної енергії, збільшення екранування від зовнішніх магнітних полів без значного підвищення вартості приладу; точне вимірювання витрати рідин зі складною кінематичною структурою потоку; вимірювання витрати при змінному рівні заповнення каналу трубопроводу з високою чутливістю як до швидкості потоку, так і до зміни площі «живого» перетину потоку; спрощення конструкції, зниження матеріаломісткості, виключення небезпеки враження електричним струмом; а також можливість використання первинного перетворювача витрати від витратоміра загальнопромислового застосування без зміни його конструкції, змінам підлягають тільки схема вимірювання приладу і програмне забезпечення; виключення адитивної похибки вимірювання, викликані амплітудою і фазовою похибкою складових магнітного поля, обумовлену втратами в ланцюзі збудження перетворювача витрати. Крім того, точність вимірювання витрати збільшується також через виключення впливу фазових похибок і перешкод в ланцюзі формування знакового сигналу.

Встановлені напрямки та запропоновані схеми можуть бути корисними для розробників та виробників електромагнітних витратомірів.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Про метрологію та метрологічну діяльність : Закон України від 05.06.2014 р. № 1314-VII. *Офіційний вісник України*. 2014 р. № 54. С. 11. Ст. 1439.
2. Про затвердження Технічного регламенту засобів вимірювальної техніки : Постанова Кабінету Міністрів України від 24.02.2016 р. № 163. *Офіційний вісник України*. 2016 р. № 21. С. 89.
3. Про затвердження Технічного регламенту законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки : Постанова Кабінету Міністрів України від 13.01.2016 р. № 94. *Офіційний вісник України*. 2016 р. № 16. С. 69.
4. ДСТУ ISO 4006:2009. Вимірювання витрати та кількості плинного середовища в закритих трубопроводах. Словник термінів і познач (ISO 4006:1991, IDT). [Чинний від 2012-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 76 с.
5. ДСТУ 7266:2012. Метрологія. Витратоміри швидкісні, вихрові та електромагнітні. Загальні технічні умови. [Чинний від 2013-03-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2012. 13 с.
6. ДСТУ ISO 9104:2006. Вимірювання витрати рідини в закритих трубопроводах. Метод оцінювання характеристик електромагнітних витратомірів рідини (ISO 9104:1991, IDT). [Чинний від 2007-10-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 23 с.
7. ДСТУ ISO 6817:2006 Витрати електропровідної рідини в закритих трубопроводах. Метод вимірювання із застосуванням електромагнітних витратомірів (ISO 6817:1992, IDT). [Чинний від 2007-10-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 24 с.
8. ДСТУ ISO 13359:2013 Вимірювання витрати електропровідної рідини в закритих трубопроводах. Витратоміри електромагнітні фланцеві. Габаритна довжина (ISO 13359:1998, IDT). [Чинний від 2014-07-01]. Вид. офіц. Київ : Мінекономрозвитку України, 2013. 8 с.

9. Безвесільна О. М. Витратометрія та витратоміри : монографія. Житомир : ЖДТУ, 2011. 219 с

10. Чистофорова Н. В., Колмогоров А. Г. Технические измерения и приборы. Часть 1. Измерение теплоэнергетических параметров: Учебное пособие для студентов дневной и заочной формы обучения специальности 220301 «Автоматизация технологических процессов и производств». Ангарск : АГТА, 2008. 200 с.

11. Друзьякин, И. Г., Лыков А. Н. Технические измерения и приборы: учеб. пособие. Пермь : Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. 412 с.

12. Flow measuring apparatus : Patent USA. № US5301556A, 1994. Pp. 7.

ДОДАТОК А  
ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет  
(ХНАДУ)

Механічний фікультет  
Кафедра метрології та безпеки життєдіяльності

## **ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ**

**до дипломної роботи бакалавра**

**АНАЛІЗ НАПРЯМКІВ ПОЛІПШЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИТРАТОМІРІВ**

---

Завідувач кафедри, д-р техн. наук, проф.

О. В. Полярус

Нормоконтролер, канд. техн. наук, доцент

І. В. Грайворонська

Керівник, канд. техн. наук, доцент

О. С. Букрєєва

Студент гр. ММ-41

О. І. Плетньов

Харків – 2020

# Мета, об'єкт, задачі дослідження

- **Об'єкт** – метрологічні характеристики електромагнітних витратомірів
- **Мета** – розробка напрямків їх поліпшення для підвищення точності та єдності вимірювань
- **Задачі**
  - огляд електромагнітних витратомірів, їх класифікації та експлуатаційних особливостей;
  - огляд нормативно-правових основ регулювання виробництва й експлуатації електромагнітних витратомірів та чинних нормативних документів;
  - визначення напрямків поліпшення метрологічних характеристик електромагнітних витратомірів.

