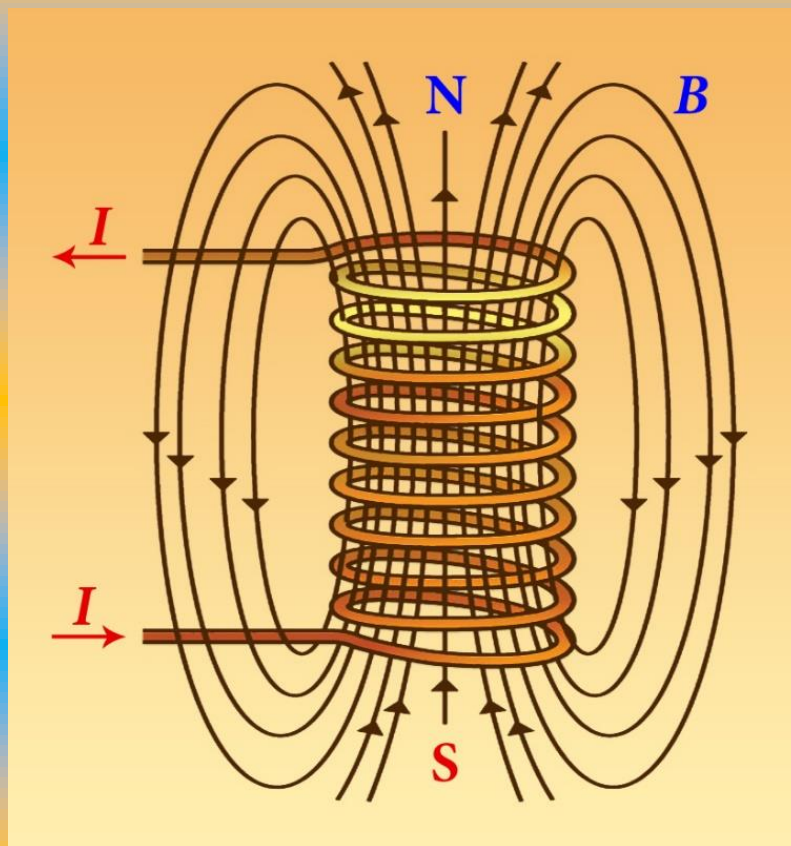


М. Ф. Терещенко, Г. С. Тимчик,  
В. Ю. Рудик, Т.О. Рудик

# Високоточні джерела змінних магнітних полів



Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**М. Ф. Терещенко, Г. С. Тимчик,  
В. Ю. Рудик, Т.О. Рудик**

# **Високоточні джерела змінних магнітних полів**

*Монографія*

*Рекомендовано Вченою радою  
КПІ ім. Ігоря Сікорського*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

2020

УДК 621.318.38:615.84  
В53

*Рекомендовано Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 5 від 30.06.2020 р.)*

**Рецензенти:**

*А. Г. Мисюра*, д-р біол. наук,  
Інститут прикладних проблем фізики та біофізики НАН України.  
*Ю. Ф. Тесик*, д-р техн. наук, провідний наук. співроб.  
Інститут електродинаміки НАН України

**Високоточні джерела змінних магнітних полів** : монографія / М. Ф. Терещенко, Г. С. Тимчик, В. Ю. Рудик, Т.О. Рудик - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 156 с., іл.

**ISBN 978-966-990-006-7**

Розглянуто теоретичні засади та дослідження принципів побудови високоточних джерел змінного магнітного поля. Наведено результати досліджень принципів побудови високоточних джерел змінного магнітного поля, апаратів та систем, які генерують магнітне поле, методи підвищення ефективності їх роботи, визначення та оцінка параметрів джерел змінного магнітного поля. Розглянуто конструкції індукторів та методики розрахунку їх параметрів.

Особливу увагу приділено структурним особливостям побудови високоточних джерел змінного магнітного поля, апаратів і систем та комплексів, підвищення їх ефективності та точності відтворення параметрів магнітного поля.

Для наукових та інженерно-технічних працівників, спеціалістів медичного приладобудування та фізіотерапії, а також студентів та аспірантів закладів вищої освіти з інженерно-медичного напрямку підготовки.

УДК 621.318.38:615.84

В53

© М. Ф. Терещенко, Г. С. Тимчик,  
В. Ю. Рудик, Т.О. Рудик, 2020

© КПІ ім. Ігоря Сікорського (ПБФ), 2020

**ISBN 978-966-990-006-7**

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	5
ПЕРЕДМОВА .....	7
РОЗДІЛ I. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВІДТВОРЕННЯ ЗМІННИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ .....	10
1.1. Порівняльна оцінка методів формування змінних магнітних полів та їх класифікація .....	11
1.2. Дослідження особливостей методу дискретного відтворення змінного магнітного поля .....	19
1.3. Перспективні напрями дослідження.....	25
РОЗДІЛ II. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ПРЕЦИЗІЙНИХ ДЖЕРЕЛ ЗМІННИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ .....	27
2.1. Порівняльний аналіз принципів побудови джерел змінних магнітних полів.....	27
2.2 Дослідження методів апроксимації форми змінних магнітних полів і їх порівняльна оцінка.....	43
2.3 Шляхи розширення частотного діапазону прецизійних джерел змінних магнітних полів. ....	57
2.4 Задачі автоматизації прецизійних джерел змінних магнітних полів та розробка раціональної структури автоматизованого комплексу відтворення змінних магнітних полів. ....	69
РОЗДІЛ III. АНАЛІЗ ПОХИБОК І ОЦІНКА СТІЙКОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ ВІДТВОРЕННЯ ЗМІННИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ.....	87
3.1. Дослідження інструментальних похибок автоматизованого комплексу й шляхи їх зменшення .....	87
3.2. Оцінка стійкості комплексу АКВЗМП .....	98
РОЗДІЛ IV. МЕТОДИ І ЗРАЗКОВІ ЗАСОБИ ПОВІРКИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ ВІДТВОРЕННЯ ЗМІННИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ .....	112

4.1 Сучасний стан метрологічного забезпечення засобів відтворення змінних магнітних полів різноманітних форм .....	112
4.2 Розробка та дослідження способу метрологічної атестації АКВЗМП .....	120
4.3. Результати експериментальних досліджень АКВЗМП і методика його метрологічної атестації.....	128
ПІСЛЯМОВА .....	151
ЛІТЕРАТУРА .....	154

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АКВЗМП - автоматизований комплекс відтворення змінних магнітних полів

БТ – біологічна тканина

БО – біологічний об'єкт

ВМП - випадкове магнітне поле

ВІМТ - високоінтенсивне імпульсне магнітне поле

ГіМП - гідромагнітотерапія

ГМПЗ - геомагнітне поле Землі

ДОН – джерело опорної напруги

ЕМП – електромагнітотерапія

ЗЗ - зворотній зв'язок

ЗКМІ - зразкова котушка магнітної індукції

ЗМП - змінне магнітне поле

ЗМПІ - зразкова міра магнітної індукції

ЗНЧМ - змінна низькочастотна (резонансна) магнітотерапія

ЗМТ - загальна магнітотерапія

ЗСМП - змінні синусоїдальні магнітні поля

ІМП - імпульсне магнітне поле

ІМФТА - імпульсна магнітотерапевтична апаратура

ІТ - індуктотермія

КВО - конвертор від'ємного опору

КГ – котушка Гельмгольца

КД - корегувальні двополюсники

КК - котушка компенсації

КМІ - котушка магнітної індукції

МВПЗП - магнітовимірювальні прилади змінних полів

МЛУТ - магнітолазеро ультразвукова терапія

МП - магнітне поле  
МТАЛД - магнітотерапевтична апаратура локальної дії  
МТЗД - магнітотерапія загальної дії  
МТАРД - магнітотерапевтична апаратура розподіленої дії  
МТА - магнітотерапевтична апаратура  
НІМП - низькоінтенсивна імпульсна терапія  
НЗЗ – негативний зворотний зв'язок  
ОМП - магнітне поле, що обертається  
П - підсилювач  
ПБК - плоска безкаркасна котушка  
ПДЗМП - прецизійні джерела змінних магнітних полів  
ПКЛ- полекорегуючий ланцюг  
ПКМ - полекорегуючий метод  
ПМП - постійне магнітне поле  
ПБ - підсилювальний блок  
ПСПС - прецизійний стабілізатор періодичного сигналу  
ПУМП - пульсуюче магнітне поле  
ПФС - полеформуєча система  
СнМП - синусоїдальне магнітне поле  
СКМ - система комплексної магнітної терапії  
СКЛ - струмокорегуючі ланцюги  
СМП - скалярний магнітний потенціал  
ФВЧ – фільтр верхніх частот  
ФГ – функціональний генератор  
ФРБ - фазорегулюючий блок  
ЦАП – цифро – аналоговий перетворювач

## ПЕРЕДМОВА

На сучасному етапі розвитку приладобудування, вимірювальної техніки, електроенергетичного обладнання, оптимізації режимів його роботи та експлуатації, необхідні поглиблені знання про змінювані (змінні) магнітні поля (ЗМП), які виникають в процесі функціонування цього обладнання та являються його невід'ємною характеристикою.

Особливо гостра необхідність назріла в вивченні несинусоїдальних та імпульсних магнітних полів (МП) різноманітних форм. На жаль, в нашій країні, немає високоточної апаратури для реєстрації та вимірювання таких полів, що гальмує дослідження в цій сфері.

В наш час розробка та випуск серійних магнітовимірювальних приладів змінних полів (МВПЗП) несинусоїдальних форм серйозно затримується через відсутність засобів їх перевірки. Найбільш перспективний шлях для побудови таких засобів – створення прецизійних джерел МП, що дозволять відтворювати МП різної форми в широкому діапазоні вимірювання їх параметрів (амплітуда, частота, тривалість та інші).

Похибка вимірювання діючого або середнього значення магнітної індукції існуючих серій МВПЗП синусоїдальної форми знаходиться на рівні 5% і вони не придатні для вимірювання несинусоїдальних ЗМП та, тим більше, оцінки форми кривої МП.

В деяких науково-виробничих колективах розроблені одиничні екземпляри тесламетрів середніх змінних та імпульсних полів [1,2,3]. Але ці пристрої не забезпечують оцінку форми кривої ЗМП, для них відсутнє метрологічне забезпечення та й, як наслідок, вони не задовольняють вимогам Державної системи забезпечення до єдності вимірювань, а також мають низьку точність, малі динамічні й частотні діапазони.

В наш час першочерговим завданням розвитку метрологічного забезпечення вимірювань в електроенергетиці є розробка та виготовлення зразкових мір магнітної індукції для слабких, середніх та сильних імпульсних магнітних полів (ІМП) в тому числі й мір, відтворюючих сильно викривлені форми [4,5]. Створення прецизійних джерел змінних магнітних полів (ПДЗМП) для дослідження електромагнітної сумісності блоків і пристроїв обчислюваної техніки та автоматики, проведення неруйнівного контролю магнітними методами, розробка магнітотерапевтичних апаратів (МТА),



засобів магнітного захисту та магнітно-імпульсної обробки металів, а також метрологічного забезпечення вимірювань ЗМП, - було передбачено завданнями Програми пріоритетних робіт НАН України по науковому приладобудуванню та автоматизації наукових досліджень. Ці роботи виконувалися відповідно до Цільових програм науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт по метрологічному забезпеченню енергетики в Інституті електродинаміки НАН України та організаціях Міненерго.

До того ж джерела ЗМП найшли широке застосування в фізіотерапевтичній практиці, зокрема в магнітотерапії [6-8]. Широке поширення в різних галузях науки і техніки, особливо в біології і медицині, фізиці та техніці отримали магнітні поля та магнітні методи вимірювання. Узагальнені знання, отримані в результаті досліджень МП на стику наук, дозволили створити наукові основи магнітотерапії[9,10].

Для систем та апаратів магнітотерапії важливим фактором є дійсне значення магнітної індукція на індукторах та форма випромінюваного магнітного поля [6,7,11]. Від точності задання значень магнітної індукції та форми поля залежить ефективність та терміни лікування [12,13].

Сучасною тенденцією розвитку магнітотерапії є розробка високоточних джерел МП зі зворотним зв'язком (ЗЗ), що забезпечують точність

відтворення заданої форми, конфігурації МП, надійність, універсальність з необхідним динамічним та частотним діапазонами МП та оптимізацію параметрів впливу МП [14 - 22].

Таким чином на сьогоднішній день розробка ПДЗМП відіграє суттєву роль в розвитку енергетики, автоматизації, медичного приладобудування, фізіотерапевтичної техніки.

В монографії представлені принципи побудови та структурні методи підвищення точності відтворення та підтримки заданих параметрів МП.

Наведені результати досліджень у напрямку автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій медичних систем, а саме – принципи побудови систем відтворення МП, методи підвищення ефективності їх роботи, вимірювання параметрів індукторів МП. Розглянуто конструктивні особливості індукторів.

Монографія розрахована на спеціалістів, метрологів, розробників точних магнітних систем, практикуючих фізіотерапевтів, що активно використовують в своїй лікувальній діяльності магнітотерапевтичні методи

впливу, наукових та інженерно-технічних працівників, спеціалістів медичного приладобудування, а також студентів та аспірантів вищих навчальних закладів з технологічного та інженерно-медичного напрямку підготовки.

## РОЗДІЛ І

### АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВІДТВОРЕННЯ ЗМІННИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ

На сучасному етапі розвитку МТА, оптимізації режимів їх роботи та експлуатації, необхідні поглиблені знання про ЗМП, які виникають в процесі функціонування електроапаратів, в яких протікає електричний струм і які є джерелами МП. Особливо гостра потреба та необхідність є у вивченні несинусоїдальних та імпульсних МП різноманітних форм. Так в Україні не випускається апаратури для точного вимірювання параметрів таких полів. Це не дає можливості розвитку та вирішення даної проблеми.

В наш час розробка та випуск серійних МТА та МВПЗП несинусоїдальних форм серйозно затримується через відсутність засобів їх повірки. Найбільш перспективний шлях для побудови таких засобів – створення прецизійних джерел МП, що дозволяють відтворювати МП різної форми в широкому діапазоні вимірювання їх параметрів (амплітуда, частота, форма імпульсу та інші).

Похибка вимірювання значень магнітної індукції серійними тесла-метрами, що можуть виміряти значення синусоїдальної форми близька до 10 % , що не дає можливості вимірювання параметрів несинусоїдальних ЗМП та оцінювати таку форми МП.

Проведемо теоретичне та експериментальне дослідження перспективних методів та вимірювальних засобів відтворення МП і розробку

на їх основі ПДЗМП різноманітних форм. Для цього вирішимо наступні основні задачі:

- розробка та дослідження метода дискретного відтворення необхідної форми ЗМП при різних методах апроксимації;
- розробка нових принципів побудови ПДЗМП з розширеним динамічним і частотним діапазонами;

- дослідження експоненціально-ступінчастих, кусково-лінійних методів апроксимації необхідних форм ЗМП;
- розробка, дослідження принципів побудови та створення автоматизованого комплексу відтворення змінних магнітних полів (АКВЗМП);
- аналіз та оцінка похибок ПДЗМП;
- розробка нових способів та засобів метрологічної атестації ПДЗМП.

### 1.1. Порівняльна оцінка методів формування змінних магнітних полів та їх класифікація

Методи формування ЗМП можна розділити на п'ять великих груп відповідно до фізичного процесу, який генерує МП: кінематичні, пневмогідродинамічні, кумулятивні, комбіновані, електричні (рис. 1.1).

Принципову основу кінематичних методів формування ЗМП складає принцип взаємної зміни положення магнітної системи відносно досліджуваного об'єкта за рахунок кінетичної або потенціальної енергії, прикладеної до магнітної системи для її переміщення, або переміщення досліджуваного об'єкту [23].



Рис. 1.1. Методи формування змінних магнітних полів

В залежності від шляхів, що викликають зміни параметрів МП, кінематичний метод поділяється на способи, які засновані на взаємному переміщенні магнітної системи та досліджуваного матеріального об'єкта [23]; способи, які засновані на зміні значень параметрів

магнітної системи [24]; способи, які засновані на зміні середовища відтворення поля [25].

Магнітну систему, яка складається з окремих постійних магнітів, що утворюють постійне, рівномірне МП, переміщують з кроком  $\Delta t$  відносно досліджуваного об'єкту. В області досліджуваного матеріального об'єкту отримують різні форми та просторово-часові конфігурації МП в залежності від магнітної індукції  $\Delta B_i$  окремих ділянок, швидкості переміщення  $V_{Ci}$  магнітної системи або самого об'єкту  $V_{Oi}$ , відстані  $l_i$  між ділянками рівномірного поля. На принципі взаємного переміщення базується спосіб створення ЗМП, який реалізується шляхом обертання постійного магніту по спіралеподібній траєкторії [23].

Але такий спосіб не дозволяє формувати ЗМП з високою точністю через складнощі в реалізації спіралевидного закону руху. Він також дуже обмежений в можливості отримання полів різноманітної форми.

Для усунення наведених недоліків використовують інший спосіб формування ЗМП, який базується на переміщенні магнітної системи або досліджуваного об'єкту відносно один одного, таким чином, що магнітну індукцію змінюють дискретно в області досліджуваного об'єкту, за допомогою проходження повз об'єкт ділянок магнітної системи

з необхідним значенням індукції. Крок дискретизації за індукцією  $\Delta B$  визначається як добуток заданої швидкості зміни індукції  $V_{Bi}$  на крок дискретизації за часом  $\Delta t_i$ , тобто

$$\Delta B_i = V_{Bi} \cdot \Delta t_i,$$

а крок дискретизації  $\Delta t_i$  за часом вибирається рівним відношенню довжини ділянки рівномірного поля  $l$  до лінійної швидкості переміщення магнітної системи  $V$ , тобто

$$\Delta t_i = \frac{l}{V}.$$

Цей спосіб дає можливість отримання МП відносно простих просторово-часових конфігурацій, зменшення похибок відтворення МП до 10% та забезпечує регулювання параметрів створюваного поля у вузькому діапазоні.

Способи, які базуються на зміні параметрів середовища, полягають у тому, що джерело МП та досліджуваний об'єкт залишаються нерухомими, а змінюється характеристика середовища, в якому розповсюджується МП, наприклад, магнітна проникність рідинного середовища [26]. Окрім того використовується повне або часткове екранування, як самого досліджуваного об'єкту, що піддається впливу МП, так і джерела МП [25]. Іноді екран переміщується, змінюючи коефіцієнт екранування МП. Екрани виготовляють різної товщини та з матеріалів з різною магнітною проникністю. Переміщуючи зі змінною швидкістю екран та варіюючи характеристиками екранної пластини, отримують різноманітну конфігурацію МП. В екранах роблять, в необхідних випадках, вікна для збільшення проникнення МП до досліджуваного об'єкта. Для підвищення однорідності МП по довжині імпульсного соленоїда, використовують нерівномірне розподілення товщини ізоляційного матеріалу між витками соленоїда [24].

Способи, що базуються на зміні параметрів магнітної системи, ґрунтуються на зміні результуючої магнітної індукції в області досліджуваного об'єкту, яка досягається за рахунок складеної конструкції магнітної системи. Вона проектується таким чином, що за однією ділянкою створюваного рівномірного поля, йде інша ділянка, з іншим значенням магнітної індукції. Необхідні ділянки рівномірного поля забезпечуються вибором постійних магнітів з різним значенням залишкової намагніченості [27].

Для створення підсилених та сильних ІМП до 1500 Тл, використовують кумулятивний метод [28-31], тобто метод, заснований на стисненні початкового МП провідною оболонкою, що прискорена дією зовнішніх сил. Швидкість стиснення  $V_{СТ}$  оболонки повинна перевищувати швидкість втрати  $V_{ВТ}$  МП. За такої умови магнітна індукція первинного МП буде збільшуватись пропорційно відношенню  $\eta = V_{СД} / V_{АД}$  цих швидкостей. Значення та тривалість результуючого імпульсу МП переважно залежать від значення індукції первинного поля, максимально досяжної швидкості стискання оболонки, маси та матеріалу оболонки.

В залежності від способу стискання МП, *кумулятивний* метод поділяється на: *магнітокумулятивний* спосіб, заснований на стисканні первинного МП швидкостискаючою провідною оболонкою, що прискорюється за допомогою миттєвої енергії вибуху речовини [30]; *електродинамічний* спосіб, запропонований Кнейлером [32], в основу якого покладено принцип стискання магнітного потоку за допомогою вибуху циліндричної металевої вкладки, що працює як перетворювач потужності під дією електродинамічних сил під час розряду батареї конденсаторів на пластини циліндричної вкладки [33]; спосіб *магнітодинамічної кумуляції*, що полягає в стисненні магнітного потоку провідною оболонкою, прискореною під дією сил магнітного тиску, які виникають під час протікання струму по провідникам соленоїда [30].

Кумулятивні методи практично не застосовуються для точного формування заданої форми МП через складність урахування всіх фізичних процесів, що відбуваються при відтворенні ІМП. Здебільшого, ці методи застосовуються для отримання підсилених та сильних МП при електрофізичних та ядерних дослідженнях.

Сутність *пневмогідродинамічних* методів створення МП, полягає в зміні швидкості протікання рідини або газу, які збуджують електричний струм в каналі, який в свою чергу відтворює МП, пропорційне значенню струму, що протікає [34]. Пневмогідродинамічні методи поділяються на *магнітогідродинамічні* та *іоноплазмені* [34]. Даними методами отримати МП необхідної форми з високою точністю дуже складно та, як правило, вони використовуються для потреб енергетики, фізичних експериментів, де дотримання точних характеристик відтворення МП особливо не вимагається.