# Класифікація витратомірів

витратоміри, що використовують гідродинамічні методи

- парціальні
- змінного тиску
- змінного рівня
- обтікання
- вихрові

витратоміри з безперервно рухомим тілом

- камерні лічильники і витратоміри
- силові
- тахометричні

витратоміри, що засновані на різних фізичних явищах

- акустичні
- іонізаційні
- електромагнітні
- теплові
- оптичні
- ядерно-магнітні

витратоміри, що засновані на особливих методах

- концентраційні
- кореляційні
- з автоколивним тілом
- з рухомою ділянкою трубопроводу
- позначкові
- струменеві

# Нормативно-правові основи виробництва та експлуатації електромагнітних витратомірів

## Правові акти

Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність»

## Технічні регламенти

«Засобів вимірювальної техніки»

«Законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки»

## Нормативні документи

ДСТУ ISO 4006:2009

ДСТУ ISO 6817:2006

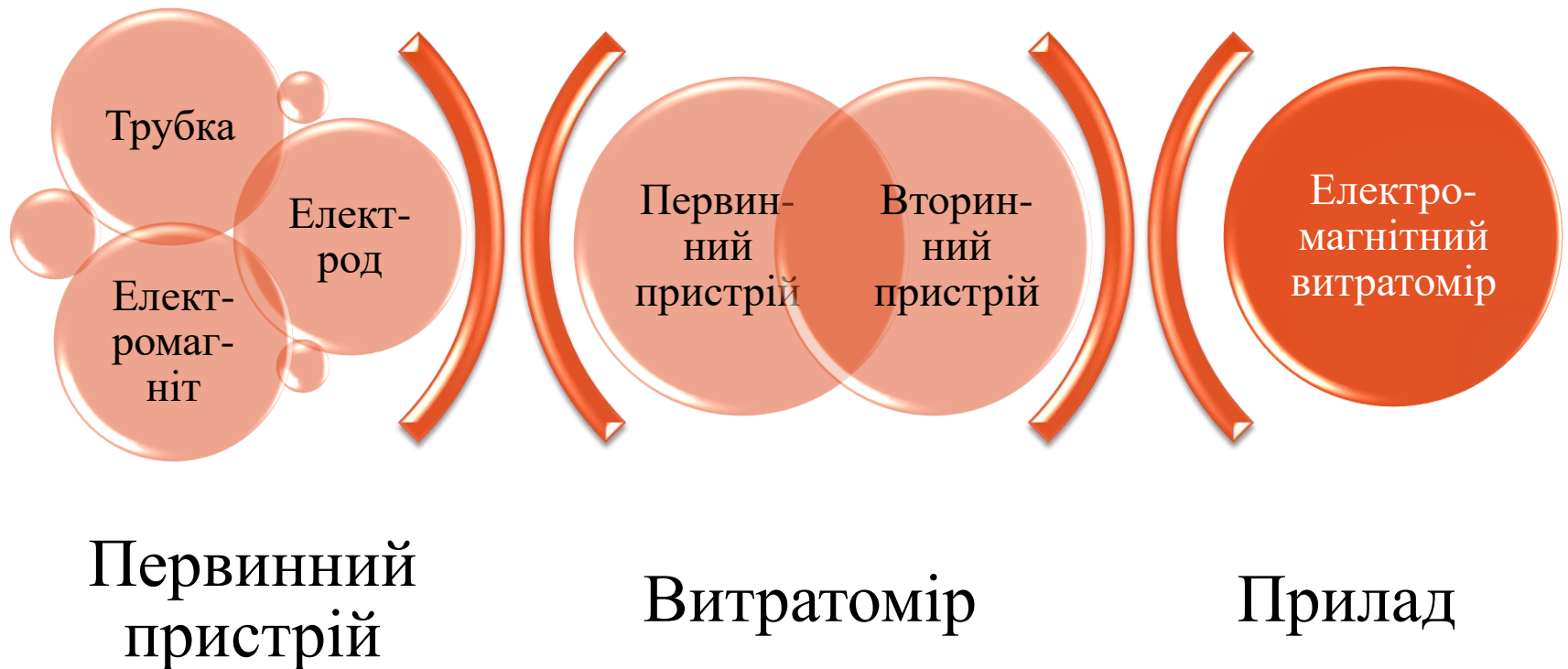