*Комбінований метод* полягає в накладанні ЗМП на постійне магнітне поле (ПМП) або поле іншого виду, тобто на суперпозиції полів в будь-якій точці простору [35]. На поле, що виникає в основній котушці  $B_{0i}(t)$ , накладається поле корегувальної котушки, причому значення параметрів поля корегувальної котушки визначають за допомогою вимірювання параметрів основного поля та порівнюють в регулюючому блоці з потрібним значенням МП  $B_0$ . Таким чином вдається підтримувати квазіпостійне або змінне за певним законом МП з похибкою близькою  $\leq 10\%$ . Комбіновані методи знайшли застосування

при випробуванні та контролі постійних магнітів [35]; отриманні сильних МП на основі підсумування полів в потрібній точці простору; в пристрої, що складається з двох сполучених по осьовій лінії соленоїдів різного роду: надпровідного та водоохолоджуваного. Але, пристрої, в яких реалізуються ці методи, через неврахований взаємний вплив соленоїдів та паразитичних наводок, мають значну похибку (10–15%) [36].

Найбільш широке розповсюдження для формування ЗМП отримали *електричні методи*. Електричні методи базуються на явищі виникнення МП при протіканні електричного струму по провіднику [37, 38]. Магнітна індукція поля  $B(t)$  пропорційна значенню струму, що протікає  $i(t)$ , а закон змінення індукції за часом, відповідає закону зміни значення струму живлення

$$B(t) = K_B \cdot i(t), \quad (1.1)$$

де  $K_B$  – стала контуру за магнітною індукцією.

Для збільшення динамічного діапазону значень відтворюваної магнітної індукції, існує ряд способів, пов'язаних як зі зміною конструкцій котушок, так і з застосуванням феромагнітних концентраторів [33].

Електричні методи можна розділити на дві групи: методи, засновані на додаванні гармонік та дискретно-апроксимаційні методи.

Перша група методів базується на живленні секцій індуктивної котушки синусоїдальним струмом різної частоти. Цей метод широко застосовується як для відтворення синусоїдального магнітного поля (СиМП) в беззалізній котушці індуктивності під час її живлення синусоїдальним струмом [39] однієї частоти, так і для створення несинусоїдальних МП [32]. Проте реалізувати останнє доволі складно та досягти прийнятної точності не вдається через труднощі налаштування та нестабільності характеристик контурів, а також їх впливу один на одного.

В приладобудуванні застосовується метод формування ЗМП, який полягає в узгодженій подачі імпульсів струму живлення в індукційну котушку для створення експоненціальної або S-подібної форми імпульсу МП [40, 41]. Але, розглянуті в зазначеній літературі пристрої,



дозволяють формувати, переважно, тільки одну форму ЗМП. До того ж, проформувати форму таких імпульсів неможливо, що і відрізняє, з нашої точки зору, цей метод від запропонованого методу дискретно-апроксимаційного відтворення ЗМП.

Він заснований на дискретній зміні значення магнітної індукції як за рівнем, так і за тривалістю. Цей метод, в порівнянні з іншими, має широкі функціональні можливості в частині автоматизації процесу відтворення, отримання різноманітних нормованих форм та конфігурацій МП з великим динамічним та частотним діапазоном; широкі межі регулювання параметрів створюваних полів; підвищену точність та швидку дію. Для реалізації такого методу необхідно, принаймні, три основних блока: система живлення або функціональний генератор (ФГ); комутатор або підсилювально-перетворювальний блок (ППБ); індуктивна котушка магнітної індукції (КМІ) або електромагніт [42,43].

Можливості дискретно-апроксимаційного методу обмежені досягнутим технічним рівнем елементної бази. Для точного відтворення необхідних форм ЗМП та ІМП, необхідна висока точність завдання струму живлення, мінімальний час перемикання ключів, стабільність сталої  $K_B$  за магнітною індукцією зразкових котушок.

Похибка відтворення значень в динамічному діапазоні серійних вітчизняних ФГ та генераторів спеціальних форм, дорівнює декільком відсоткам, хоча, кращі закордонні генератори мають більшу точність, де похибка відтворення значень амплітуди сигналу складає не більше 1% [44, 45]. При відтворенні ЗМП синусоїдальної форми на частотах від 0,1 до 1000 Гц, зміна постійної котушки за магнітною індукцією  $K_B$  для зразкових мір, виконаних у вигляді котушок Гельмгольца (КГ), складає біля 1–2%. Установки, які реалізують дискретно-апроксимаційний метод, мають такі похибки: методичну похибку, обумовлену апроксимацією безперервної функції та інструментальну похибку блоків. Так, для зменшення інструментальних похибок відтворення МП, використовуються структурні методи підвищення точності, які базуються на структурно-функціональній обробці сигналу [46].

Метод дискретно-апроксимаційного відтворення ЗМП можна розділити на декілька різновидів, обумовлених різними видами апроксимації:

експоненціально-ступінчастої, кусково-лінійної з різними ділянками дискретизації, адаптивної [47]. При кусково-лінійній апроксимації, кривими другого порядку, використовується відрізок коливальної кривої струму або напруги до пікового значення.

Навантаженням такого джерела ЗМП є коливальний контур, який складається з котушки індуктивності  $L$ , зразкового резистора  $R$  та конденсатора змінної ємності  $C$ . Контур налаштовано на резонансну частоту з відомим характером нахилу початкової ділянки струму  $i(t)$  при подачі стрибка напруги  $U$ . Цей метод, у порівнянні з попереднім, має більші можливості при створенні ЗМП в широких динамічних та частотних

діапазонах та дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії пристроїв, що реалізують цей метод.

З відомих методів створення ЗМП, з точки зору точності, швидкодії, мінімальних енергетичних затрат, відтворення результатів, найкращі показники мають електричні методи.

Серед електричних методів найбільш перспективним є метод дискретного відтворення ЗМП, якій має широкі можливості в створенні різноманітних форм ЗМП, їх технічної реалізації, високої точності формування, розширених частотних та динамічних діапазонах.

В наш час це, напевно, практично єдиний метод точного відтворення різноманітних нормованих форм ЗМП.

Високі вимоги до нормованої форми поля, обумовлені сучасним рівнем розвитку електроенергетики та космічної техніки, так як однією з основних тенденцій їх подальшого прогресу є суттєве підвищення вимог до точності вимірювання індукції МП та оцінки її форми.

В більшості публікацій, присвячених вимірюванню або створенню ЗМП, останнє характеризується амплітудним  $V_m$ , середнім  $V_c$  або діючим  $V_d$  значенням, частотою  $f$ , коефіцієнтом гармонік  $K_g$  чи коефіцієнтом форми  $K_f$ , або коефіцієнтом нелінійних спотворень  $K_{нс}$  для синусоїдальних періодичних полів [48, 49]. Параметрами ІМП правильних форм є амплітуда, тривалість імпульсу, його фронту та зрізу, іноді нерівномірність вершини імпульсу та швидкість наростання фронту або зрізу імпульсу [49].

В електричних вимірюваннях, для характеристики імпульсних сигналів правильних форм, є 22 параметри, з яких 11 визначають форму імпульсу шляхом геометричних побудов. Для промислово - серійних генераторів сигналів спеціальної форми, нормується 8 параметрів [50,51]. При оцінці імпульсів інтегральним методом, використовують середнє значення сигналу  $I_{cp}$  та узагальнені параметри імпульсу – коефіцієнти форми [51]. В НВО «ВНДІМ ім. Д.І. Менделєєва» був розроблений робочий еталон одиниці магнітної індукції середніх змінних синусоїдальних магнітних полів (ЗСМП) в динамічному діапазоні  $1 \cdot 10^{-3} - 50 / f$  Тл при частоті  $f = 45 - 1000$  Гц та середньоквадратичного відхилення 0,03-0,5%, в якому нормуються діюче значення індукції, частота та коефіцієнт нелінійних спотворень [52].

З нашої точки зору, враховуючи особливості сучасного стану магнітовимірювальної апаратури (відсутність серійного випуску аналізаторів МП, які пройшли метрологічну атестацію, а також низьку точність тесламетрів для вимірювання ЗСМП), для джерел ЗМП різноманітних форм найбільш оптимальною метрологічною характеристикою є діюче значення магнітної індукції  $B_d$ . Це підтверджується тим, що кількісна характеристика транспортної здатності струму з довільною формою кривої при переносі енергії, є діючим значенням цього струму. Магнітна індукція  $B_d$  джерела ЗМП з беззалізною котушкою дорівнює

$$B_d = K_{Vi} \cdot I_d,$$

де  $K_{Vi}$  – стала котушки за магнітною індукцією для даного виду ЗМП;  
 $I_d$  – діюче значення струму, що протікає  $i(t)$ .

Окрім того, при відтворенні необхідних форм поля джерелом ЗМП, апріорно відомий (заданий дослідником) потрібний закон відтворення в часі (форма) МП  $B(t)$ , тобто необхідна модель сигналу. Невідома тільки ступінь наближення реально відтвореного ЗМП та його модель.

Для найбільш повного опису характеристик джерела ЗМП, на наш погляд, цілком достатньо нормувати форму сигналу  $B(t)$  та його діюче значення  $B_d$ .

## 1.2. Дослідження особливостей методу дискретного відтворення змінного магнітного поля

При відтворенні слабких та середніх ЗМП - густина енергії, магнітний тиск та температура мають вирішальне значення для точності створення МП. Так, при магнітній індукції в 1 Тл, магнітний тиск дорівнює  $3,979 \text{ кГс} \cdot \text{см}^{-2}$ , при густині енергії  $3,979 \text{ Дж/см}^3$  та температурі  $300^\circ\text{К}$  [29]. Механічна міцність провідників при даному тиску не порушується. В цих діапазонах при подачі імпульсів струму в навантаження – котушку індуктивності, процеси виникнення МП можна описати на основі законів електротехніки як в лінійних електричних ланцюгах з зосередженими параметрами.

Проведемо дослідження можливостей дискретного метода для отримання полігармонічних МП в широкому частотному діапазоні. За частотою він обмежений, насамперед, умовами теореми Котельникова, з яких виходить, що функція  $B(t)$  в діапазоні частот від 0 до  $f_n$ , може бути визначена сукупністю дискретних відліків, взятих через інтервал часу  $\Delta t$ , який дорівнює

$$\Delta t = 1 / 2 f_n . \quad (1.2)$$

Відтворюваний сигнал апроксимується за допомогою ряду

$$B(t) = \sum_{K=-\infty}^{\infty} B(K\Delta t) \frac{\sin \frac{\Omega}{2}(t - K\Delta t)}{\frac{\Omega}{2}(t - K\Delta t)},$$

де  $\Omega$  – частота дискретизації, що дорівнює  $\Omega = 2\omega_n = 4\pi f_n$  ;

$K$  – ціле число,  $B(K\Delta t)$  - значення сигналу в моменти часу  $t_K$ , дорівнюють  $t_K = K\Delta t$  .

З точки зору відтворення необхідної функції за дискретним рівнем з похибкою відновлення  $\varepsilon$  часто використовують інтерполяційний багаточлен Лагранжа нульового – першого порядку та крок дискретизації при цьому повинен вибиратися з наступних умов [53]:

– при ступінчастій апроксимації

$$\Delta t \leq \frac{\varepsilon}{2\pi f_n}, \quad (1.3)$$

– при лінійній або нелінійній експоненціальній апроксимації

$$\Delta t \leq \frac{\sqrt{2\varepsilon}}{\pi f_n}. \quad (1.4)$$

Як видно з рівнянь (1.3), (1.4) з (1.2), для досягнення похибки відновлення  $\varepsilon=0,1\%$ , крок дискретизації при ступінчастій апроксимації повинен зменшитися в 3140 разів, при лінійній – в 35 разів.

Окрім сказаного, точність відтворення МП, в більшості, визначається параметрами магнітної системи. Розглянемо найпростіший активно-індуктивний ланцюг  $r$ ,  $L$ , що під'єднаний до джерела зі ступінчастою зміною вихідної напруги. При швидкій зміні на значення  $\Delta U_K$  вихідної напруги джерела, зміна струму  $\Delta i_K$  в котушці індуктивності  $L$ , в  $K$ -й момент часу відбувається за експоненціальним законом

$$\Delta i_K = \frac{\Delta U_K}{R} \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t_K}{\tau}} \right), \quad (1.5)$$

де  $\tau$  – стала часу ланцюга, дорівнює  $\tau = L / r$ ;

$\Delta U_K$  – приріст напруги;

$R$  – повний опір ланцюга;

$\Delta t_K$  – інтервал часу, впродовж якого струм в котушці отримує приріст  $\Delta i_K$ .

Тоді повний струм  $i_K$  в будь-який момент часу  $t_K$ , можна виразити наступним чином:

$$i_K = \Delta i_1 + \Delta i_2 + \dots + \Delta i_K = \frac{\Delta U_1}{R} \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t_1}{\tau}} \right) + \frac{\Delta U_2}{R} \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t_2}{\tau}} \right) + \dots + \frac{\Delta U_K}{R} \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t_K}{\tau}} \right). \quad (1.6)$$

При рівномірному кроці дискретизації за часом ( $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \dots = \Delta t_K = \Delta t$ ), вираз (1.6) записується у вигляді

$$i_K = \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}\right) \sum_{i=1}^K \frac{\Delta U_i}{R}. \quad (1.7)$$

В цьому випадку значення магнітної індукції  $B_K$ , що створюється струмом в котушці індуктивності, дорівнює:

$$B_K = K_B \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}\right) \sum_{i=1}^K \frac{\Delta U_i}{R}. \quad (1.8)$$

Тоді рівняння магнітної індукції:

$$B(t) = B_y \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}\right),$$

де  $B_y = K_B \cdot \sum_{i=1}^K \frac{\Delta U_i}{R}$  її усталене значення.

З виразу (1.8) та з урахуванням необхідної похибки  $\gamma$  встановлення значення магнітної індукції, крок дискретизації  $\Delta t$  за часом, визначається з формули

$$\Delta t = -\tau \ln|\gamma|, \quad (1.9)$$

де  $\gamma = \frac{B_y - B}{B_y}$  ( $B_y, B$  – усталені та поточні значення магнітної індукції).

Так, при  $\Delta t = 10\%$  похибка усталення  $\gamma$  не перевищує  $5 \cdot 10^{-3}\%$ .

Підставивши (1.9) в (1.4), отримаємо для експоненціальної апроксимації наступну залежність частоти від параметрів електричного ланцюга, похибок відтворення та усталення

$$f_{ne} \leq -\frac{\sqrt{2\varepsilon}}{\pi\tau \ln|\gamma|} \quad (1.10)$$

Для ступінчастої апроксимації

$$f_{nc} \leq -\frac{\varepsilon}{2\pi\tau \ln|\gamma|} \quad (1.11)$$

На співвідношеннях (1.9) – (1.11) базується спосіб відтворення ЗМП з нормованим значенням його параметрів, що полягає в дискретній зміні магнітної індукції за допомогою дискретної зміни значення постійного струму живлення котушки індуктивності. Перший крок дискретизації

за магнітною індукцією, визначають як добуток необхідної швидкості зміни індукції на крок дискретизації за часом, який розраховується за формулою (1.9). Гранична частота відтвореної функції не повинна перевищувати частоту  $f_n$ , яка визначається з формул (1.10) для експоненціальної апроксимації та (1.11) – для ступінчастої.

Проаналізуємо формули (1.10) та (1.11). Для збільшення частотного діапазону відтворюваних значень ЗМП з високою точністю необхідно,

$$\lim_{\substack{\tau \rightarrow 0 \\ \gamma \rightarrow 0}} 2\pi\tau \ln|\gamma| \rightarrow 0 \quad (1.12)$$

Ця умова виконується, якщо забезпечити зменшення сталої часу  $\tau$ . На рис. 1.2а ілюструється залежність максимальної частоти дискретизованого сигналу від значення сталої часу  $\tau$  при експоненціально-ступінчастій апроксимації з похибкою відновлення  $\varepsilon$ . Чим вища точність апроксимації та менша похибка усталення  $\gamma$ , тим менша гранично допустима частота відтворення сигналу (рис. 1.2б, в).

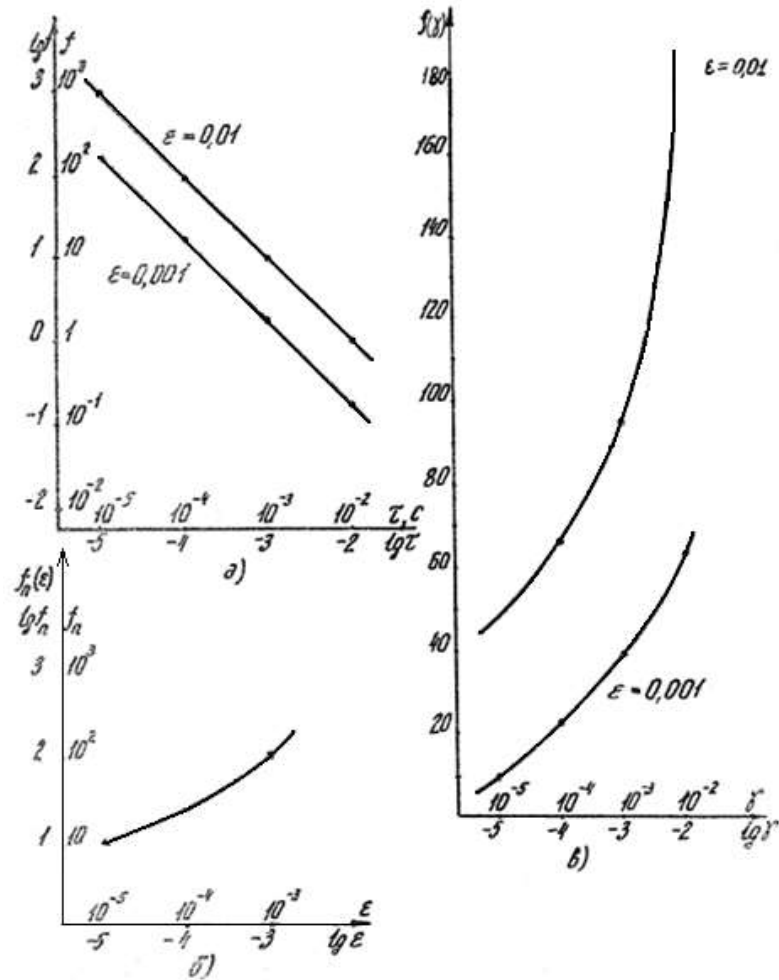


Рис.1.2. Залежність максимальної частоти дискретизованого сигналу від значення сталої часу  $\tau$  при експоненціально-ступінчастій апроксимації з похибкою відновлення  $\varepsilon$ .

Для ступінчато-апроксимованого сигналу ці закономірності показано на рис. 1.3.

Таким чином, для створення МП різноманітних форм в звуковому діапазоні частот з високою точністю, необхідно забезпечити мікросекундні сталі часу ланцюгів з індуктивністю, що в свою чергу, призводить до обмеження динамічного діапазону відтворюваних полів.

З урахуванням сучасної елементної бази та існуючих зразків котушок магнітної індукції, можна отримати за допомогою даного способу середні МП до 0,1 Тл в частотному діапазоні від 0 до 1 кГц.



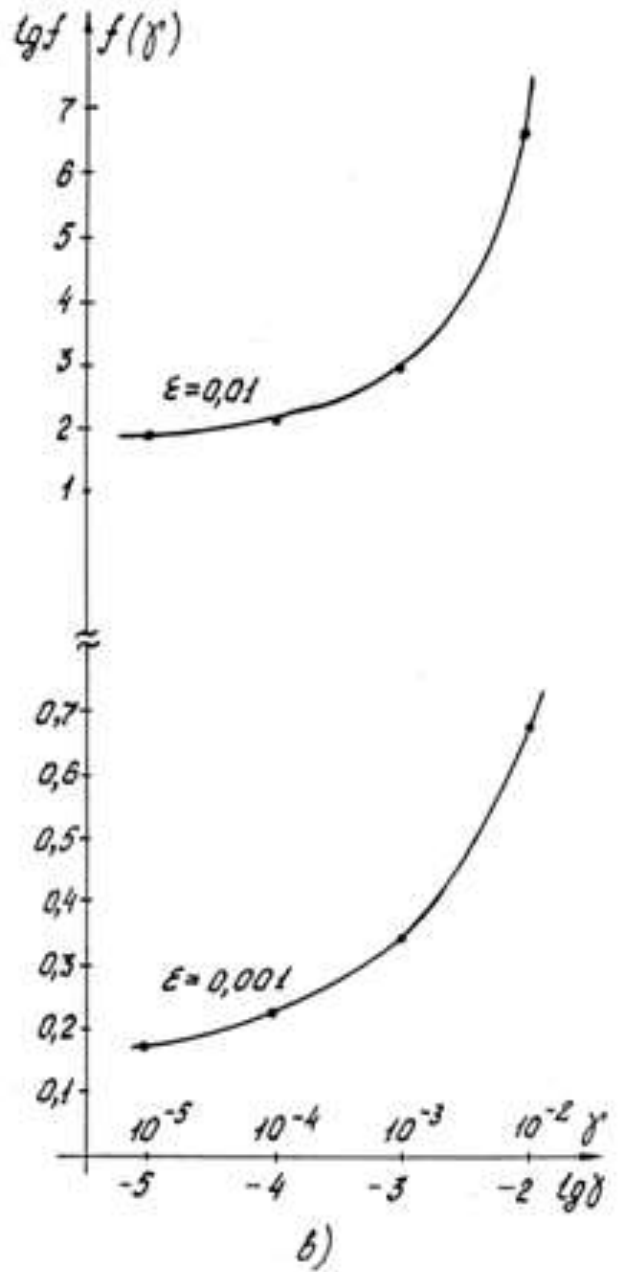
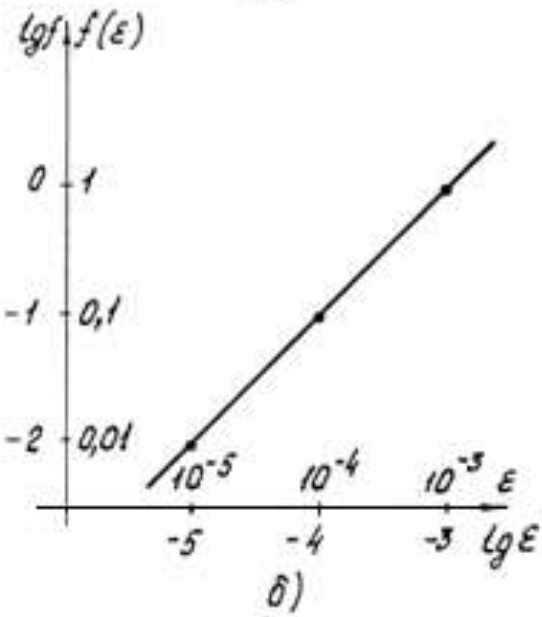
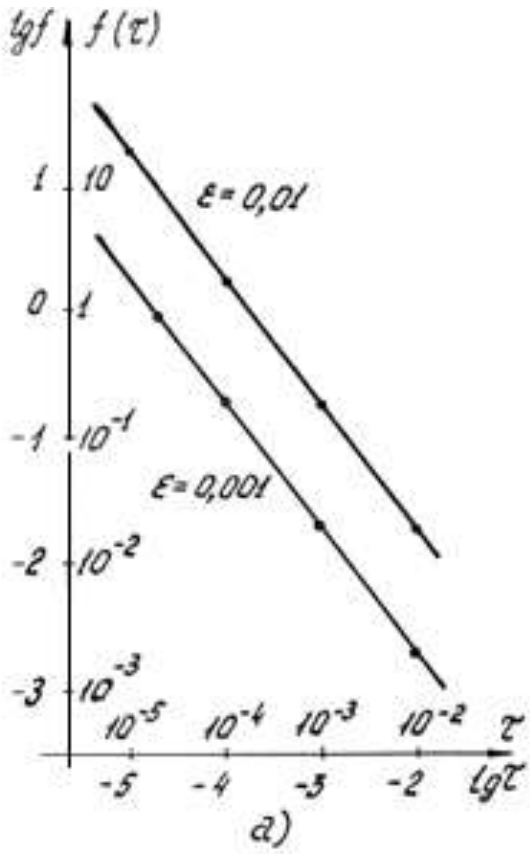


Рис. 1.3. Залежність максимальної частоти дискретизованого сигналу від значення сталої часу  $\tau$  при ступінчасто-апроксимованому сигналі .

### 1.3. Перспективні напрями дослідження

Аналіз методів створення ЗМП показав, що найбільш перспективний напрямок при розробці сучасних МТА та ПДЗМП пов'язаний з використанням метода дискретного відтворення ЗМП, що має важливу властивість отримання різних форм ЗМП з достатньо високою точністю, в широкому діапазоні частот, з використанням автоматизації процесу відтворення. Так, на сучасному етапі розвитку народного господарства держави, особливо в таких галузях як приладобудування, аерокосмічна техніка, спецелектрометалургія вимагається створення таких джерел ЗМП, які забезпечили б точність відтворення ЗМП різноманітних форм, класу 0,5 – 1,5, в діапазоні слабких та середніх МП, частотою 1000 Гц. Такі джерела в якості повірочної апаратури будуть сприяти розробці та серійному випуску вимірювачів ЗМП класу точності 1,5 - 5.

В останній час стрімко розвивається новий напрямок в вимірювальній техніці – вимірювання параметрів швидкоплинних процесів. В рамках цього напрямку цілковито необхідна розробка нових принципів побудови джерел ЗМП з розширеними динамічними та частотними діапазонами відтворення необхідних параметрів поля та нормованої форми сигналу.

До числа задач цієї монографії належать наступні дослідження:

1. Дослідження та розробка методу дискретного відтворення ЗМП, що базується на використанні різних видів апроксимації необхідної форми поля.

2. Розробка нових принципів побудови ПДЗМП з розширеними динамічним та частотним діапазонами.

3. Розробка, створення та експериментальне дослідження АКВЗМП.

4. Аналіз та оцінка похибки автоматизованого комплексу АКВЗМП.

5. Розробка науково-обґрунтованої методики метрологічної атестації АКВЗМП.

Розв'язання даних задач дозволить розробити та дослідити МТА та

ПДЗМП, які використовуються як для фізичних експериментів та метрологічної повірки тесламетрів ЗМП та ІМП, класу 1,5 - 5, що буде сприяти як створенню та серійному випуску даних приладів, так і комплексів та систем МТА. Такі прилади мають світовий рівень та, при їх серійному виробництві в масштабах держави, забезпечать суттєвий економічний ефект.

Так на основі запропонованої класифікації методів створення ЗМП - проведено порівняльний аналіз, з точки зору досягнення високої точності та універсальності відтворення необхідних форм ЗМП та встановлено, що найбільш високою точністю володіють електричні методи. Серед електричних методів найбільш перспективним, з точки зору формування різноманітних форм поля та точності, є метод дискретного відтворення ЗМП.

Обґрунтовується доцільність оцінки відтворення несинусоїдальних ЗМП за відносною похибкою форми та діючому значенні  $B_d$  магнітної індукції.

Запропоновано удосконалений спосіб дискретного відтворення ЗМП. Встановлений зв'язок між точністю  $\varepsilon$  відтворення необхідної форми МП, похибкою усталення  $\gamma$  магнітної індукції  $B(t)$  на кожному кроці дискретизації та динамічними параметрами самого джерела ЗМП – сталої часу  $\tau$ .

Визначені оптимальні режими використання запропонованого способу при експоненціально-ступінчастій апроксимації необхідної форми ЗМП. Досліджені межі частотного діапазону при експоненціальній та ступінчастій апроксимації форми поля.

## РОЗДІЛ II

### ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ПРЕЦИЗІЙНИХ ДЖЕРЕЛ ЗМІННИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ

#### 2.1. Порівняльний аналіз принципів побудови джерел змінних магнітних полів

ПДЗМП являють собою міру змінюваного (змінного та імпульсного) МП, що характеризується нормованими значеннями параметрів (магнітною індукцією  $B$ , напруженістю  $H$  і так далі) МП та законом зміни цих параметрів в часі (формою)  $B(t)$ . Найпростіше джерело ЗМП складається з ФГ, підсилювача-перетворювача (П) та КМІ. Основною вимогою, яка висувається до ПДЗМП, є точне відтворення магнітної індукції заданої форми  $B(t)$ , з нормованим діючим значенням  $B_d$ , що оцінюється відносною похибкою

$$\delta_B = \frac{\Delta B_d}{B_d} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

де  $\Delta B_d = |\Delta B_{d_x} - \Delta B_{d_0}|$  - абсолютна похибка вимірювання магнітної індукції;  $B_{d_x}$ ,  $B_{d_0}$  - поточне та усталене значення магнітної індукції.

На сьогодні, відомо джерело СиМП, похибка якого в діапазоні частот 45–1000 Гц, не перевищує 0,05% [38]. В публікаціях [54, 55] описано джерела синусоїдальних та періодичних ІМП з похибкою відтворення максимального значення магнітної індукції 5–10%. Для обґрунтування вибору кращих структур ПДЗМП, які реалізують метод дискретного відтворення МП, проведемо порівняльний аналіз їх принципів побудови та, виходячи з цього, складемо класифікацію, основною ознакою якої оберемо метод підвищення точності відтворення нормованої форми  $B(t)$  та діюче значення магнітної індукції  $B_d$ .

Всі ПДЗМП можна розділити на джерела з конструктивними та структурними методами підвищення точності (рис. 2.1).

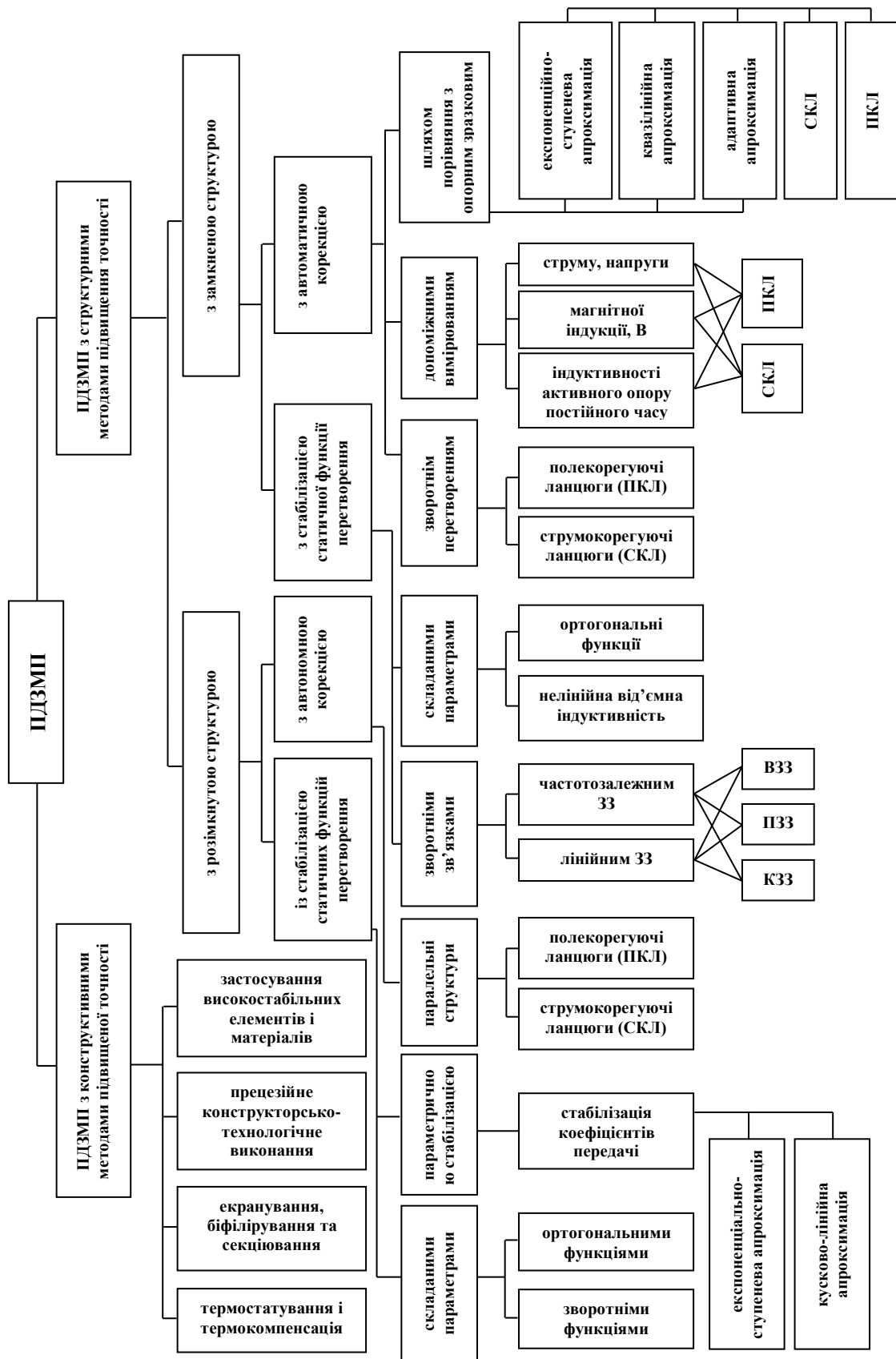


Рис. 2.1. Розподіл ПДЗМП на джерела з конструктивними та структурними методами підвищення точності

До конструктивних методів підвищення точності належать методи, які використовують термостатування та термокомпенсацію, екранування, біфілірування та секціонування, високостабільні елементи та матеріали, а також високоточне конструктивне виконання КМІ. Основна мета даних методів полягає в суттєвому зменшенні зовнішнього впливу (температури, електромагнітних полів тощо) на значення нормованих параметрів відтворюваного поля.

Термостатування використовується для підтримки стабільності температури еталонних котушок та котушок опорів Державного спеціального еталону одиниці магнітної індукції змінного поля [37, 56]. Екранування, біфілірування та секціонування дозволяють послабити вплив зовнішніх паразитичних електромагнітних полів та наводок на нормоване значення параметрів відтворюваного поля, а також підвищити однорідність поля в робочому об'ємі котушок.

Використання високостабільних елементів та матеріалів – один з найпоширеніших, простих та економічних конструктивних методів підвищення точності ПДЗМП. Ретельне конструктивне використання КМІ

в результаті забезпечує високу однорідність поля всередині робочого об'єму КМІ [56]. Але використання тільки конструктивних методів підвищення точності не забезпечує необхідного зменшення похибки відтворення форми магнітної індукції  $B(t)$ , яка викликана температурною та часовою нестабільністю вузлів ПДЗМП та їх частотною залежністю.

Тому з метою подальшого зменшення похибок ці методи використовуються спільно зі структурними методами підвищення точності.

Структурні методи підвищення точності в цілому відрізняються від конструктивних тим, що вони вплив негативних факторів зводять до мінімуму або усувають зовсім. ПДЗМП поділяються, в залежності від структурної схеми побудови, на джерела ЗМП з розімкненою та замкненою структурними схемами.

Джерела ЗМП з розімкненою структурною схемою отримали розповсюдження в магнітних вимірюваннях [35, 36] та застосовуються як

з дискретним принципом формування МП [36, 57], так і з аналоговим [24, 58]. Аналіз джерел ЗМП з розімкненою структурною схемою, що використовуються для випробування феромагнітних матеріалів в певних режимах перемагнічування зразка, докладно розглянуто в роботах [35, 59]. В них показано, що джерела, які будуються за розімкненою структурною схемою, мають невисоку точність (похибка відтворення 5 – 20%) задання форми МП та низьку стабільність. Точність відтворення магнітної індукції  $B(t)$  залежить від лінійності та стабільності коефіцієнтів перетворення блоків джерела ЗМП та всього джерела в цілому. До того ж, коефіцієнт перетворення зразкової котушки магнітної індукції (ЗКМІ) частотозалежний.

ПДЗМП з розімкненою структурною схемою поділяються на дві групи: джерела зі стабілізацією статичної функції перетворення та джерела з автономною корекцією. Джерела зі стабілізацією статичної функції перетворення, в свою чергу, поділяються на джерела, в яких використовується для стабілізації вихідних параметрів метод складових параметрів ланцюгів з оберненими та ортогональними функціями перетворення. Для першої групи, при стабілізації функцій перетворення, застосовується з метою зменшення втрат, їх компенсація на активному опорі котушки, шляхом підключення конверторів від'ємного опору (КВО) (рис. 2.2). В таких джерелах частково компенсуються втрати енергії на тепловий нагрів та за рахунок цього, збільшується динамічний діапазон відтворення магнітної індукції.

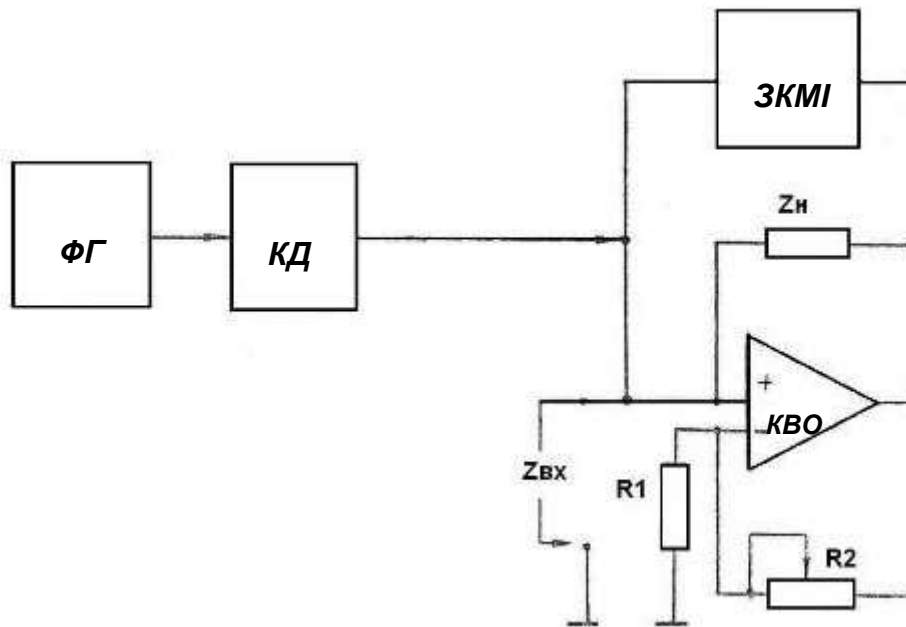


Рис. 2.2. Підключення конверторів від'ємного опору

В іншій групі застосовується компенсація похибок відтворення форм ЗМП шляхом підключення елементів, які мають обернені функції перетворення, наприклад, підключення до ЗКМІ додаткового конденсатора для формування прямокутної форми імпульсу МП [60].

Як приклад такої пасивної корекції, розглянемо корекцію вершини імпульсу в ланцюгах з індуктивністю при додатковому введенні в ці ланцюги пасивних корегувальних двополюсників (КД), які складаються з RC-ланцюгів або RLC-контурів. В роботі [61] показано КД першого та другого порядку, які забезпечують зниження значення нерівномірності вершини прямокутного імпульсу в 4 та 18 разів, а також зменшення відносної нерівномірності вершини до заданих меж, без урахування всієї форми імпульсу магнітної індукції, в припущенні того, що сталі часу котушки та КД незмінні. Таке припущення в реальних ланцюгах не відповідає дійсності.

Для отримання точних значень параметрів МП, використовується стабілізація коефіцієнтів перетворення окремих блоків джерела.

В інших засобах відтворення ЗМП з розімкненою структурною схемою та відомими функціями перетворення його вихідних каскадів, використовуються багатоконтурні структури та автономна корекція відтворюваної форми МП. Індуктивна та ємнісна складові



навантаження,

з оберненими або ортогональними функціями перетворення, знаходяться в паралельних гілках та під'єднані до незалежних генераторів імпульсів [60].

Такі джерела ЗМП будуються як зі струморегувальними, так і з полекорегувальними ланцюгами [49, 60]. Ці джерела ЗМП мають зручне та просте регулювання при отримванні необхідної форми, в порівнянні з ПДЗМП зі стабілізацією статичної функції перетворення за допомогою пасивних ланцюгів. В пасивних ланцюгах складно забезпечити рівність сталих  $\tau_1 = \tau_2$ . Тому, краще використовувати джерела

з паралельними вихідними ланцюгами, оскільки в кожному з них легше отримати необхідну функцію перетворення методом автономної корекції (принцип «двоканальності» академіка Б.М. Петрова) [52].

Одне з таких джерел, що використовується для відтворення квазіпрямокутної форми поля, показано на рис. 2.3.

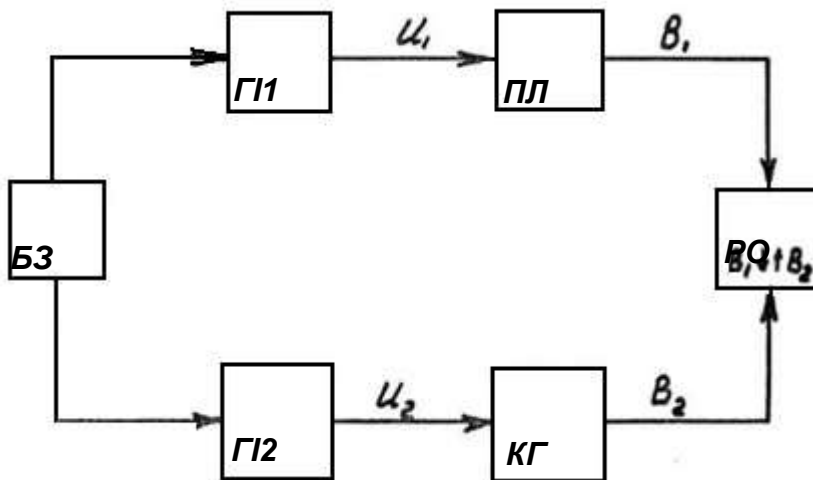


Рис. 2.3. Джерело ЗМП, що використовується для відтворення квазіпрямокутної форми поля

Джерело ЗМП складається з блока запуску (БЗ), що керує роботою двох генераторів імпульсів (ГП1, ГП2), під'єднаних відповідно до контуру, який виконано у вигляді квазіполоскової лінії (ПЛ), та КГ, що відтворюють МП в замкненому робочому об'ємі (РО) [60]. Так як квазіполоскова лінія виконана у вигляді RC-ланцюга, то підбирають

параметри квазіполоскової лінії та КГ таким чином, щоб їх сталі часу були практично рівні, тобто

$$\tau_{10} = \tau_{20} = \tau_0, \quad (2.2)$$

де

$$\tau_{10} = R_1 \cdot C; \quad \tau_{20} = L / R_2. \quad (2.3)$$

Тоді струм, що протікає по контуру, який виконано у вигляді квазіполоскової лінії, буде дорівнювати:

$$i_{10} = \frac{U_1}{R_1} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{10}}}. \quad (2.4)$$

Струм в КГ

$$i_{20} = \frac{U_2}{R_2} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{20}}} \right). \quad (2.5)$$

Магнітна індукція, яка викликається струмами, що протікають, дорівнює

$$B_{10} = K_{B_1} \cdot i_{10}, \quad (2.6)$$

$$B_{20} = K_{B_2} \cdot i_{20}, \quad (2.7)$$

де  $K_{B_1}$  - коефіцієнт перетворення контуру (стала контуру за магнітною індукцією);

$K_{B_2}$  - стала КГ за магнітною індукцією.

Результуюча магнітна індукція дорівнює

$$B(t) = B_{10} + B_{20} = K_{B_1} \cdot i_{10}(t) + K_{B_2} \cdot i_{20}(t). \quad (2.8)$$

При умові дотримання рівності (2.2) та підборі коефіцієнту

$$B_0 = \frac{U_1 \cdot K_{B_1}}{R_1} = \frac{U_2 \cdot K_{B_2}}{R_2}, \quad (2.9)$$

отримаємо необхідну квазіпрямокутну форму магнітної індукції.

Розглянуті ПДЗМП з розімкненою структурною схемою можуть бути використані тільки для відтворення чітко визначених форм МП, наприклад квазіпрямокутних або трапецієдальних. Вони дуже чутливі

до зміни температури, впливу зовнішніх електромагнітних полів, зміни частоти та форми струму живлення. Відносна приведена похибка відтворення форми ЗМП  $\delta = \frac{\Delta}{B_m} \cdot 100\%$  в цих джерелах складає 4-10 % [40].