ДСТУ 7266:2012

ДСТУ ISO 13359:2013

ДСТУ ISO 9104:2006



# Загальна конструкція електромагнітних витратомірів



# Витратоміри з електромагнітним перетворювачем витрати

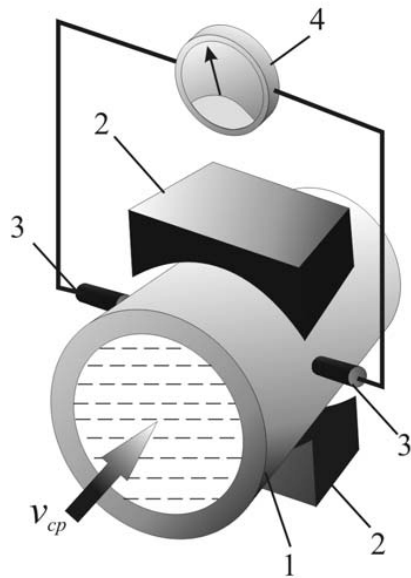


Рисунок 1

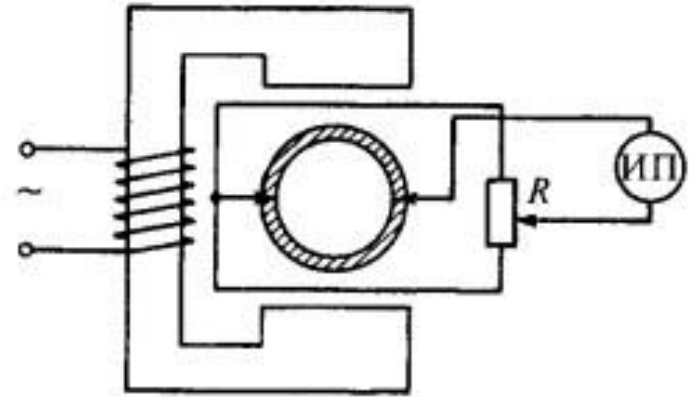


Рисунок 3

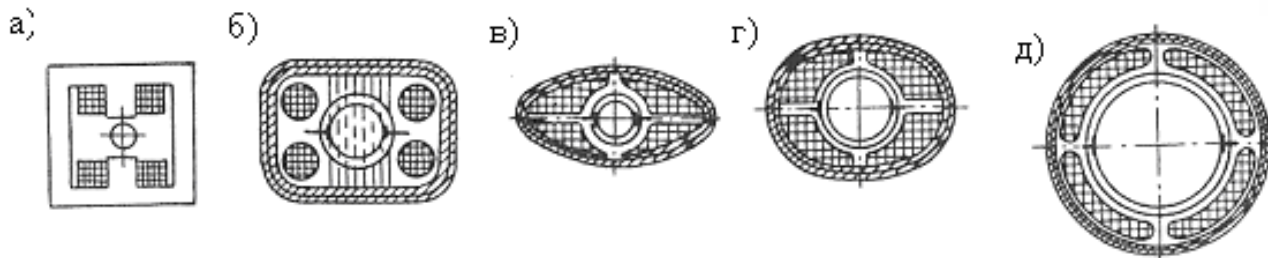


Рисунок 2

# Витратомір з електромагнітними перетворювачами швидкості потоку

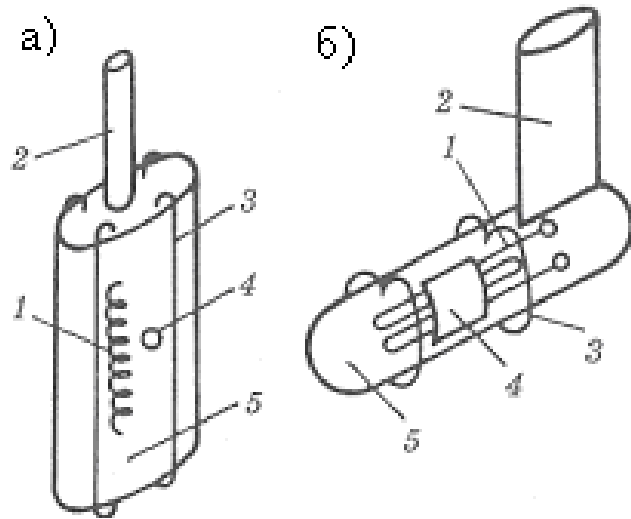


Рисунок 4

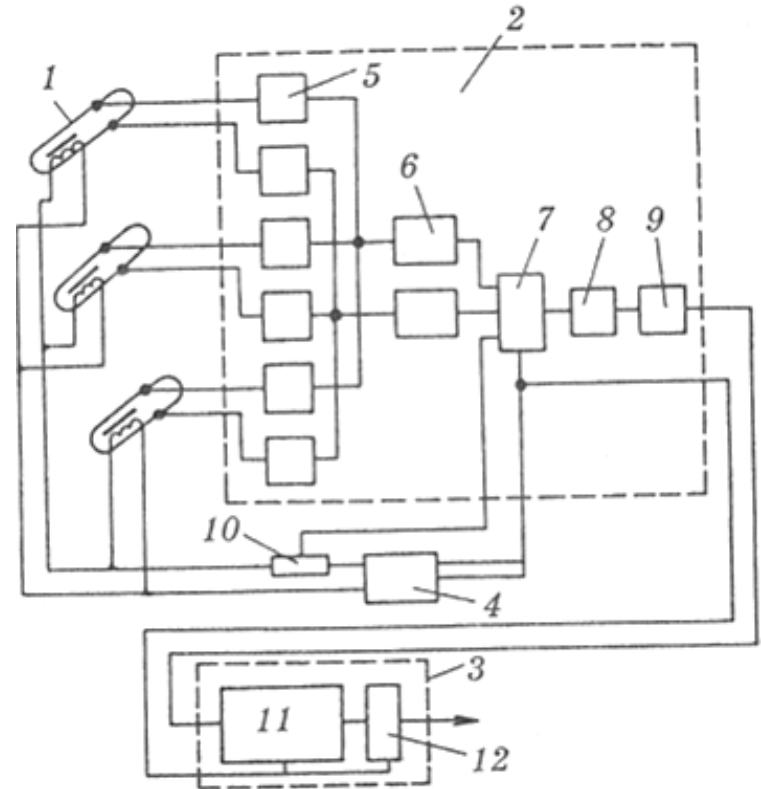


Рисунок 5

# Основні метрологічні характеристики електромагнітних витратомірів



**Клас точності від 1 до 2,5**

**дуже малі ( $3 \times 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$ ) або великі витрати рідин ( $3 \text{ м}^3/\text{с}$ )**

**похибка вимірювання від 0,25 % до 1% при швидкості потоку від 0,3 м/с до max**

**похибка повторюваності 0,1 % - 0,25 %.**

# Переваги та недоліки електромагнітних витратомірів

## Переваги

- незалежність показань від в'язкості і щільності вимірюваної речовини;
- можливість реалізації методу для дуже великих діаметрів трубопроводів і відсутність при цьому додаткового динамічного опору;
- лінійність шкали;
- потрібність в менших довжинах прямих ділянок труб, ніж у інших витратомірів;
- висока швидкодія;
- можливість вимірювання агресивних, абразивних і в'язких рідин;
- працездатність при високому тиску середовища – до 100 МПа.

## Недоліки

- неможливість використання витратомірів для непровідних рідин (вуглеводні, аміак, кислоти та ін.);
- наявність додаткової похибки від величини електропровідності рідини;
- можливість відкладення магнетиту на стінках вимірювального трубопроводу витратоміра і значне збільшення похибки при наявності оксидів заліза у воді;
- необхідність розрізання трубопроводу, приварювання фланців і установки вимірювального трубопроводу, що часто неможливо.