Більшою точністю володіють джерела ЗМП, в яких використовується замкнена структурна схема. Джерела з замкненою структурою дозволяють зменшити не тільки статичну похибку відтворення, пов'язану зі зміною коефіцієнта передачі джерела, але й динамічну похибку. Джерела ЗМП з замкненою структурною схемою поділяються також на дві групи: джерела зі стабілізацією статичної функції перетворення та джерела з автоматичною корекцією похибок. В основу роботи ПДЗМП першої групи покладено принцип забезпечення незмінності за часом статичної реальної функції перетворення  $W_0(P)$  джерела, або відомої залежності  $W(P) = f(t^\circ, R, L, t)$  від зміни зовнішніх і внутрішніх факторів та її близькості  $W(P) \square W_0(P)$  до номінальної характеристики перетворення [62]. Сутність принципових відмінностей другої групи джерел полягає в тому, що при роботі джерела ЗМП, будь-яким методом оцінюється різниця його статичної або динамічної реальних функцій перетворення від номінальних, нормованих характеристик перетворення та, за допомогою активних корегуючих ланцюгів, змінюють ці функції так, щоб вони весь час були близькими до номінальних характеристик перетворення [63, 64].

До першої групи відносяться джерела, в яких використовуються лінійні або частотозалежні обернені зв'язки, які підтримують коефіцієнт перетворення всього джерела або його окремих блоків в заданих межах. При цьому всі види ЗЗ поділяються на позитивні, від'ємні та комбіновані. ЗЗ здійснюється переважно за струмом, або за напругою, а також за магнітною індукцією. Узагальнена функціональна схема таких джерел ЗМП наведена на рис. 2.4а. Частина вихідного сигналу з ЗКМІ подається на вхід підсилувача потужності (ПП), що складається з диференціального підсилувача (ДП), попереднього підсилувача і каскадів ПП. Такий принцип побудови, при якому навантаження у вигляді ЗКМІ та резистора, який знаходиться в ланцюзі

ЗЗ, забезпечує стабілізацію коефіцієнта передачі за струмом та зменшує температурну похибку, що приводить до підвищення точності відтворення значень магнітної індукції.

До цієї ж групи належать і джерела ЗМП, що використовують метод складових параметрів. Для підвищення точності відтворення синусоїдальної форми ЗМП в феромагнітному осерді і компенсації нелінійності при випробуванні феромагнітних матеріалів, включаються нелінійні від'ємні індуктивності в ланцюг ЗЗ (рис. 2.4б).

Коефіцієнт нелінійних викривлень синусоїдальної форми магнітної індукції таких систем  $\leq 5\%$  [65].

Група джерел ЗМП, яка використовує автоматичну корекцію для формування ЗМП, поділяється на три підгрупи: джерела ЗМП, в яких використовуються допоміжні вимірювачі; джерела, в яких використовується порівняння зі значенням сигналу зразкового перетворювача; джерела з оберненим (зворотнім) перетворенням вихідної величини у вхідну.

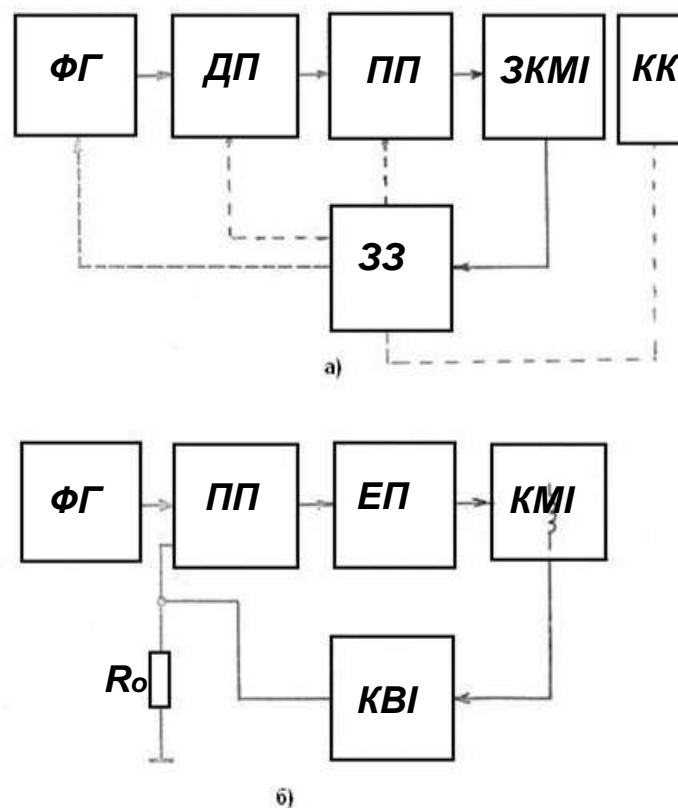


Рис. 2.4. Узагальнена функціональна схема джерел ЗМП: - а) зі зворотнім зв'язком

та - б) з нелінійною від'ємною індуктивністю в ланцюзі ЗЗ

Функціональна схема ПДЗМП з додатковим допоміжним вимірюванням, для корекції вершини імпульсу МП, зображено на рис.2.5.

З функціонального генератора (ФГ) сигнал поступає на підсилювач потужності (ПП), вихідним струмом якого живиться ЗКМІ.

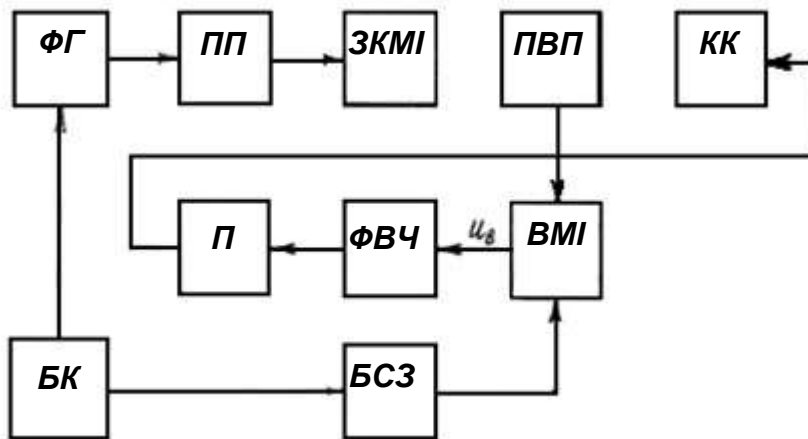


Рис 2.5. Функціональна схема ПДЗМП з допоміжним вимірюванням для корекції вершини імпульсу МП

При надходженні сигналу з блоку керування (БК) через блок синхронізації та затримки (БСЗ), вмикається на короткий час вимірювач магнітної індукції (ВМІ), первинний вимірювальний перетворювач (ПВП), виконаний на основі індукційної котушки. З виміряного сигналу відокремлюється його високочастотна складова фільтром верхніх частот (ФВЧ), підсилюється підсилювачем (П) та надходить на корегувальну котушку в протифазі для компенсації високочастотних викидів на плоскій вершині імпульсу МП. Такий принцип побудови джерела ЗМП використовується при генерації імпульсів МП з квазіплоскою вершиною для діапазону середніх та сильних МП [49]. Але така система дуже чутлива до зміни значення зовнішніх паразитних МП та вимагає ретельної синхронізації відтвореного та компенсуючого полів. Похибка відтворення магнітної індукції таким джерелом складає 3-5%.

Відомі структури джерел ЗМП, в яких використовуються допоміжні вимірювання індуктивності  $L$  та сталої часу  $\tau$  вихідного ланцюга для

підвищення точності відтворення змінного поля та зменшення температурної похибки.

Магнітна індукція  $B(t)$ , відтворювана таким джерелом, визначається з формули (1.1), а діюче значення синусоїдального змінного струму в котушці дорівнює:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}}, \quad (2.10)$$

де  $U$  – діюче значення напруги, що прикладена до котушки;  
 $R, L$  – активний опір та індуктивність вихідного ланцюга;  
 $\omega = 2\pi f$  – частота сили струму.

Підставляючи формулу (2.10) в рівняння (1.1), отримаємо

$$B = \frac{B_0}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}, \quad (2.11)$$

де  $B_0$  – максимальне значення магнітної індукції в котушці при протіканні по ній струму  $I_0 = \frac{U}{R}$  ;

$\tau$  – стала часу вихідного ланцюга джерела, яка дорівнює  $\tau = \frac{L}{R}$  .

Перетворивши рівняння (2.11) отримаємо:

$$\tau = \sqrt{\frac{\Delta^2 B}{\omega^2}}, \quad (2.12)$$

де  $\Delta^2 B = \left| \frac{B^2 - B_0^2}{B^2} \right|$  - відносна різниця квадратів значень магнітної індукції.

На основі приведених рівнянь видно, що при  $\omega = const$  , відносна зміна магнітної індукції  $\Delta B$ , викликана коливанням діючих факторів (температура, старіння елементів, зовнішні електромагнітні поля), аналітично пов'язана зі зміною сталої часу  $\tau$  джерела ПДЗМП. Тим більше, що стала часу є важливим параметром прецизійного джерела, що характеризує його роботу в динамічному режимі.

Принцип роботи джерела ЗМП, що реалізує спосіб допоміжного вимірювання  $\tau$  вихідного ланцюга ПДЗМП та підтримки його незмінного значення для забезпечення стабільного формування квазітрапецієдальної форми ЗМП, запропоновано в роботі [66].

Застосування додаткового вимірювання з визначенням дійсних значень сталої часу  $\tau_u$  джерела ЗМП впродовж всього процесу функціонування та, періодичне порівняння їх зі зразковим (первинним) значенням  $\tau_0$  сталої часу, з виробленням сигналу, що регулює впливи на магнітну індукцію  $B$ , при зміні рівності  $\tau_0 = \tau_u$  - призводить до підвищення точності формування імпульсного зразкового магнітного поля  $B(t)$ , зменшенню температурних, частотних і часових нестабільностей ПДЗМП.

На рис. 2.6 ілюструються графіки залежності зміни магнітної індукції  $B(\tau)$  від зміни значення сталої часу  $\tau$  та характер зміни відносної похибки  $\delta$  при зміні сталої часу.

Проте, такий принцип досягнення стабільності необхідних значень зразкового ЗМП, складний та не забезпечує високу точність і стабільність підтримання параметрів поля через непряме усунення нестабільності МП, так як корегуючий вплив направлено не на усунення дисбалансу поточного  $\tau_u$  і початкового  $\tau_0$  значень сталих часу та їх складових  $R, L$ , а на зміну струму  $\Delta I$ , що усуває зміни діючого значення індукції МП. Такий принцип не завжди доцільний.

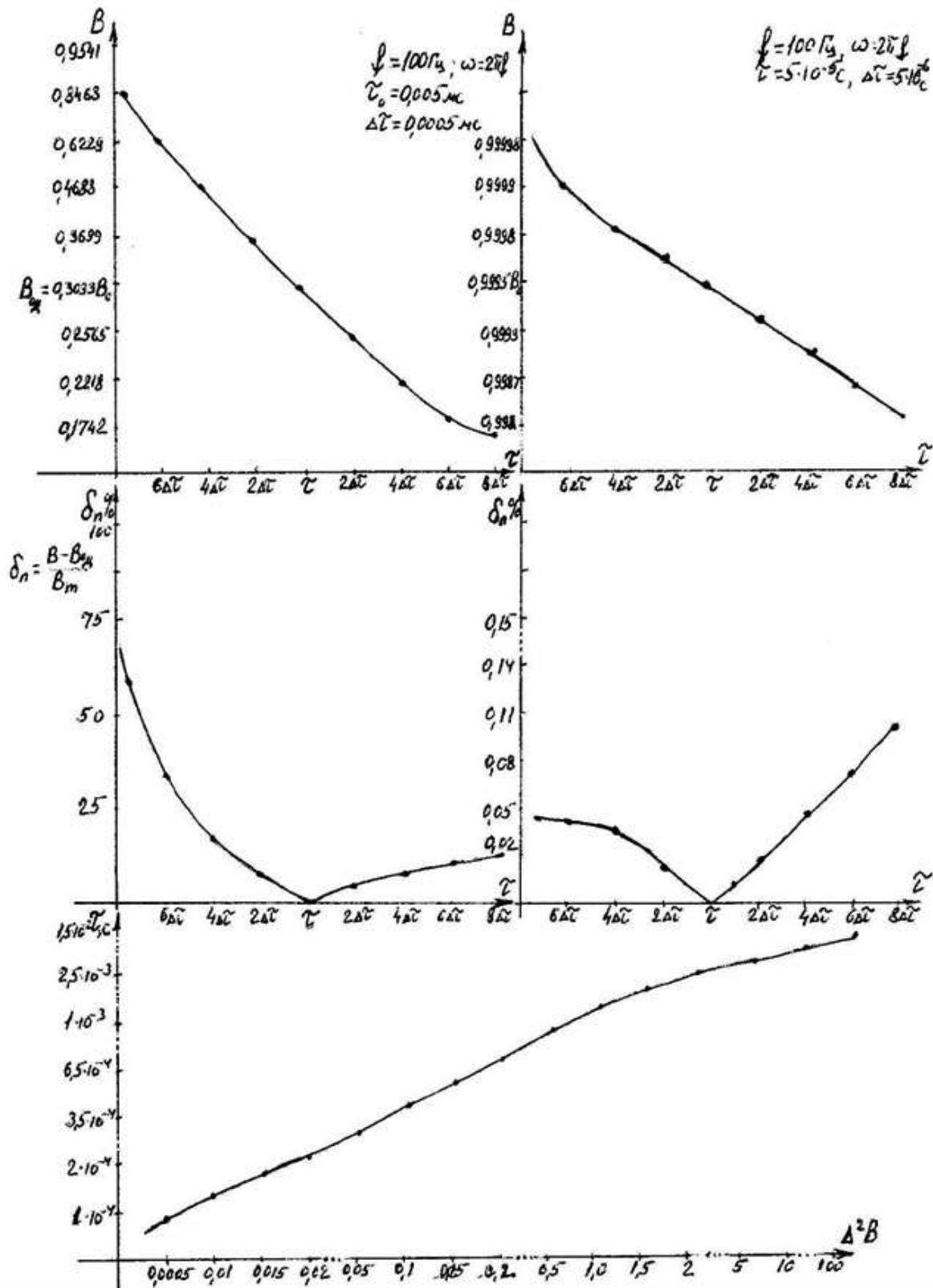


Рис. 2.6. Графіки залежностей зміни магнітної індукції  $B(\tau)$  від зміни сталої часу  $\tau$  та характер зміни відносної похибки  $\delta$  при зміні сталої часу.

Для підтримання стабільності коефіцієнта передачі  $K_{\text{П}}$  всього джерела, можуть бути використані структури з оберненим перетворенням



вихідної величини у вхідну [47, 67]. Такі структурні схеми застосовуються в прецизійних стабілізаторах періодичного сигналу (ПСПС) [68], для яких аналіз та оцінка точності виконані в роботах [47,65]. Для застосування цих джерел, вимагаються високоточні ВМІ миттєвих значень, серійний випуск яких відсутній.

В ПДЗМП з замкненими структурними схемами, в яких використовується порівняння з сигналами зразкових перетворювачів для автоматичної корекції похибки відтворення, досягається більш висока точність формування квазіпрямокутної та трапецієдальної форми ЗМП [46, 69]. На рис. 2.7а наведена функціональна схема такого джерела.

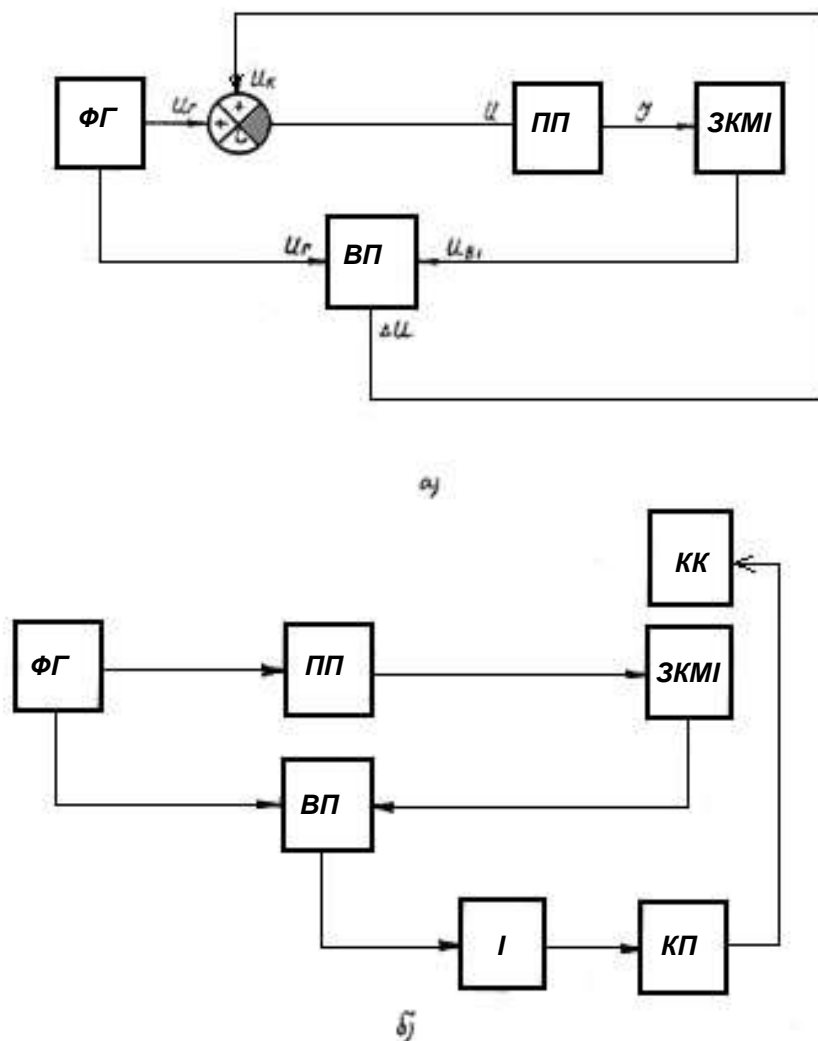


Рис. 2.7. а – ПДЗМП з замкненою структурною схемою, в якому використовується порівняння з сигналами зразкових перетворювачів для автоматичної корекції похибки відтворення; б – ПДЗМП з автоматичною корекцією

Сигнал  $U_{\Gamma}$  з функціонального генератора (ФГ), через суматор  $C$ , надходить на ПП, струм  $I$  якого, протікаючи в ЗКМІ, створює МП  $B$ . Але, через те, що форма відтвореної магнітної індукції  $B(t)$  відрізняється від форми сигналу, що заданий,  $U_{\Gamma}(t)$  ФГ, використовується ланцюг струмової корекції (СКЛ). На віднімаючий пристрій (ВП) з ФГ та ЗКМІ надходять сигнали  $U_{\Gamma}$  та  $U_B$ . Інвертований різницевий сигнал потрапляє в суматор. Сумарний сигнал  $U_1$  надходить в ЗКМІ, де формується необхідна форма магнітної індукції. Проте, через часову неузгодженість при додаванні сигналів  $U_{\Gamma}$  та  $U_K$ , існує невиключена похибка форми, яка зменшується за допомогою фазорегулюючого блоку (ФРБ), включеного в корегувальний ланцюг.

В таких ПДЗМП вдається знизити похибку відтворення трапецеїдальної форми до 2,5-3% [69].

Прийнятну точність, близько 1 – 2%, дає і полекорегуючий метод (ПКМ), який використовується в ПДЗМП з автоматичною корекцією (рис. 2.7,б). Відмінність від попереднього принципу побудови полягає в тому, що в полекорегуючому ланцюзі (ПКЛ) різницевий сигнал підсилюють корегуючим підсилювачем (КП) та подають в котушку компенсації КК, поле якої корегує форму результуючого поля.

Проте, більшу перспективу мають прецизійні джерела, що здійснюють автоматичну корекцію похибок відтворення форми ЗМП, шляхом порівняння з опорними сигналами та які реалізують експоненціально-ступінчасту або лінійну апроксимацію необхідної кривої.

На рис. 2.8 ілюструється блок-схема такого джерела. Цифровий функціональний генератор (ЦФГ) формує ступінчастий вихідний сигнал  $U$  з відповідним законом зміни апроксимованої кривої. Цей сигнал надходить на підсилювач П, в ланцюг від'ємного ЗЗ якого включена ЗКМІ. Магнітна індукція, яку утворює ЗКМІ, виражається рівнянням (1.1).

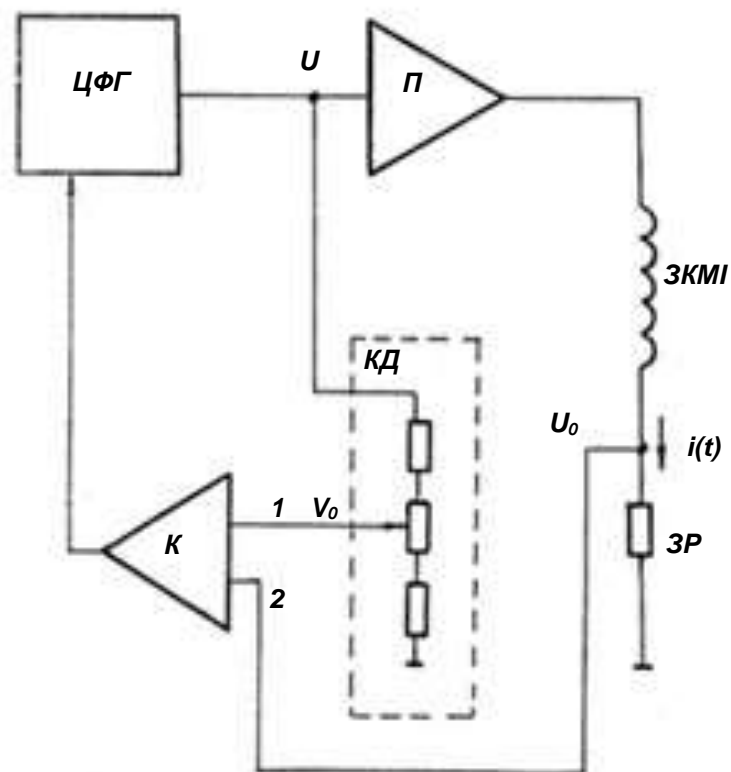


Рис. 2.8. Прецизійні джерела з автоматичною корекцією похибок відтворення форми ЗМП, шляхом порівняння з опорними сигналами

Пропорційно струму  $i(t)$ , що протікає по котушці, змінюється напруга  $U(t)$  на зразковому резисторі (ЗР)  $R_0$ . При досягненні рівності  $U_0$  з опорною напругою коригуючого дільника (КД)  $V_0$ , спрацьовує компаратор (К) та переводить ЦФГ на формування наступної ланки апроксимованої кривої  $B_n$ . Так як крок зміни струму  $i(t)$  вибирається на квазілінійних ділянках експоненціально зростаючої кривої (рис. 2.9), то забезпечується квазілінійна апроксимація потрібного закону зміни ЗМП  $B(t)$ . Похибка відтворення  $B(t)$  такого ПДЗМП, в залежності від стабільності параметрів ЗКМІ, ЗР, ПД, та швидкодії компаратора, може складати 1-1,5% [70].

Подальшого підвищення точності відтворення форми ЗМП можна, в принципі, досягнути, використовуючи адаптивну апроксимацію форми МП.

З порівняльного аналізу ПДЗМП встановлено, що найбільш високою точністю відрізняються джерела з замкненою структурною схемою, які використовують порівняння зі зразковими сигналами (рис. 2.7-2.8). Такі джерела доцільно використовувати для побудови високоточних регульованих мір магнітної індукції різноманітної форми.

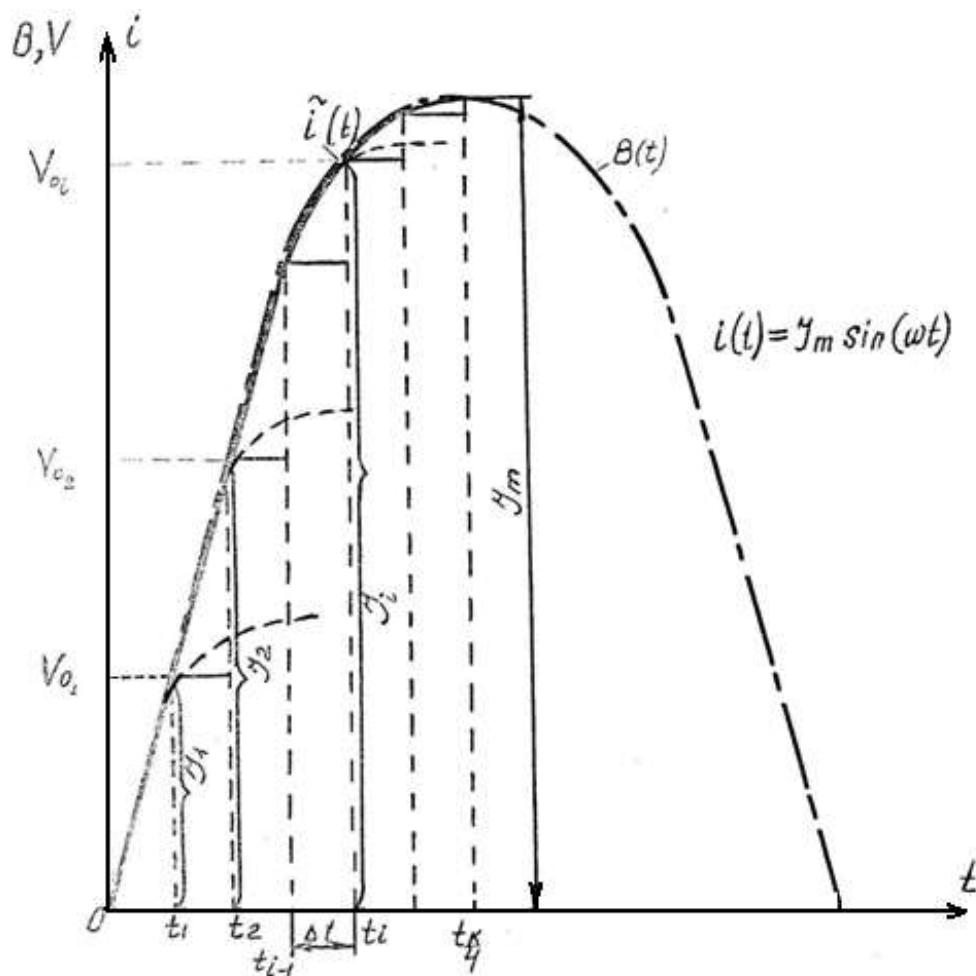


Рис. 2.9. Квазілінійна апроксимація потрібного закону зміни ЗМП  $B(t)$

## 2.2 Дослідження методів апроксимації форми змінних магнітних полів і їх порівняльна оцінка.

Серед можливих методів відтворення ЗМП різноманітних форм, найбільш перспективним є дискретний метод, через можливості

отримання різних форм магнітної індукції поля без зміни складу апаратних засобів та повної автоматизації процесу відтворення. Проте, його точність, як зазначалося вище, обмежена, як мінімально можливим кроком  $\Delta t$  дискретизації кривої магнітної індукції  $B(t)$ , так і сталою часу  $\tau$  вихідного ланцюга джерела ЗМП. До того ж, через інерційність зразкової котушки, при дискретному формуванні необхідної форми поля, зміна магнітної індукції  $B(t)$  відбувається за експоненціальним законом, повторюючи форму струму  $i(t)$  в котушці. Оцінку точності отримання необхідної форми кривої  $B(t)$  за допомогою експоненціально-ступінчастої апроксимації доцільніше, перш за все, розглянути на прикладі синусоїдального струму, бо тільки така форма, як електричного сигналу, так і МП, забезпечена засобами її нормування.

Експоненціально-ступінчаста апроксимуюча синусоїда досліджувалася в роботі [71] з урахуванням того, що сходинки апроксимуючої функції примикають одна до одної. Але в реальних пристроях вони розділені часовою паузою. Такі часові паузи виникають в реальних ланцюгах при формуванні ступінчастого сигналу за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) та обумовлені часом перемикавання ключів. При надходженні такого сигналу в лінійний активно-індуктивний (RL) ланцюг, вихідний сигнал струму  $\bar{i}(t)$  являє собою різновидність експоненціально-ступінчастої апроксимації складної форми, що описується сумою двох різних експонент.

Характер зміни струму в котушці при подачі стрибків напруги з функціонального генератора показано на рис. 2.10.

На рисунку показані:  $i_c(t)$  – крива зміни струму при ступінчастій апроксимації синусоїдальної форми;  $i_{1c}(t)$  – її перша гармоніка;  $\bar{i}(t)$  – крива зміни струму при експоненціально-ступінчастій апроксимації синусоїдальної форми;  $i_1(t)$  – перша гармоніка сформованої кривої.

Струм  $i(t)$

на першій ділянці  $t \in [t_0, t_1]$  змінюється за законом:

$$i_1(t) = I_1^0 \left( 1 - e^{-\frac{t-t_0'}{\tau}} \right), \quad (2.13)$$

де  $I_1^0$  - усталене значення струму першої сходинки;

$t_0' - t_0 = \Delta t_0'$  - тривалість тимчасової паузи.

Значення струму при  $t = t_1 = \Delta t$  визначається виразом

$$I_1 = I_1^0 \left[ 1 - e^{-\frac{(\Delta t - \Delta t_0')}{\tau}} \right], \quad (2.14)$$

де  $\Delta t$  – крок дискретизації.

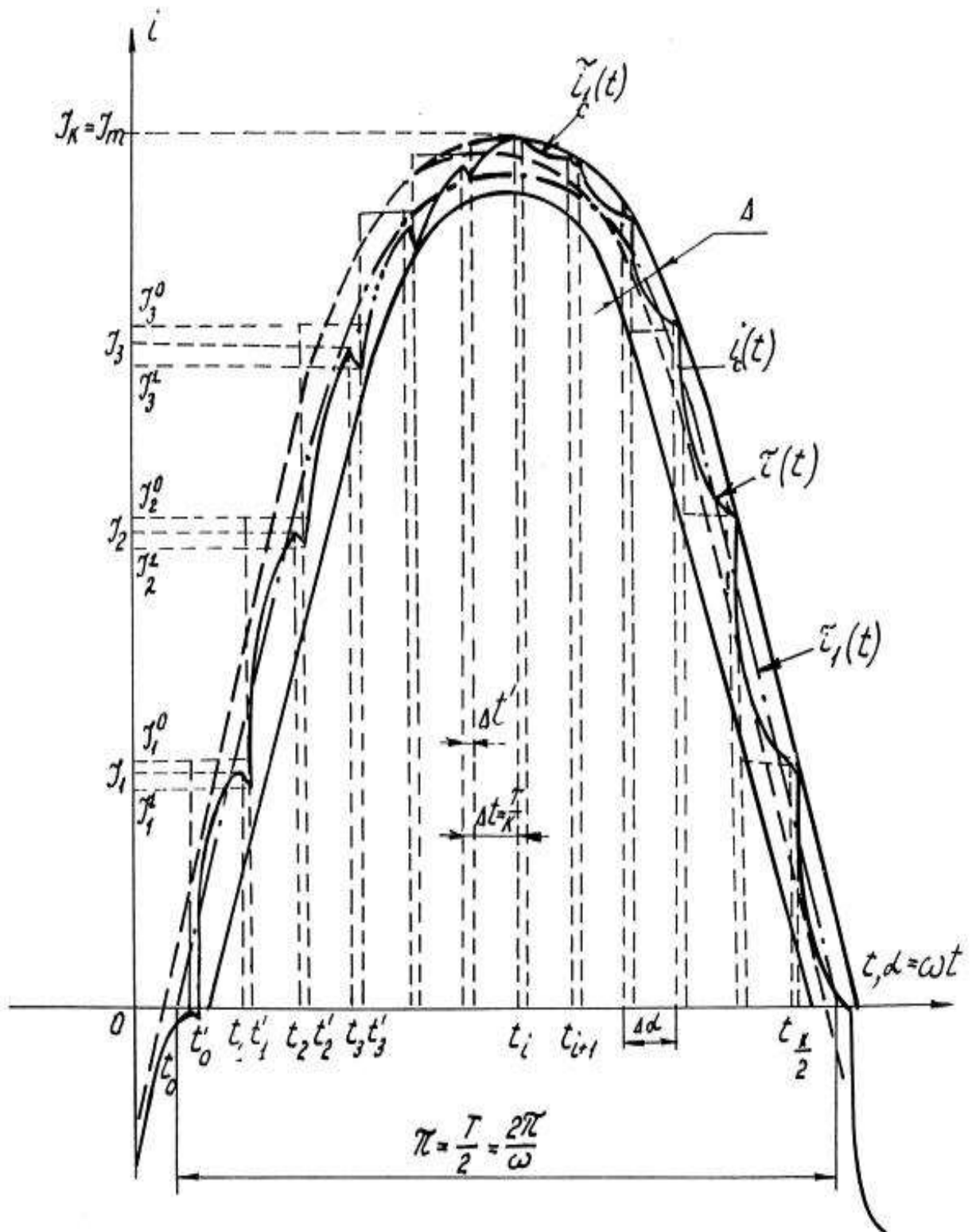


Рис. 2.10. Зміни струму в котушці при подачі стрибків напруги з функціонального генератора

На ділянці  $t \in [t_1, t_1']$

$$i_1'(t) = I_1^0 \left[ 1 - e^{-\frac{\Delta t - \Delta t_0'}{\tau}} \right] e^{-\frac{t-t_1}{\tau}}. \quad (2.15)$$

Значення струму при  $t = t_1'$ , дорівнює

$$I_1' = I_1^0 \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t - \Delta t_0'}{\tau}} \right) e^{-\frac{\Delta t_1'}{\tau}}. \quad (2.16)$$

В інтервалі  $t \in [t_1', t_2]$

$$i_2(t) = (I_2^0 - I_1') \left( 1 - e^{-\frac{t-t_1'}{\tau}} \right) + I_1' = I_2^0 \left( 1 - e^{-\frac{t-t_1'}{\tau}} \right) + I_1' \cdot e^{-\frac{t-t_1'}{\tau}}, \quad (2.17)$$

$$\text{Струм } I_2: I_2 = I_1^0 \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t - \Delta t'}{\tau}} \right) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_1}} + I_2^0 \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t - \Delta t'}{\tau}} \right), \quad (2.18)$$

при умові, що  $\Delta t' = \Delta t_0' = \Delta t_1'$ .

Струм на інтервалі  $t \in [t_2, t_2']$

$$i_2'(t) = I_2 \cdot e^{-\frac{(t-t_2)}{\tau_2}} = \left[ I_1^0 \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t - \Delta t'}{\tau}} \right) e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} + I_2^0 \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t - \Delta t'}{\tau}} \right) \right] e^{-\frac{(t-t_2)}{\tau_2}}, \quad (2.19)$$

$$I_2' = \left[ I_1^0 \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t - \Delta t'}{\tau}} \right) e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} + I_2^0 \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t - \Delta t'}{\tau}} \right) \right] e^{-\frac{\Delta t'}{\tau_2}}, \quad (2.20)$$

при  $\Delta t' = \Delta t_0' = \Delta t_1' = \Delta t_2'$ .

Введемо позначення:

$$\begin{aligned} \gamma &= e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}; \\ \gamma' &= e^{-\frac{\Delta t - \Delta t'}{\tau}}; \\ \gamma_n'(t) &= e^{-\frac{t-t_{n-1}'}{\tau}}. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Тоді струм на будь-якому  $n$  інтервалі запишеться в вигляді

$$i_n(t) = (I_n^0 - I_{n-1}') \gamma_n'(t) + I_{n-1}' = [1 - \gamma_n'(t)] \sum_{i=1}^n I_i^0 \gamma^{n-i}, \quad (2.22)$$



$$I_n = (1 - \gamma') \sum_{i=1}^n I_i^0 \gamma^{n-i}, \quad (2.23)$$

$$I'_n = (1 - \gamma') \frac{\gamma}{\gamma'} \sum_{i=1}^n I_i^0 \gamma^{n-i}, \quad (2.24)$$

де  $i=1, 2, 3, \dots, n$  - поточний номер сходинки.

При заміні тимчасових інтервалів  $\Delta t$  кутовими  $\Delta \alpha$ , значення струму на  $i$ -сходинці дорівнює

$$I_i^0 = I_m \sin i \Delta \alpha. \quad (2.25)$$

Звідси:

$$I_n = (1 - \gamma') I_m \gamma^n \sum_{i=1}^n \sin i \Delta \alpha \cdot \left( \frac{1}{\gamma} \right)^i, \quad (2.26)$$

$$I'_n = (1 - \gamma') I_m \frac{\gamma^{n+1}}{\gamma'} \sum_{i=1}^n \sin i \Delta \alpha \cdot \left( \frac{1}{\gamma} \right)^i. \quad (2.27)$$

Враховуючи рівняння з роботи [70]

$$\sum_{n=1}^N r^n \sin nx = r \frac{\sin x - r^N \sin(N+1)x + r^{N+1} \sin Nx}{1 - 2r \cos x + r^2}.$$

Прийнявши позначення:  $r = \frac{1}{\gamma}$ ,  $i = n$  та, перемноживши

співмножники, отримаємо

$$I_n = \frac{(1 - \gamma') I_m [\sin n \Delta \alpha + \gamma^{n+1} \sin \Delta \alpha - \gamma \sin(n+1) \Delta \alpha]}{1 + \gamma^2 - 2\gamma \cos \Delta \alpha}, \quad (2.28)$$

$$I'_n = \frac{(1 - \gamma') \frac{\gamma}{\gamma'} I_m [\sin n \Delta \alpha + \gamma^{n+1} \sin \Delta \alpha - \gamma \sin(n+1) \Delta \alpha]}{1 + \gamma^2 - 2\gamma \cos \Delta \alpha}. \quad (2.29)$$

Так як  $\gamma < 1$ , то  $\gamma^n \rightarrow 0$  і значення струму на ділянках дорівнює

$$I_n = \frac{(1 - \gamma') I_m [\sin n \Delta \alpha - \gamma \sin(n+1) \Delta \alpha]}{1 + \gamma^2 - 2\gamma \cos \Delta \alpha}, \quad (2.30)$$

$$I'_n = \frac{(1 - \gamma') \frac{\gamma}{\gamma'} I_m [\sin n \Delta \alpha - \gamma \sin(n+1) \Delta \alpha]}{1 + \gamma^2 - 2\gamma \cos \Delta \alpha}. \quad (2.31)$$

Абсолютна похибка відтворення форми для будь-якого моменту часу може бути визначена з наступних виразів:

$$\Delta_i(t) = i_n(t) - i(t) = \sum_{i=1}^n \left\{ I_i^0 \gamma^{n-1} [1 - \gamma'_n(t)] - I_m \sin i \frac{2\pi}{K\Delta t} \cdot t \right\}, \quad (2.32)$$

$$t \in (t_{i-1} \div t_i)$$

$$\Delta'_i(t) = \sum_{i=1}^n \left\{ I_i^0 \gamma^{n-1} \frac{\gamma}{\gamma'} [1 - \gamma'_n(t)] - I_m \sin i \frac{2\pi}{K\Delta t} \cdot t \right\}, \quad (2.33)$$

$$t \in (t \div t')$$

де  $K$  – кількість ділянок дискретизації за період  $T$ .

Максимальне середньоквадратичне значення абсолютної похибки відтворення форми за період, дорівнює

$$\delta_a = \sqrt{\frac{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \dots + \Delta_n^2}{K}}, \quad (2.34)$$

а максимальне середньоквадратичне значення відносної похибки відтворення форми

$$\delta_B = \sqrt{\frac{\left(\frac{\Delta_1}{I_{1S}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_2}{I_{2S}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta_K}{I_{KS}}\right)^2}{K}}, \quad (2.35)$$

де:  $\Delta_1, \dots, \Delta_K$  - максимальне значення абсолютної похибки на кожному кроці дискретизації;

$I_{1S}, \dots, I_{KS}$  - значення струму в задані моменти часу.

Середньоквадратична похибка діючого значення сформованої кривої  $\bar{i}(t)$  визначається виразом

$$\Delta i = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [\bar{i}(t) - \bar{i}_{1c}(t)]^2 dt}, \quad (2.36)$$

де  $\bar{i}_{1c}(t)$  - перша гармоніка ступінчасто-апроксимованого синусоїдального сигналу, що описується рівнянням

$$\bar{i}_{1c}(t) = I_m \frac{\sin \frac{\Delta\alpha}{2}}{\frac{\Delta\alpha}{2}} \sin\left(\omega t - \frac{\Delta\alpha}{2}\right).$$

Таке порівняння  $\bar{i}(t)$  та  $\bar{i}_{1c}(t)$  доцільне тому, що ступінчасто-апроксимована напруга подається на КМІ, викликавши струм  $\bar{i}(t)$ . Враховуючи наближеність значень  $\bar{i}(t)$  та  $\bar{i}_{1c}(t)$ , вираз (2.36) можна представити у вигляді

$$\Delta i = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt - \frac{1}{2} I_{1m}^2}. \quad (2.37)$$

Інтеграл від  $\tau^2(t)$  дорівнює:

$$\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^{K-1} \int_{t_n}^{t_{n+1}} i_n^2(t - t_n) dt = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^{K-1} \int_0^{\Delta t} i_n^2(t) dt. \quad (2.38)$$

З урахуванням рівняння (2.22) та заміни інтегралу сумою, отримаємо

$$\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt = \frac{1}{T} \cdot \left. \begin{aligned} & \left[ \frac{\tau}{2} \left[ \left( \frac{\gamma}{\gamma_1} \right)^2 - \gamma'^2 \right] \sum_{n=0}^{K-1} I_{n-1}'^2 + \tau \left[ 2 \left( \frac{\gamma}{\gamma'} - \gamma' \right) - \left( \frac{\gamma^2}{\gamma'^2} - \gamma'^2 \right) \right] \sum_{n=0}^{K-1} I_i^0 I_{i-1}' + \right. \\ & \left. + \left[ \Delta t - 2\tau \left( \frac{\gamma}{\gamma'} - \gamma' \right) + \frac{\tau}{2} \left( \frac{\gamma^2}{\gamma'^2} - \gamma_1'^2 \right) \right] \sum_{n=0}^{K-1} I_i^{02} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2.39)$$

Позначимо:

$$q = \frac{\tau}{2} \left( \frac{\gamma^2}{\gamma'^2} - \gamma'^2 \right); \quad (2.40)$$

$$q_2 = \tau \left[ 2 \left( \frac{\gamma}{\gamma'} - \gamma' \right) - \left( \frac{\gamma^2}{\gamma'^2} - \gamma'^2 \right) \right]; \quad (2.41)$$

$$q_3 = \left[ \Delta t - 2\tau \left( \frac{\gamma}{\gamma'} - \gamma' \right) + \frac{\tau}{2} \left( \frac{\gamma^2}{\gamma'^2} - \gamma'^2 \right) \right]. \quad (2.42)$$

Розкриємо суми:

$$\sum_{n=0}^{K-1} I_n^{02} = I_m^2 \sum_{n=0}^{K-1} \sin^2(n\Delta\alpha) = I_m^2 \cdot \frac{K}{2}, \quad (2.43)$$

$$\sum_{n=0}^{K-1} I_{n-1}'^2 = \frac{(1 - \gamma')^2 \left( \frac{\gamma}{\gamma'} \right)^2 I_m \cdot K}{2(1 + \gamma^2 - 2\gamma \cos \Delta\alpha)}, \quad (2.44)$$

$$\sum_{n=0}^{K-1} I_n^0 I'_{n-1} = \frac{(1-\gamma') \frac{\gamma}{\gamma'} I_m^2 \cdot K (\cos \Delta\alpha - \gamma)}{2(1+\gamma^2 - 2\gamma \cos \alpha)}. \quad (2.45)$$