# Зменшення розсіювання магнітної енергії

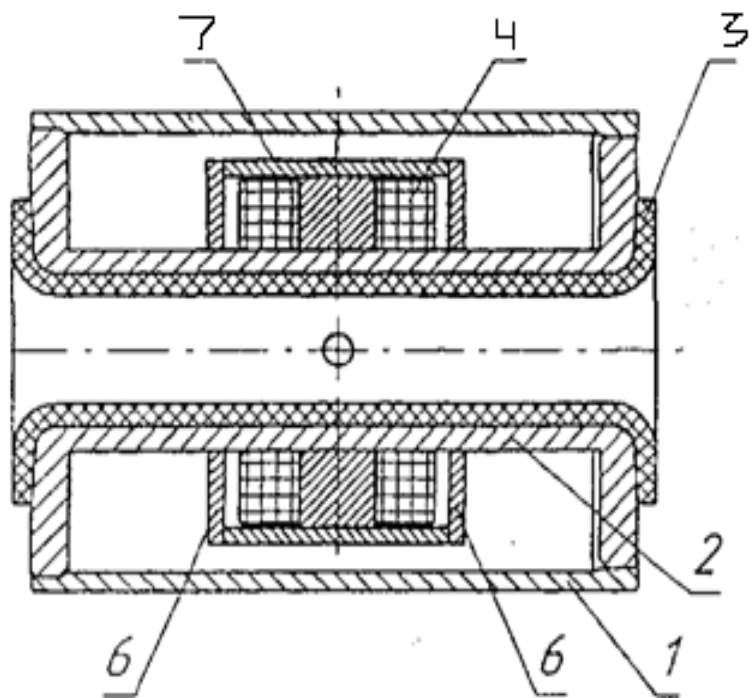


Рисунок 6

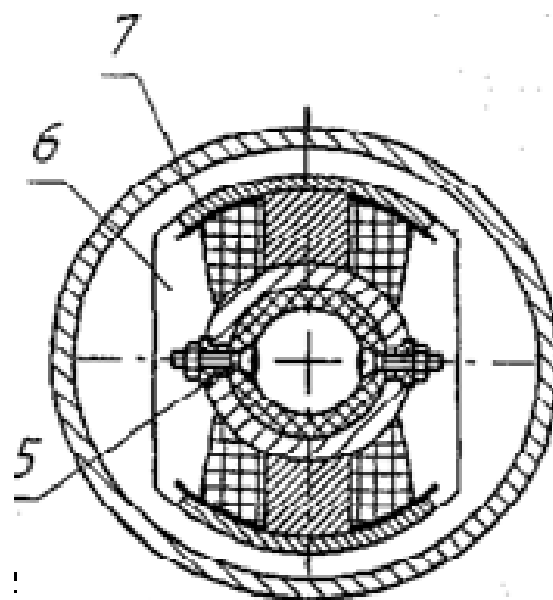


Рисунок 7

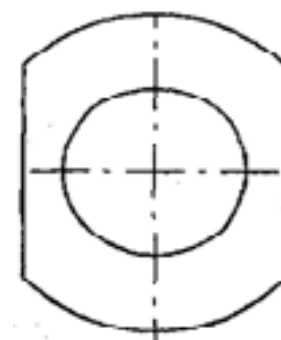


Рисунок 8

# Витрата рідин зі складною кінематичною структурою потоку

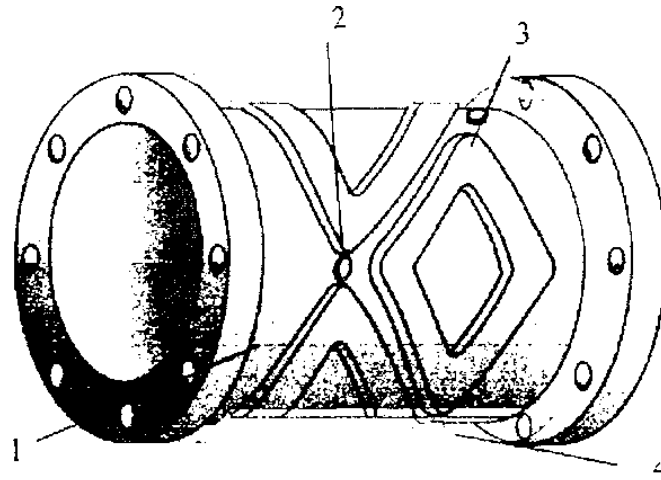


Рисунок 9

$$Q = a \cdot \left( \frac{U_{11}}{I_{11}} + \frac{U_{21}}{I_{21}} \right) \cdot \left[ 1 + b \cdot \left( \frac{U_{12}}{I_{12}} + \frac{U_{22}}{I_{22}} \right) + c \cdot \left( \frac{U_{12}}{I_{12}} + \frac{U_{22}}{I_{22}} \right) + \dots \right], \quad (1)$$