Тоді

$$\frac{1}{T} \int_0^T \ddot{i}^2(t) dt = \frac{1}{T} \left\{ \begin{aligned} & \frac{\tau}{2} (1-\gamma^2) \left( \frac{\gamma}{\gamma'} \right)^2 \frac{(1-\gamma')^2 \left( \frac{\gamma}{\gamma'} \right)^2 I_m^2 \cdot K}{2(1+\gamma^2 - 2\gamma \cos \Delta\alpha)} + \\ & + \tau \left[ \left( 1 - \frac{\gamma^2}{\gamma'} \right)^2 - \left( 1 - \frac{\gamma}{\gamma'} \right)^2 \right] \cdot \frac{(1-\gamma') \frac{\gamma}{\gamma'} \cdot I_m \cdot K (\cos \Delta\alpha - \gamma)}{2(1+\gamma^2 - 2\gamma \cos \Delta\alpha)} + \\ & + \left[ \Delta t - 2\tau \frac{\gamma}{\gamma'} (1-\gamma) + \frac{\tau}{2} \left( \frac{\gamma}{\gamma'} \right)^2 (1-\gamma^2) \right] I_m^2 \cdot \frac{K}{2} \end{aligned} \right\} \quad (2.46)$$

Підсумовуючи складові, позначивши  $\theta = \frac{\Delta t}{\tau}$  і, з урахуванням того,

що

$$\begin{aligned} K &= \frac{T}{\Delta t}, \\ \tau K &= \frac{1}{\theta} T, \\ \gamma &= e^{-\theta}, \end{aligned}$$

Отримаємо

$$\frac{1}{T} \int_0^T \ddot{i}^2(t) dt = \left\{ \begin{aligned} & 1 - \frac{\gamma}{\gamma'} (1-\gamma) \left[ 2 - \frac{1}{2} \left( \frac{\gamma}{\gamma'} \right) (1+\gamma) \right] + \\ & \left( 1 - \gamma' \right) \left\{ (1-\gamma^2) \left( 1 - \gamma' \right) \left( \frac{\gamma}{\gamma'} \right)^4 + 2 \left[ \left( 1 - \frac{\gamma^2}{\gamma'} \right)^2 + \left( 1 - \frac{\gamma}{\gamma'} \right) \right] \frac{\gamma}{\gamma'} (\cos \Delta\alpha - \gamma) \right\} \\ & + \frac{\quad}{2\theta (1+\gamma^2 - 2\gamma \cos \Delta\alpha)} \end{aligned} \right\} \quad (2.47)$$

При умові  $\frac{\Delta t}{\Delta t'} > 10$  - рівняння спроститься

$$\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt = \frac{I_m^2}{2} \left\{ 1 + \frac{(1-\gamma)}{\theta} \left[ 0,5\gamma - 1,5 + \frac{(1-\gamma) \frac{\gamma}{\gamma'} (1-\gamma^2) + 2 \left[ \left(1 - \frac{\gamma^2}{\gamma'}\right)^2 + \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma'}\right) \right] (\cos \Delta\alpha - \gamma)}{2(1+\gamma^2 - 2\gamma \cos \Delta\alpha)} \right] \right\} \quad (2.48)$$

Вираз для середньоквадратичної похибки діючого значення експоненціально-апроксимованого сигналу, обчислений відносно першої гармоніки ступінчасто-апроксимованого сигналу, з урахуванням взаємозв'язку  $\gamma$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$ , має вигляд

$$\Delta I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \left\{ 1 + \frac{\tau}{\Delta t} \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right) \left[ 0,5e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} - 1,5 + \frac{\left( 1 - e^{-\frac{\Delta t - \Delta t'}{\tau}} \right) e^{-\frac{\Delta t'}{\tau}} \left( 1 - e^{-\frac{2\Delta t}{\tau}} \right) + 2 \left[ \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t - \Delta t'}{\tau}} \right)^2 + \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t'}{\tau}} \right) \right] \left( \cos \frac{2\pi}{T} \Delta t - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right)}{2 \left( 1 + e^{-\frac{2\Delta t}{\tau}} - 2e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \cos \frac{2\pi}{T} \Delta t \right)} \right] \right\} \quad (2.49)$$

$$- \frac{4 \sin^2 \left( \frac{\pi}{T} \Delta t \right)}{\left( \frac{\pi}{T} \Delta t \right)^2} \left. \right\}^{\frac{1}{2}}$$

На рис. 2.11 ілюструється графік змін цієї похибки в залежності від  $\Delta t / \tau$ . При  $\Delta t / \tau = 0,075$  середньоквадратична похибка мінімальна і дорівнює  $\Delta I = 0,0012$ . Починаючи з  $\Delta t = 0,5\tau$  та менше, експоненціально-ступінчаста апроксимація переходить в кусково-лінійну. При  $\Delta t / \tau = 5 \div 8$ , ця похибка не перевищує  $\Delta I = 0,03$ , а починаючи з  $\Delta t / \tau > 10$  різко зростає.

Середньоквадратична похибка від впливу інтервалів перемикання  $\Delta t'$  суттєво впливає лише при відношенні  $\Delta t / \Delta t' < 10$  (рис. 2.11, б).

Таким чином, експоненціально-ступінчаста апроксимація, при виборі кроку дискретизації  $\Delta t \leq 0,5\tau$ , переходить в кусково-лінійну апроксимацію початковими ділянками експонент, що забезпечує більш високу точність відтворення форми [71].

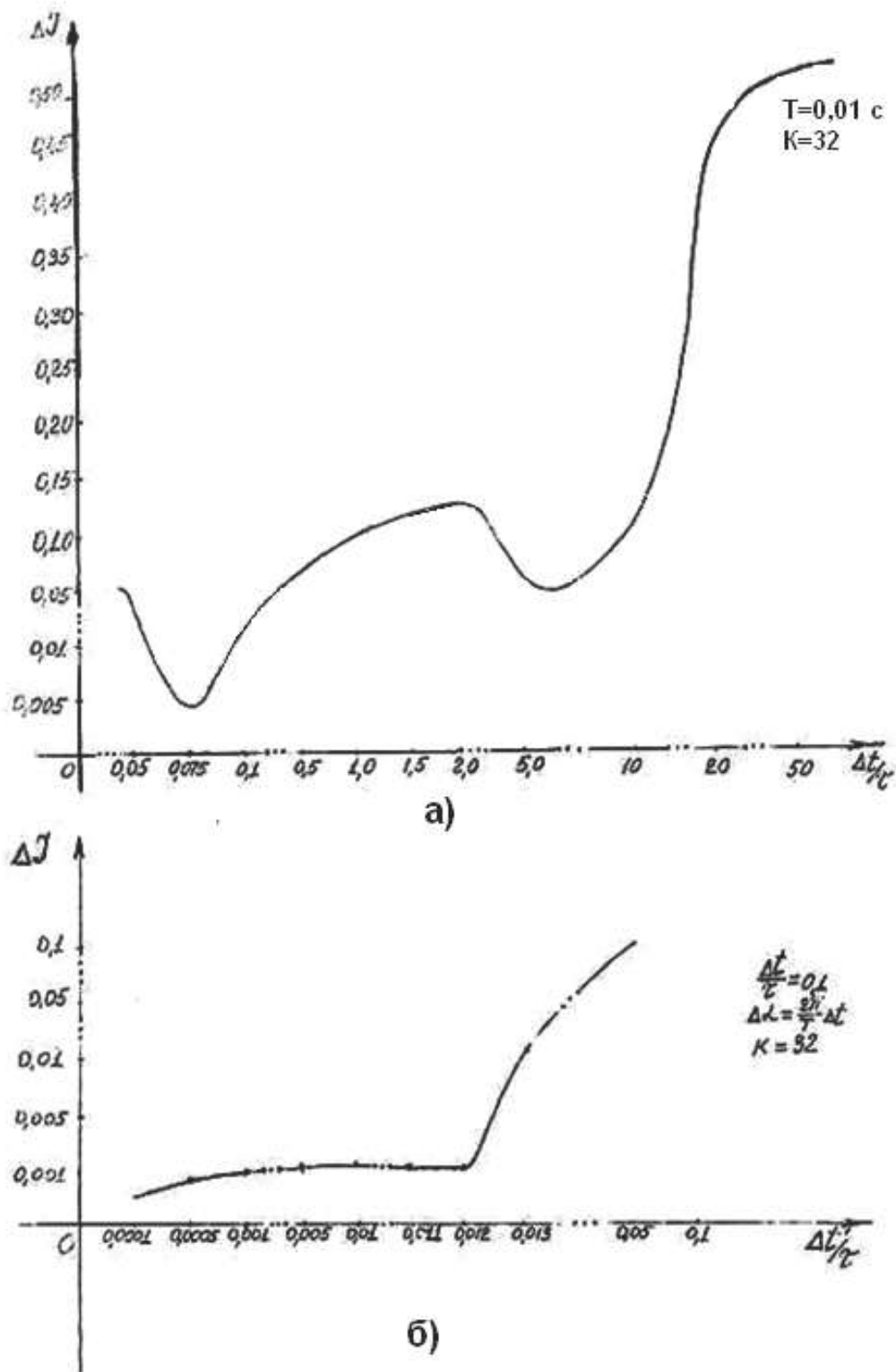


Рис. 2.11. Графік змін середньоквадратичної похибки діючого значення експоненціально-апроксимованого сигналу в залежності від  $\Delta t / \tau$

Залежність нормованого значення  $\delta_H$  середньоквадратичної похибки  $\Delta$  відтворення синусоїдальної форми від зміни тривалості кроку

дискретизації  $\Delta t$ , з урахуванням рівнянь (2.1), (2.38) та [72], має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \delta_H &= \frac{\Delta}{I_m} = \frac{I_m}{\sqrt{2}I_m(\Delta t)^2} \sqrt{\left|(\Delta t)^4 - \frac{2}{3}(\Delta t)^4 \sin^2\left(\frac{\Delta t}{2}\right) - 16\sin^4\left(\frac{\Delta t}{2}\right)\right|} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\left|1 - \frac{2}{3}\sin^2\left(\frac{\Delta t}{2}\right) - \frac{16\sin^4\left(\frac{\Delta t}{2}\right)}{(\Delta t)^4}\right|}. \end{aligned} \quad (2.50)$$

Мінімальне значення  $\delta_H$  досягається при виборі тривалості кроку дискретизації, рівного

$$\Delta t_e = \frac{\Delta t}{2}. \quad (2.51)$$

При апроксимації різних форм ЗМП, виникає необхідність оцінити похибку наближення ділянок експоненти  $f_e(t)$  до лінії  $f_L(t)$ , в залежності від тривалості кроку дискретизації. Абсолютна похибка наближення  $\Delta$  дорівнює

$$\Delta = f_e(t) - f_L(t) = \Delta I_K \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) - K_1 \cdot t = 0, \quad (2.52)$$

при умові, що

$$f_L(0) = f_e(0), \text{ та } f_L(\Delta t) = f_e(\Delta t), \quad (2.53)$$

$\Delta I_K$  - усталене значення експоненціальної кривої;

$K_1$  – коефіцієнт пропорційності (тангенс кута нахилу лінії), дорівнює

$$K_1 = \Delta I_K \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}\right) \frac{1}{\Delta t}.$$

Тоді

$$\begin{aligned} \Delta &= \Delta I_K \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) - \Delta I_K \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}\right) \cdot \frac{t}{\Delta t} \\ t &\in [0, \Delta t]. \end{aligned} \quad (2.54)$$

Оцінимо дану похибку, віднесену до значення  $\Delta I_K$  - при різному відношенні  $\varepsilon = \frac{\Delta t}{\tau}$ , для випадку  $t = \frac{\Delta t}{2}$

$$\delta_{\mathcal{L}} = \frac{1}{2} - e^{-\frac{\varepsilon}{2}} + \frac{1}{2} e^{-\varepsilon}, \quad (2.55)$$

де  $\delta_{\mathcal{L}}$  - відносна похибка наближення ділянок експоненти до лінії.

На рис. 2.12 представлені графіки змін цієї похибки  $\delta_{\mathcal{L}} = f(\varepsilon)$ .

Для різноманітних  $t$  в інтервалі  $[0, \Delta t]$  та  $0,01 \leq \frac{t}{\tau} \leq 1$  відносна похибка

наближення  $\delta_{\mathcal{L}}$  змінюється незначно, а при  $\frac{t}{\tau} \geq 1$  - різко зростає.

При кусково-лінійній апроксимації ділянками кривої другого порядку коливального режиму струму  $i(t)$  в котушці, перший викид якого відбувається в момент

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n} \sqrt{1 - \xi^2},$$

де  $\omega_n$  – власна частота коливань;  $\xi$  - коефіцієнт згасання. Оптимальне значення кроку дискретизації  $\Delta t \in (2,8 - 3,5)\tau$  з точки зору максимуму динамічного діапазону та відповідності піку  $I_{mp}$  [73].

З точки зору швидкодії і з урахуванням складності нормування, оптимальні значення кроку дискретизації знаходяться в діапазоні  $0,1\tau \leq \Delta t \leq 2,5\tau$ , так як на початковій ланці кривої і біля максимуму першого викиду є велика крутизна перегинів.

При використанні кусково-лінійної апроксимації різноманітних форм ЗМП квазілінійними ділянками експоненти, довірчий інтервал  $\Delta$  буде мінімальним,  $\Delta \leq 0,005$  при виборі тривалості кроку  $\Delta t$  дискретизації в межах  $\Delta t \leq 0,2\tau$ .



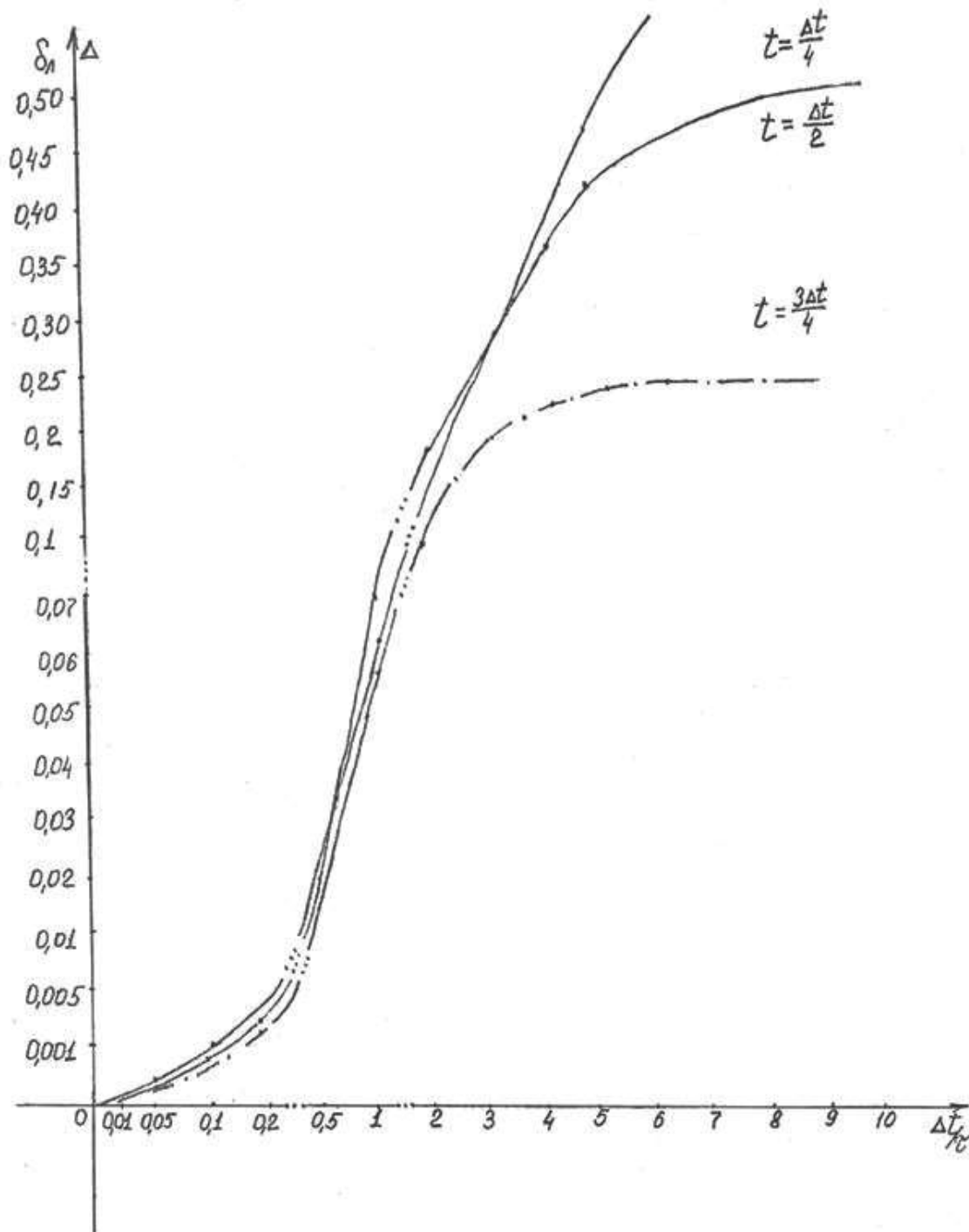


Рис. 2.12. Графіки змін відносної похибки наближення ділянок експоненти до лінії

Отже, на підставі порівняльного аналізу і досліджень методу дискретного відтворення необхідних форм ЗМП, при різних методах апроксимації показано, що найменша методична похибка апроксимації при заміні оптимальних лінійних ділянок квазілінійними експоненціальними ділянками, досягається при  $0,01\tau \leq \Delta t \leq 0,2\tau$ . Мінімальна середньоквадратична похибка діючого значення

оптимально-апроксимованої

синусоїди, досягається при виборі тривалості кроку дискретизації  $\Delta t = 0,005\tau$ . При цьому дана похибка становить тисячні долі відсотка.

Середньоквадратична похибка апроксимації синусоїдальної періодичної

функції, при співвідношенні:  $\frac{\Delta t}{\tau} \leq 0,5$ ;  $K = 32$ ;  $\frac{\Delta t}{\tau} \leq 0,45$  і  $K = 64$  -

складає  $\delta_{an} \leq 0,5\%$ , а при  $K=128$ , зменшується до  $\delta_{an} \leq 0,2\%$ .

Для різноманітних форм ЗМП, використовуючи експоненціально-ступінчасту та кусково-лінійну апроксимації можна здійснити адаптивну апроксимацію необхідної форми ЗМП за критерієм мінімальної абсолютної похибки відновлення даної форми.

Таким чином, оптимальні значення кроку дискретизації  $\Delta t$  з точки зору точності та швидкодії, знаходяться в діапазоні  $0,1 \leq \tau \leq 0,2\tau$ . Але при цьому звужується динамічний діапазон відтворення магнітної індукції ЗМП.

### **2.3 Шляхи розширення частотного діапазону прецизійних джерел змінних магнітних полів.**

В розроблюваних ПДЗМП з дискретним відтворенням необхідної форми магнітної індукції  $B(t)$ , верхня межа частотного діапазону повністю визначається сталою часу  $\tau$  вихідного ланцюга джерела і багато в чому залежить від конструкції та параметрів ЗКМІ. Тому, ЗКМІ, розраховану на отримання високо однорідного МП з заданим максимальним значенням індукції  $B_{\max}$ , прагнуть конструювати з мінімальною сталою часу  $\tau_0$ . Суттєвого зниження  $\tau_0$  можна досягти за рахунок включення ЗКМІ в ланцюг негативного зворотнього зв'язку (НЗЗ). На рис. 2.13 приведено еквівалентну схему вихідного ланцюга ПДЗМП з НЗЗ.

ФГ формує ступінчастий вихідний сигнал  $\Delta U_{n_{\lambda 0}}$ . Цей сигнал подається на вхідні ланцюги підсилювального каскаду П, в ланцюг ЗЗ якого включена ЗКМІ.

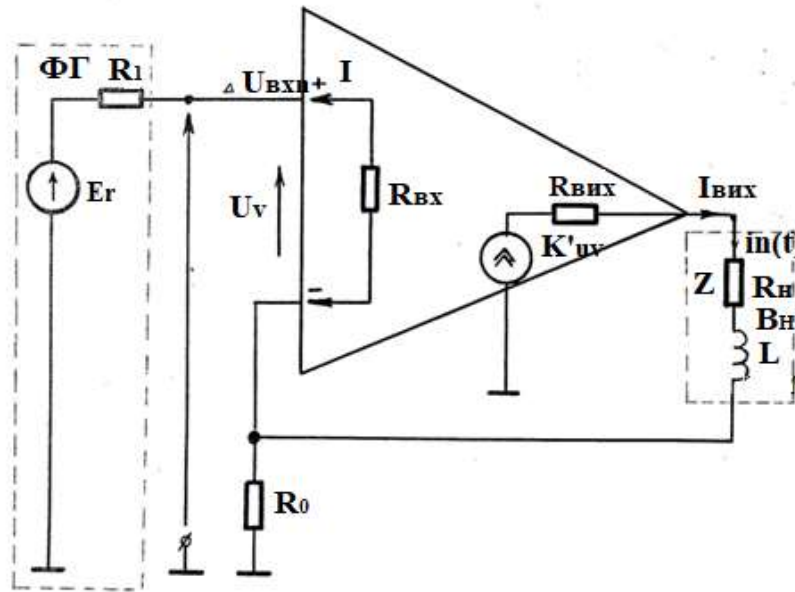


Рис. 2.13. Еквівалентна схема вихідного ланцюга ПДЗМП з НЗЗ

При подачі напруги  $\Delta U_{n_{BX}}$ , магнітна індукція, що створюється котушкою, виражається наступним рівнянням:

$$B_n(t) = K_B \cdot i_n(t) = \frac{K_B \cdot K_u \cdot R_3 \cdot \Delta U_{n_{BX}} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}\right)}{(R_{вих} + R_n)(R_3 + R_{вх} + R_1) + R_3(R_{вх} + R_1) + K_u R_3 R_{вх}}, \quad (2.56)$$

де  $K_u$  - коефіцієнт підсилення;

$\Delta U_{n_{BX}}$  - стрибок напруги в фіксований момент часу на виході функціонального генератора;

$R_3$  - опір зразкового резистора;

$R_{вх}$ ,  $R_{вих}$  - вхідний та вихідний опір підсилювального каскаду;

$R_n$ ,  $L$  - активний опір та індуктивність зразкової котушки;

$\Delta t$  - тривалість стрибка напруги;

$\tau$  - стала часу джерела.

При умові, що значення набагато більше 1,  $K_u \beta_n \beta_I \gg 1$ , рівняння (2.56) спроститься:

$$B_n(t) = \frac{K_B \cdot \Delta U_{n_{BX}}}{\beta_I \cdot \beta_n} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}\right), \quad (2.57)$$

де  $\beta_n$  - коефіцієнт перетворення в ланцюзі позитивного ЗЗ, дорівнює:

$$\beta_n = \frac{R_3}{R_H + R_{ex} + R_3} \cdot \frac{1}{R_{ex}};$$

$\beta_l$  - коефіцієнт НЗЗ за струмом, дорівнює:

$$\beta_l = \frac{R_3}{R_3 + R_H + R_{ex}}.$$

Остаточно вираз (2.57) матиме вигляд

$$B_n(t) = K_B \cdot K_{u-l} \cdot \Delta U_{n_{BX}} \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right), \quad (2.58)$$

де  $K_{u-l}$  - коефіцієнт перетворення напруги в струм, що дорівнює:

$$K_{u-l} = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_l \beta_n}.$$

Оцінимо зміну сталої часу  $\tau$  в замкненій структурній схемі ПДЗМП, охопленій НЗЗ. Передатну функцію прямого ланцюга ПДЗМП можна записати у вигляді [73]:

$$W_n(j\omega) = \frac{K_n}{1 + j\omega\tau_0}, \quad (2.59)$$

де  $K_n$  - коефіцієнт перетворення прямого ланцюга, що дорівнює

$$K_n = K_B \cdot K_u ;$$

$\tau_0$  - її стала часу, що дорівнює

$$\tau_0 = \frac{L}{R_H}.$$

З урахуванням НЗЗ вигляд її не зміниться, тільки зменшиться на глибину ЗЗ значення величин, що входять в формулу (2.59), тобто

$$W(j\omega) = \frac{K}{1 + j\omega\tau},$$

де  $K$  – коефіцієнт передачі замкненого ПДЗМП, що дорівнює

$$K = \frac{K_n}{1 + K_n\beta};$$

$\tau$  – стала часу вихідного ланцюга замкненого ПДЗМП, що дорівнює

$$\tau = \frac{\tau_0}{1 + K_n\beta}. \quad (2.60)$$

Таким чином, стала часу  $\tau_0$ , при включенні ЗКМІ в ланцюг НЗЗ за струмом, зменшується в  $(1 + K_n\beta)$  раз [73].

Подальше розширення частотного діапазону ПДЗМП, не знижуючи точності відтворення ЗМП, можливе за рахунок зменшення кроку дискретизації. В розділі 2.2 описано спосіб відтворення ЗМП, заснований на реалізації практично ступінчастої апроксимації, що обумовлює крок дискретизації не менше  $\Delta t = (5 - 10)\tau$ . Використання ступінчастої апроксимації є поки єдиною можливістю для нормування необхідної форми ЗМП за ПМП, оскільки відомі методи метрологічної повірки джерел несинусоїдальних полів або неприйнятні для нормування форми ЗМП, або важко реалізуються на існуючій апаратурі. Проте частотний діапазон таких ПДЗМП суттєво обмежений. Для його розширення пропонується використовувати лінійну апроксимацію, яка отримується за допомогою початкових ланок експонент, що дозволить значно зменшити тривалість кроку дискретизації, в порівнянні з експоненціально-ступінчастою апроксимацією. До того ж, підвищиться точність відтворення форми ЗМП. Але, з іншого боку, це знижує коефіцієнт корисної дії джерела, та ускладнює процес нормування. На рис. 2.14 зображена функціональна схема ПДЗМП з реалізацією лінійної апроксимації. Сигнал, з цифрового ФГ, що складається з: генератора опорних частот (ГОЧ), лічильника (Лч), перепрограмувального постійного запам'ятовуючого пристрою (ППЗП), регістру (Р), джерела опорної напруги (ДОН) і ЦАП, надходить, через підсилювач потужності (П), на ЗКМІ та на зразковий керований дільник (КД) напруги.

Частина напруги  $V_0$  з КД прикладена до першого входу компаратора (К). В ЗКМІ відтворюється МП, індукція якого пропорційна значенню струму, що протікає  $i(t)$  (2.1).

Струм  $i(t)$  утворює падіння напруги  $u_0(t)$  на зразковому резисторі (ЗР). Ця напруга надходить на другий вхід К. Струм  $i(t)$  змінюється за експоненціальним законом при надходженні на вхід підсилювача стрибка напруги  $\Delta U_{ex_n}(t)$  і описується рівнянням (2.5). Пропорційно струму  $i(t)$ , змінюється і напруга  $u_0(t)$  на зразковому резисторі (ЗР). При досягненні напругою  $u_0(t)$  рівня  $V_0$  (рис. 2.9), спрацьовує К. Вихідним сигналом К запускається ГОЧ, який представляє собою генератор

одиначних імпульсів. Змінюється стан Лч і з ППЗП, зчитується нове значення коду, що приводить до зміни стану Р. На керовані входи ЦАП надходить нова кодова комбінація і на його виході з'являється нове значення аналогового сигналу  $\Delta U_{ex_n}(t)$ . Ця напруга надходить на П і КД. З виходу підсилювача, підсилений сигнал діє на зразкову котушку, де і відтворюється наступне значення апроксимованої форми МП [74].

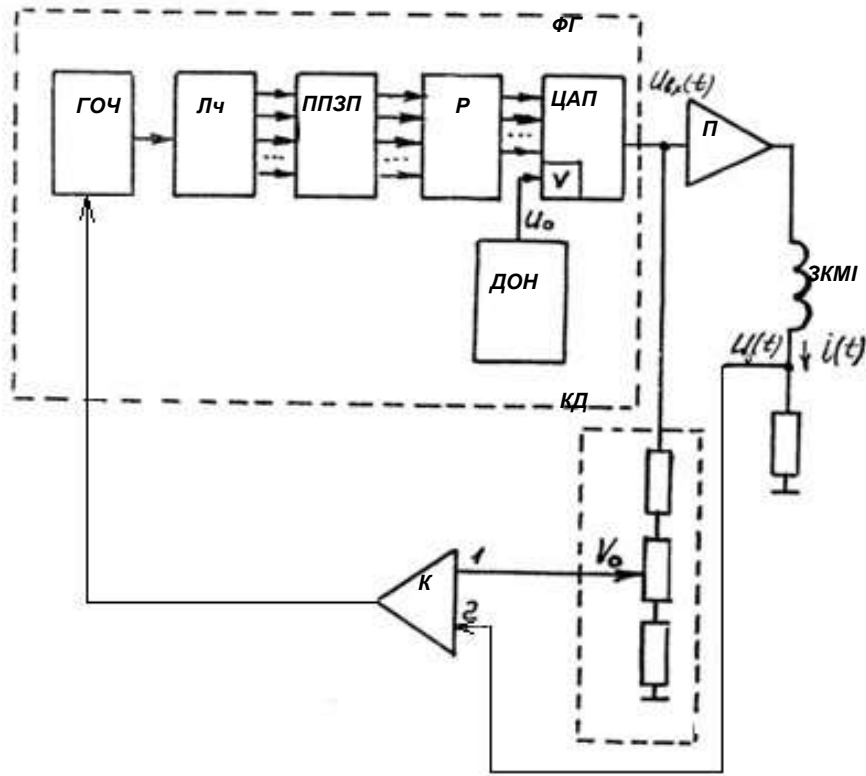


Рис. 2.14. Функціональна схема ПДЗМП з реалізацією лінійної апроксимації

В якості апроксимуючого відрізка вибирають квазілінійну ділянку експоненціально зростаючої кривої і визначають її рівень. Пропорційно цьому рівню, обирається і встановлюється, керована дільником, опорна напруга  $V_{0_n}$ , що подається на перший вхід К.

На рис. 2.15 ілюструється залежність відношення значень магнітної індукції сходинок  $B_c$  в точках дискретизації до їх усталеного значення

$B_y$ , від відношення  $\frac{\Delta t}{\tau}$ , тобто :

$$\frac{B_c}{B_y} = f\left(\frac{\Delta t}{\tau}\right).$$

Необхідна точність відтворення різноманітних форм ЗМП досягається шляхом вибору квазілінійної ділянки експоненціальної кривої

в межах  $\frac{\Delta t}{\tau} = 0,1 - 0,4$ . Так, при цьому, похибка відтворення ЗМП синусоїдальної форми складає 0,1 – 2,5% , а діапазон частот, тільки за рахунок скорочення кількості ділянок дискретизації, збільшиться в 90 разів, що виходить з формули (2.10).

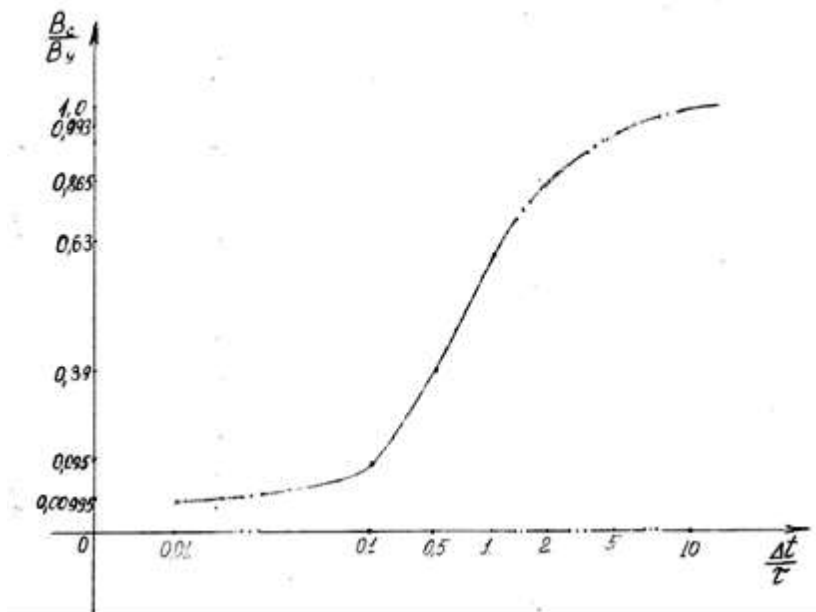


Рис. 2.15. Залежність відношення значень магнітної індукції сходинки  $B_c$  в точках дискретизації до їх усталеного значення  $B_y$ , від відношення  $\Delta t / \tau$

Розширення частотного діапазону ПДЗМП можливо за допомогою використання апроксимованих ділянок більшої крутизни, ніж початкові ділянки експонент. Цей шлях пов'язаний зі створенням зразкової котушки коливального режиму струму. Навантаження такого прецизійного джерела представляє собою паралельний коливальний контур (рис. 2.16).

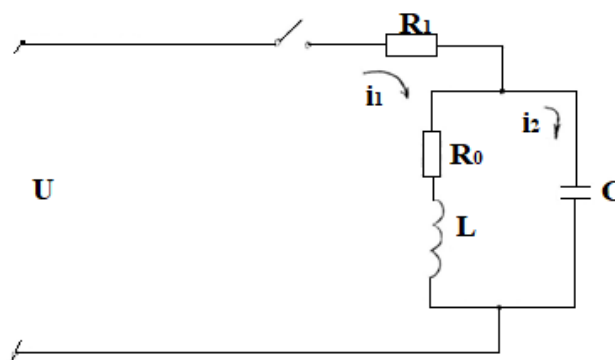


Рис. 2.16. Паралельний коливальний контур прецизійного джерела

На основі методу багатоконтурних схем [75], повний струм в ЗКМІ для першого кроку дискретизації запишеться у вигляді

$$i_1(t) = \frac{u}{R_a + R_u} - (A \cos bt + B \sin bt) e^{-at}, \quad (2.61)$$

де:  $a$ ,  $b$  – дійсна та уявна частини коренів диференціальних рівнянь, які дорівнюють:

$$a = \frac{R_a R_u C + L}{2R_u LC}, \quad b = \frac{R_a R_u C - L}{2R_u LC}, \quad \text{при } R_a \gg R_u;$$

$R_a$ ,  $R_b$  – активні опори ЗКМІ та нерозгалуженого ланцюга джерела;

$A$ ,  $B$  – сталі інтегрування, що дорівнюють:

$$A = -\frac{u}{R_a + R_u}, \quad B = \frac{\frac{u}{L} \left[ 1 + \frac{R_a R_u C + L}{2C(R_a + R_u)} \right]}{\frac{R_a R_u C - L}{2R_u LC}}.$$

Взявши першу похідну від виразу (2.61) та, прирівнявши її до нуля, визначимо час, продовж якого струм  $i_1(t)$  досягає максимального значення

$$t_{\max_1} = \frac{1}{b} \operatorname{arctg} \frac{bB - aA}{aB + bA} = \frac{1}{b} \operatorname{arctg} \frac{1}{\frac{a}{b} \left[ 1 - \tau_a \left( a + \frac{b^2}{a} \right) \right]}, \quad (2.62)$$

де:  $\tau_a$  – стала часу активно-індуктивного вихідного ланцюга, яка дорівнює  $\tau = L / (R_a + R_u)$ ;  $b$  – частота власних коливань контуру  $b = \omega_0$ ;  $a$  – обернена величина постійної часу контуру, тобто

$$a = \frac{1}{\tau_K},$$

де

$$\tau_K = \frac{2\tau_0\tau_c}{\tau_c + \tau_0}, \quad (2.63)$$



$\tau_0 = \frac{1}{R_a}$  - стала часу ЗКМІ,  $\tau_c = CR_u$  - стала часу ланцюга  $R_u C$ .

Розкривши значення арктангенсу [50], отримаємо

$$t_{\max_1} = \frac{1}{b} \sqrt{1 + \left\{ \frac{b}{a \left[ 2 - 2\tau a - \frac{R_a}{a(R_a + R_u)CR_u} \right]} \right\}^2}. \quad (2.64)$$

Виконавши перетворення, остаточно отримаємо:

$$t_{\max_1} = \frac{\tau_K}{2\sqrt{1 - a \left( 2R_u C - aCL - \frac{CR_u}{2abCL + 1} \right)}} = \frac{\tau_K}{2\sqrt{1 - \xi^2}}, \quad (2.65)$$

де  $\xi$  - коефіцієнт затухання, який дорівнює:

$$\xi = \sqrt{a \left( 2\tau_c - \frac{a}{\omega_0^2} - \frac{\tau_c}{\frac{2ab}{\omega_0^2} + 1} \right)}. \quad (2.66)$$

Отже, значення відрізка часу  $\Delta t$ , при якому досягається перше екстремальне значення струму в ланцюзі ЗКМІ, можна визначити з рівняння (2.65). Так рівняння струму для замкненого контуру, при коефіцієнті затухання  $0 < \xi < 1$ , має вигляд [76, 77]

$$i_{\text{вих}_K}(t) = I \left( 1 - e^{-\frac{\xi \omega_n t}{\sqrt{1 - \xi^2}}} \right) \sin \left( \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \cdot t + \arctg \xi \right), \quad (2.67)$$

де:  $I$  – усталене значення струму;

$\omega_n = \sqrt{\omega_1 \omega_c}$  - власна частота коливального вихідного ланцюга;

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  - резонансна частота навантажувального контуру;

$\omega_1$  - гранична частота підсилення підсилувального каскаду;

$\xi$  - коефіцієнт затухання.

Порівнюючи значення струму в активно-індуктивному навантаженні в контурі (2.67), для  $t = \tau$ , отримаємо

$$0,63 = \left( 1 - e^{-\frac{\xi \omega_n t}{\sqrt{1-\xi^2}}} \right) \sin \left( \omega_n \sqrt{1-\xi^2} \cdot t - \arctg \xi \right). \quad (2.68)$$

Розв'язуючи рівняння (2.68) чисельним методом половинного ділення при  $\xi = 0,1$ , знаходимо  $t = 0,3\tau$ , тобто для отримання одного і того ж значення струму, крок дискретизації може бути зменшений більш ніж в 3 рази, а при одному і тому ж кроці  $\Delta t = \tau$ , досягається більш ніж дворазове збільшення струму (рис.2.17).

На співвідношеннях (2.65) та (2.68) базується новий спосіб створення дискретного ЗМП з використанням коливального режиму струму в ЗКМІ, при подачі стрибка напруги в навантаження. Крок дискретизації визначається часом  $t_{\max}$ , згідно з залежністю (2.65). З порівняння рівнянь (1.10) та (2.65) видно, що при такому способі розширюється частотний діапазон ПДЗМП більш ніж у 20 разів, а в порівнянні з ділянками аперіодичної кривої квазілінійної апроксимації – в 3 рази, за рахунок більшої крутизни.

Для визначення початкової ділянки кривої зростання струму, що має мінімальну похибку відхилення від лінії, порівняємо рівняння (2.67) з рівнянням лінії. Абсолютна похибка відхилення  $\Delta_a$  дорівнює:

$$\Delta_a = f_L(t) - f_K(t) = K_L \cdot t - I \left( 1 - e^{-\frac{\xi \omega_n t}{\sqrt{1-\xi^2}}} \right) \sin \left( \omega_n \sqrt{1-\xi^2} \cdot t + \arctg \xi \right), \quad (2.69)$$

при умові, що  $f_L(0) = f_K(0)$  та  $f_L(t_L) = f_K(t_K)$ ,

$t_K = \Delta t$  - тривалість ділянки апроксимації,

$$K_L = \frac{I \left( 1 - e^{-\frac{\xi \omega_n t}{\sqrt{1-\xi^2}}} \right) \sin \left( \omega_n \sqrt{1-\xi^2} \cdot t + \arctg \xi \right)}{t_K}$$

- коефіцієнт пропорційності (тангенс кута нахилу) лінії.

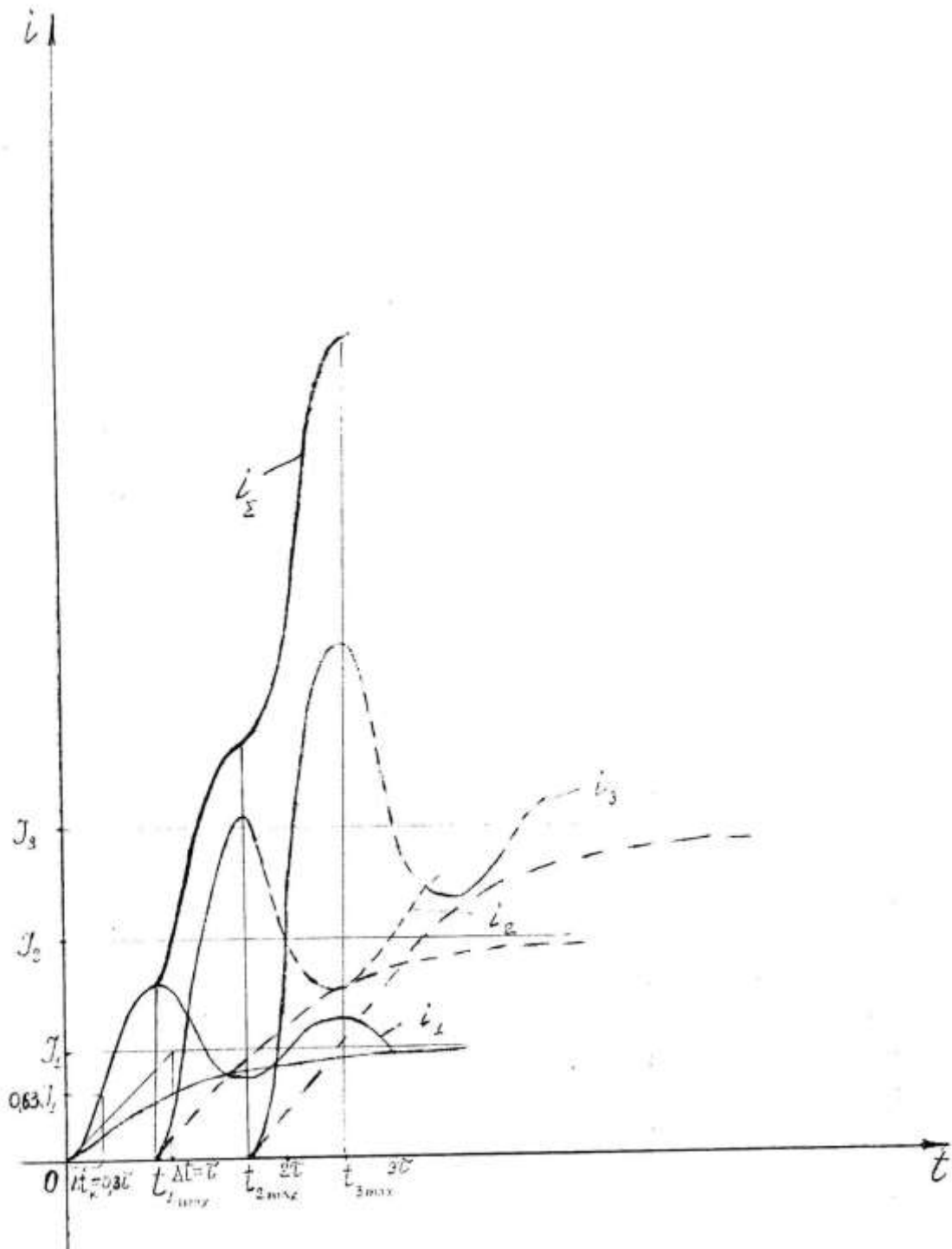


Рис. 2.17. Принцип дискретизації першим зростаючим відрізком струму в контурі.