# Комутаційний пристрій

$$U = \mu \cdot H \cdot V \cdot D, \quad (2)$$

$$U_{\mu} = k_0 \cdot \mu \cdot H, \quad (3)$$

$$Q = \alpha_0 \cdot \frac{U}{U_{\mu}}, \quad (4)$$

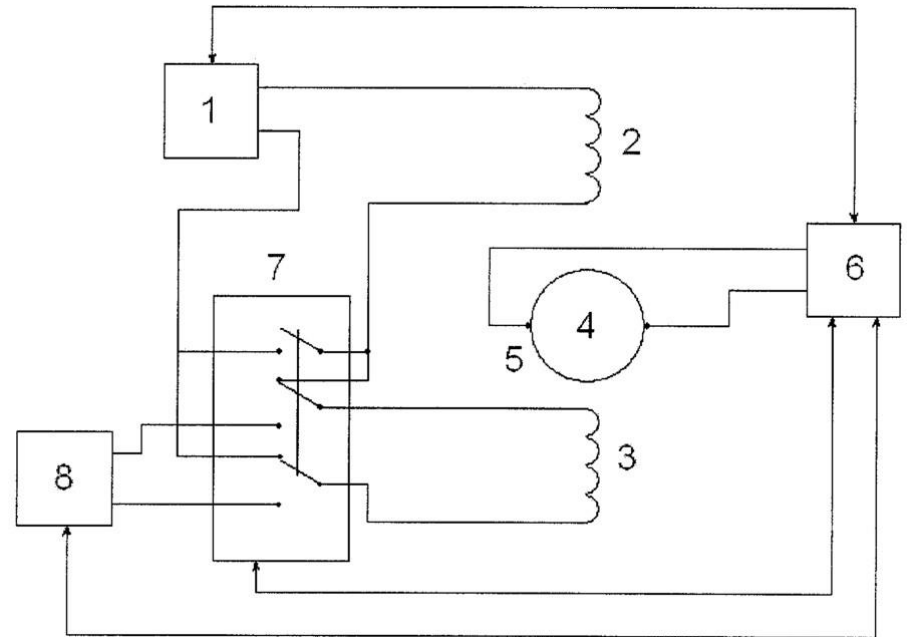


Рисунок 10



# Вимірювання витрати при змінному рівні заповнення каналу трубопроводу

Рисунок 11

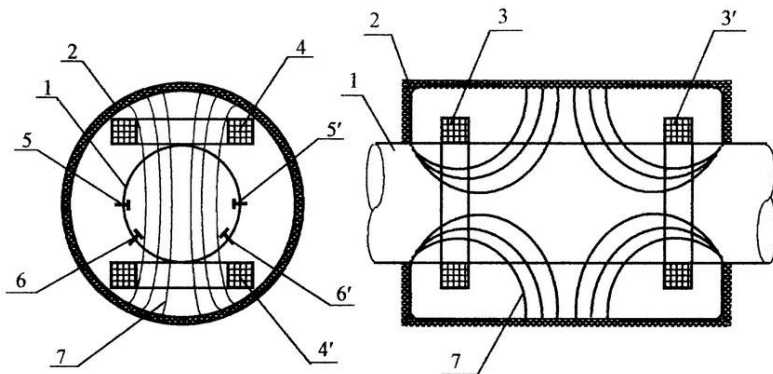
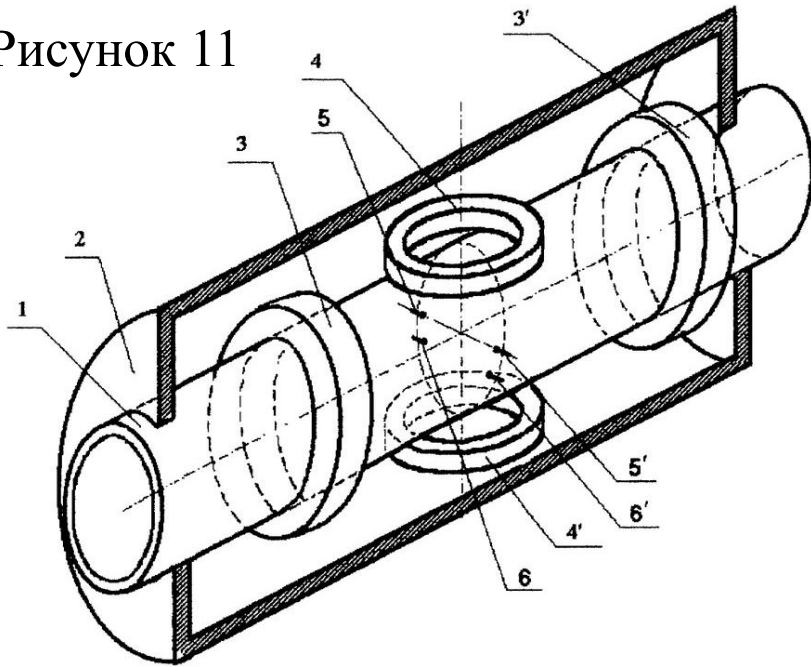


Рисунок 12

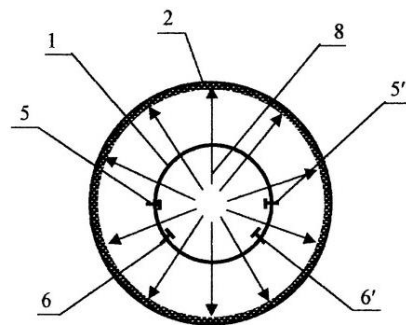
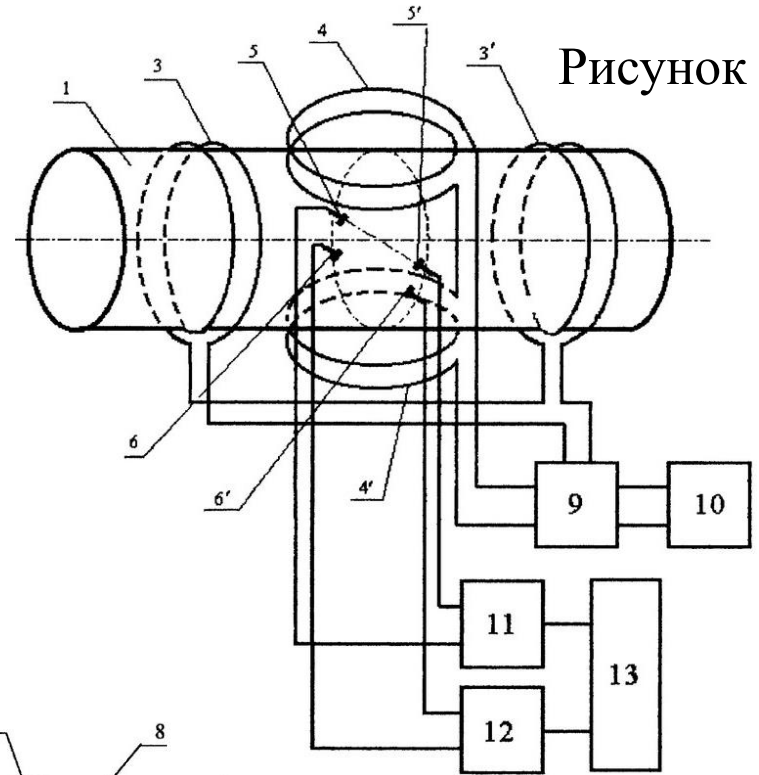
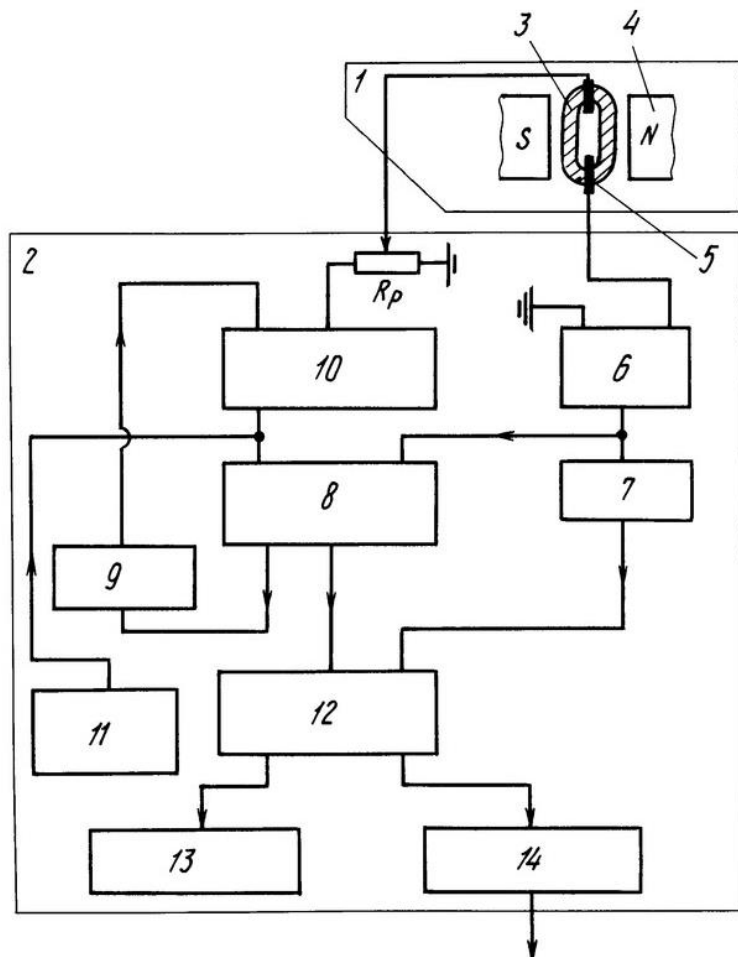


Рисунок 13

# Зниження матеріаломісткості, виключення ураження електричним струмом

Рисунок 14



# Виключення адитивної похибки

$$U_{10}(t) = U_m \cdot [\cos(\omega t) - 6 \cdot \cos(3\omega t) + 5 \cdot \cos(5\omega t)], \quad (5)$$

$$E_2(t) = j\omega W_2 S_2 B(t), \quad (6)$$

$$K(j\omega) = \frac{B(t)}{U_{10}(t)} = \frac{1}{j\omega W_2 S_2}, \quad (7)$$

$$B(t) = \frac{U_m}{\omega \cdot W_2 \cdot S_2} [\sin(\omega t) - 2 \cdot \sin(3\omega t) + \sin(5\omega t)], \quad (8)$$

$$S(t) = S_g(\sin(\omega t)), \quad (9)$$

$$U_{11c\phi}(t) = U_m [\sin(\omega t) - 6 \sin(3\omega t) + 5 \sin(5\omega t)], \quad (10)$$

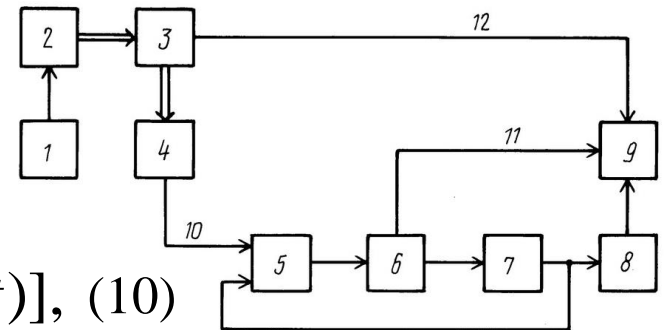
$$U_{11\omega}(t) = U_m [\sin(\omega t) - 18 \sin(3\omega t) + 25 \sin(\omega t)], \quad (11)$$

$$U_{11c\phi} = U_m \cdot \frac{2}{\pi} \cdot (1 - 2 + 1) = 0.$$

(12)

$$U_{11\omega} = U_m \cdot \frac{2}{\pi} \cdot (1 - 6 + 5) = 0.$$

Рисунок 15



# Висновки

- У дипломній роботі досліджено напрямки підвищення метрологічних характеристик електромагнітних витратомірів. Встановлено нормативно-правові основи їх виробництва та експлуатації, а також визначено обов'язкові вимоги до цих витратомірів. Розглянуто конструктивні особливості електромагнітних витратомірів з електромагнітними перетворювачами витрати та швидкості потоку. Встановлено метрологічні характеристики, які можуть бути удосконалені.
- Визначено такі напрямки поліпшення метрологічних характеристик електромагнітних витратомірів: зменшення розсіювання магнітної енергії, збільшення екранування від зовнішніх магнітних полів без значного підвищення вартості приладу; точне вимірювання витрати рідин зі складною кінематичною структурою потоку; вимірювання витрати при змінному рівні заповнення каналу трубопроводу з високою чутливістю як до швидкості потоку, так і до зміни площі «живого» перетину потоку; спрощення конструкції, зниження матеріаломісткості, виключення небезпеки враження електричним струмом; а також можливість використання первинного перетворювача витрати від витратоміра загальнопромислового застосування без зміни його конструкції, змінам підлягають тільки схема вимірювання приладу і програмне забезпечення; виключення адитивної похибки вимірювання, викликаной амплітудою і фазової похибкою складових магнітного поля, обумовлену втратами в ланцюзі збудження перетворювача витрати. Крім того, точність вимірювання витрати збільшується також через виключення впливу фазових похибок і перешкод в ланцюзі формування знакового сигналу.
- Встановленні напрямки та запропоновані схеми можуть бути корисними для розробників та виробників електромагнітних витратомірів.