Використовуючи методику визначення похибки наближення експоненти до лінії, розглянуту в розділі 2.2, отримаємо рівняння для розрахунку максимального абсолютного відхилення початкової ділянки ( $t_0$ ) коливальної кривої (2.67) від лінії:

$$\Delta_a = \frac{4K_{II} \cdot \xi \cdot \omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} - I \left( 1 - e^{-\frac{4\xi^2 \omega_n^2}{1-\xi^2}} \right) \sin \left( 4\omega_n^2 \xi + \arctg \xi \right). \quad (2.70)$$

Максимальна відносна похибка відхилення  $\delta = \frac{\Delta_a}{I}$ , що дорівнює 0,085, досягається при коефіцієнті згасання  $\xi = 0,1$  та  $\frac{\Delta t}{\tau_n} = 0,2$ .

Таким чином, при достатньо високій точності квазілінійної апроксимації необхідних форм ЗМП, даним способом досягається збільшення коефіцієнта корисної дії джерела живлення ПДЗМП за рахунок зростання значення струму на кожній ділянці дискретизації та розширюється частотний діапазон.

На рис. 2.18 зображена структурна схема ПДЗМП, яке реалізує запропонований спосіб.

На схемі: функціональний генератор (ФГ), який складається з послідовно поєднаних блоків: генератора опорної частоти (ГОЧ), лічильника (Лч), першого запам'ятовуючого блоку (ППЗП1), першого регістру (Р1), першого цифро-аналогового перетворювача (ЦАП1) - виробляє вихідний сигнал  $U_{ex}(t)$  необхідної форми. Цей сигнал надходить на неінвертований вхід диференційного підсилювача (П), навантаженням якого є контур, в складі: зразкової котушки магнітної індукції (ЗКМІ), конденсатора (С) та зразкового резистора (ЗР), один з входів якого підключено до інвертованого входу диференційного підсилювача (П). Вихідний сигнал функціонального генератора  $U_{ex}(t)$  підсилюється в підсилювальному каскаді (П) та прикладається до навантаження (Н).

Магнітна індукція, що відтворюється в ЗКМІ, дорівнює (2.1). Напряга  $u_{0i}(t)$  зі ЗР, пропорційна струму, що протікає  $i(t)$  за Н, надходить на один з входів компаратора (К).

На другий вхід компаратора (К) надходить сигнал  $V_{0i}(t)$  з цифрового керованого дільника, що складається з другого запам'ятовуючого блоку (ППЗП2), другого регістру (Р2) та другого цифро-аналоговоо перетворювача (ЦАП2). При досягненні максимального значення струму  $I_{i_{max}}$  в навантаженні, напряга  $u_{0i}$



## **2.4 Задачі автоматизації прецизійних джерел змінних магнітних полів та розробка раціональної структури автоматизованого комплексу відтворення змінних магнітних полів.**

Для розроблених прецизійних джерел велике значення має автоматизація роботи як окремих його блоків та вузлів, так і всього джерела

в цілому, оскільки завдяки цьому з'являється можливість програмного відтворення різних форм ЗМП з нормованими характеристиками і, окрім цього, реалізації гнучкого керування джерелом і його самокалібрування. ПДЗМП, що володіють такими властивостями, представляють собою АКВЗМП. Ці комплекси мають покращені метрологічні характеристики, підвищену продуктивність праці, на їх базі можлива розробка автоматизованих робочих місць метролога, призначених для випробування та повірки тесламетрів ЗМП. Ці комплекси проектуються з урахуванням наступних вимог.

1. Автоматизований комплекс повинен використовувати єдину систему апаратних, програмних, метрологічних засобів, що забезпечують агрегування за допомогою однотипних інтерфейсних блоків поєднання сучасних пристроїв високоточної вимірювальної та обчислювальної техніки, що забезпечують зберігання випробувальної інформації, її обробку та документування.

2. Структурний склад АКВЗМП повинен здійснювати за допомогою мікроконтролерів, мікропроцесорів та персональних комп'ютерів чітку функціональну взаємодію діагностичних, вимірювальних, корегуючих та керуючих впливів на основі програмних алгоритмів, що здійснюють гнучке переналаштування та моделювання інших форм ЗМП.

3. Комплекс повинен відтворювати середні і слабкі постійні, змінні та імпульсні МП з нормованими параметрами.

4. В автоматизованому комплексі повинна бути передбачена багатоканальність вводу-виводу для одночасного дослідження та повірки декількох об'єктів (тесламетрів) за різними програмами, з виводом різних сигнальних та керуючих впливів.

5. Комплекс повинен забезпечувати можливість сполучення з іншими системами більш високого ієрархічного рівня.

6. В автоматизованому комплексі повинно передбачатись відтворення та зміна діючого значення магнітної індукції в широких динамічних і частотних діапазонах, накопичення експериментальної інформації для її статистичної обробки та протоколювання.

7. Комплекс повинен передбачати можливість одночасного виконання операцій відтворення необхідної форми ЗМП з операціями вимірювання, контролю та діагностики окремих параметрів комплексу і об'єкта, а також додаткового вводу інформації з вимірювальних засобів, зберігання та реєстрація даних.

З цією метою в ПДЗМП раціонально використовувати сучасні мікроконтролери. Запропонований шлях побудови джерел ЗМП на базі сучасних мікроконтролерів, має суттєві переваги в порівнянні з неавтоматизованими системами: дозволяє виконувати повний цикл досліджень, пов'язаних з автоматизацією повірки або випробовуванням магнітовимірювальних приладів, чи будь-яких інших фізичних об'єктів в складних полігармонічних МП, забезпечує можливість заміни програм повірки та випробовувань, вибору режиму автономного налаштування і калібровки основних вузлів джерела, реєструє результати повірки і експериментів, створює бібліотеку програм і узагальнює результати повірки та випробовувань, виконує статистичну обробку даних.

На рис.2.19 приведена функціональна схема АКВЗМП. Персональний комп'ютер (мікро-ЕОМ) чи мікропроцесор виконує роль керуючого, контролюючого, порівнюючого та коригуючого пристрою. На основі закладених програм генерується послідовність кодів, які через інтерфейс сполучення впливають на кероване джерело постійного струму (ДП), яке зв'язане зі зразковою котушкою магнітної індукції (ЗКМІ).

Основу комплексу складає персональний комп'ютер з приладовим інтерфейсом (ПІ) і інтерфейсом сполучення (ІС), а також блоком

керування (БК), в складі пристрою відображення та реєстрації інформації (ПВРІ), принтера, дисплею і координатного самописця. Інтерфейс сполучення (ІС), виконаний у вигляді модуля перетворення вихідної інформації з дискретної форми в аналогову, пов'язаний з джерелом опорної напруги (ДОН) і підсилювачем-перетворювачем, який складається з диференційного підсилювача та багатокаскадного транзисторного підсилювача потужності, зв'язаного зі ЗКМІ, яка підключена в ланцюг НЗЗ за струмом. Зразкова котушка виконана у вигляді КГ, що забезпечують відтворення МП з високою однорідністю. Вихід ЗКМІ підключений до порівнюючого пристрою (ПП), другий вхід якого підключено до функціонального генератора (ФГ). Вихід порівнюючого пристрою (ПП) пов'язаний з блоком корекції (БКК) і через нього з суматором (С1). Керує роботою комплексу блок керування (БК). Через приладовий інтерфейс (ПІ), комплекс зв'язаний з вимірювачем магнітної індукції (ВМІ), що повіряється.

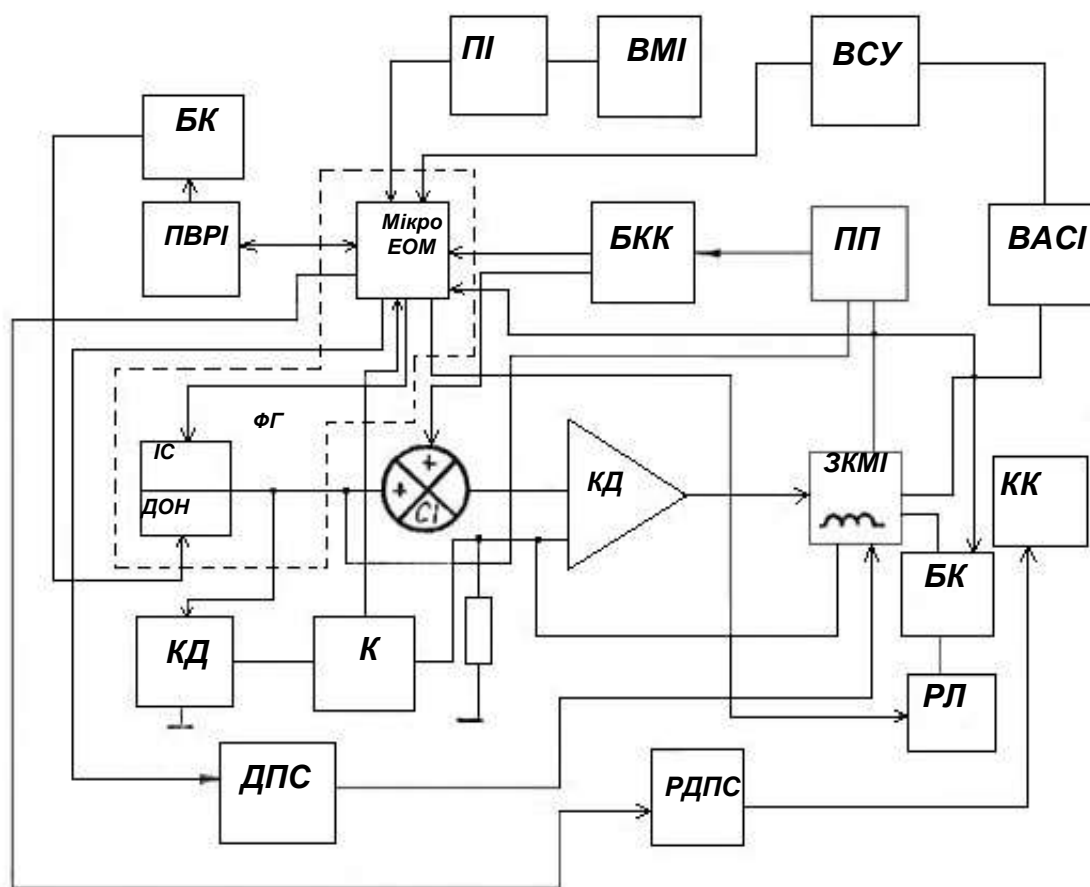
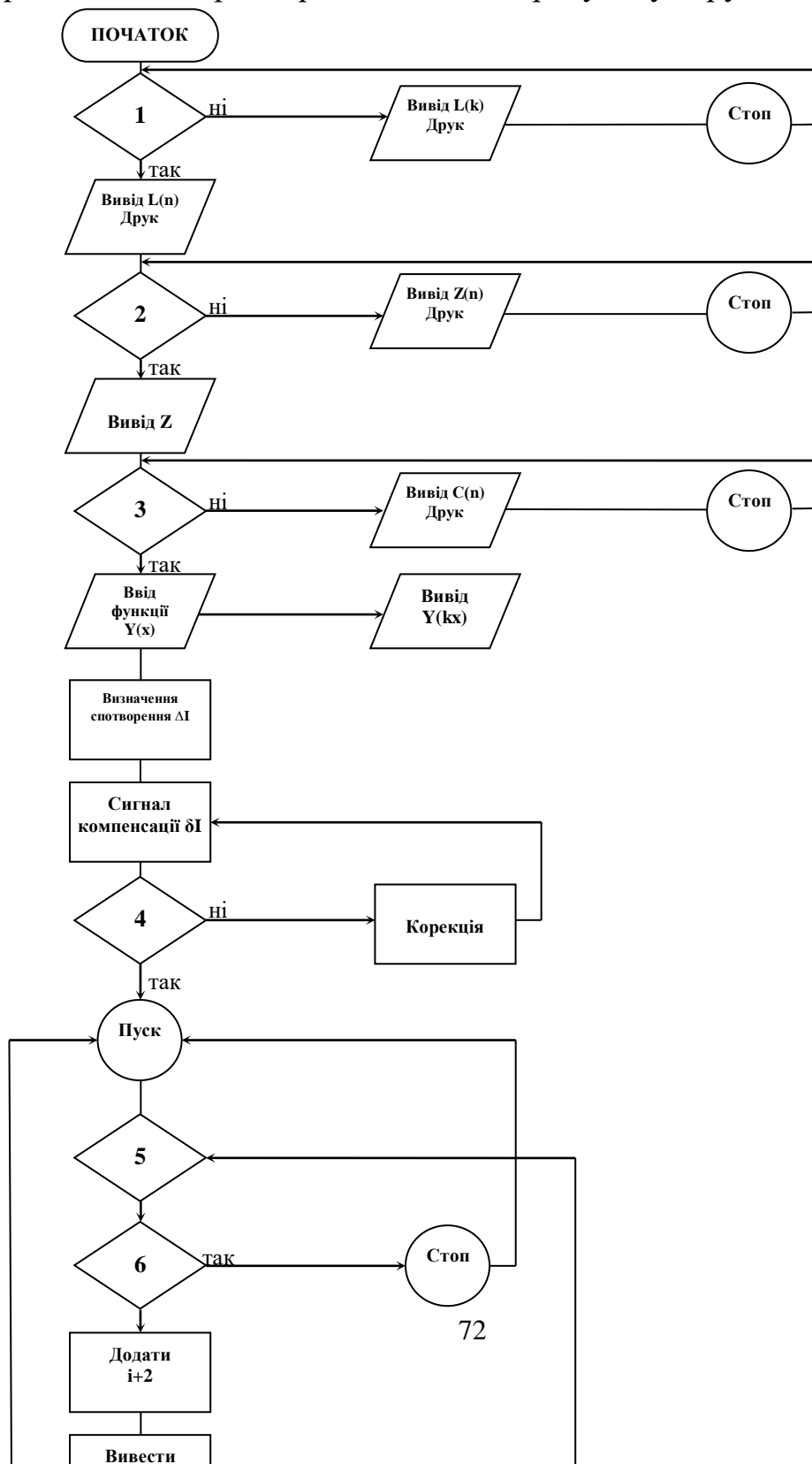


Рис. 2.19. Функціональна схема АКВЗМП



Блок-схема алгоритму роботи комплексу показана на рис. 2.20. Початкові дані індукуються на дисплеї. Керуюча програма зберігається в перепрограмованому постійному запам'ятовуючому пристрої (ППЗП), що забезпечує зберігання кодів при вимкненому живленні. Алгоритм роботи побудовано таким чином, що персональний комп'ютер здійснює контроль за станом кожного з блоків, що входять в автоматизований комплекс і, в залежності від невідповідності встановленим значенням контрольованих параметрів, здійснює перебудову керуючого коду.



ні

так

ні

Рис. 2.20 Блок-схема  
алгоритму роботи  
комплексу

В якості критерію оцінки вірогідності відтворення нормованого значення параметрів ЗМП, вибрана межа мінімальної похибки  $\delta_D$ . При перевищенні допустимого значення  $\delta_D$  здійснюється саморегулювання системи з видачею інформації на дисплей ПВРІ щодо основних параметрів системи. АКВЗМП може працювати в двох режимах самоперевірки: повного автономного самоналаштування за допустимим значенням похибки відтворення; за програмно-заданим режимом роботи, з зупинкою програми при перевищенні допустимої похибки.

де:

1 - перевірка працездатності блоків комплексу  $L(n)=L(k)$

2 - перевірка  $\Delta t_k \leq 0,3\tau$ ;  $\Delta B \leq \delta B_D$

3 - компенсація  $B, \delta B, B > 0$ ,  $\delta B = \delta B_{min}$

4 -  $\Delta I \leq \Delta I_{don}$

5 - затримка  $N$

6 - остання сходинка  $i \geq k$

7 -  $\Delta t \leq \Delta t_{don}$ .

Перевіряються еквівалентні опір і індуктивність котушки, коефіцієнт підсилення та стала часу, порівнюються допустимі похибки коефіцієнту перетворення інтерфейсу сполучення (ІС). Перевіряються блоки порівняння (ПП), корекції (БКК) та реєстрації (ПВРІ). Визначаються умови роботи комплексу: значення магнітної індукції зовнішніх полів, температура. При нормальних умовах роботи автоматизованого комплексу та відповідності значень виміряних параметрів блоків паспортним даним, в режимі самоперевірки мікропроцесор чи персональний комп'ютер видає команду готовності роботи комплексу і реєструє початкові параметри. При порушенні

нерівності  $B \leq B_d$  (де  $B$ ,  $B_d$  - вимірне та допустиме значення магнітної індукції), в робочому об'ємі зразкової котушки компенсується вплив паразитних полів, шляхом подачі корегуючого сигналу з персонального комп'ютера на регульоване джерело постійного струму (РДПС), навантажене на корегуючу котушку. Потім обирається необхідний режим роботи АКВЗМП. Автоматизований комплекс може працювати в наступних основних режимах: відтворення імпульсних періодичних МП – «Повірка 1»; відтворення різноманітних законів зміни магнітної індукції з автоматизацією перевірки тесламетра по заданому алгоритму – «Повірка 2».

В режимі «Повірка 1», комплексом генеруються періодичні або одиничні імпульси МП в точній відповідності з нормованою формою і діючим значенням магнітної індукції.

Розглянемо функціонування персонального комп'ютера спільно з інтерфейсом сполучення (ІС), що працюють в реальному масштабі часу в якості багатоцільового програмованого генератора імпульсів (БПГІ). На рис. 2.21 приведена структурна схема багатоцільового програмованого генератора імпульсів.

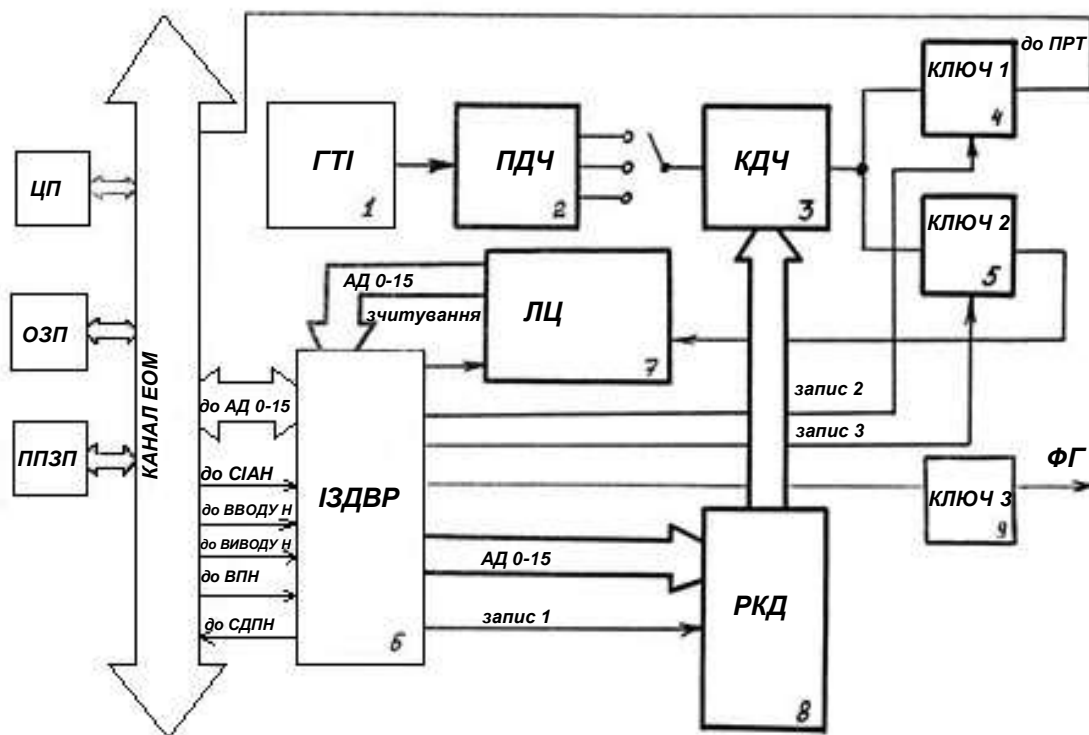


Рис. 2.21. Структурна схема багатоцільового

БПГІ виконаний у вигляді таймеру та складається з генератора тактових імпульсів (ГТІ), побудованого на основі кварцевого резонатору Z, проміжного дільника частоти (ПДЧ), керованого дільника частоти (КДЧ), ключів К1, К2, К3, регістра підрахунку циклів (РПЦ), регістра коефіцієнта ділення (РКД), мультиплексора та дешифратора вибору регістрів (ДВР). ДВР призначений для підключення БПГІ до каналу персонального комп'ютера для програмного вибору вихідного регістру коефіцієнта ділення (РКД), вхідного регістру підрахунку циклів і шестирозрядного регістру керування.

Налаштування генератора відбувається наступним чином: в 3, 4 і 5 розряди регістра керування, в циклі «Виведення», заноситься трьохрозрядний код керування мультиплексором. При цьому на виході мультиплексора з'являється одна з проміжних частот (вибирається за вимогою оператора). Після цього встановлюється коефіцієнт ділення керованого дільника частоти (КДЧ). Керування коефіцієнтом ділення відбувається шляхом запису в РКД коду коефіцієнта перерахунку  $K_{\Pi}$ , який визначається формулою:

$$K_{\Pi} = 2^{16} - K_{\Delta},$$

де  $K_{\Delta}$  - необхідний коефіцієнт ділення.

Таким чином, можна вибрати будь-який коефіцієнт ділення в діапазоні від 1 до 65536. Після цього, встановленням ключів, вибирається необхідний режим роботи БПГІ.

Режим програмованого таймера використовується в системі керування комплексу, який працює в реальному масштабі часу і вимагає обслуговування за перериваннями, через задані проміжки часу. Даний режим використовується як в процесі роботи програм відтворення ЗМП, так і в робочих режимах систем керування автоматизованого комплексу при його метрологічній атестації [78].

Режим фіксації тривалості процесів використовується в випадках, коли необхідно знати точний час перебігу контрольованого процесу. Наприклад, для визначення часу роботи програми або тривалості імпульсу поля, першою командою програми відкривається ключ (К2),

останньою – закривається. В програмному циклі «Введення» вміст регістра підрахунку передається в регістр пам'яті персонального комп'ютера і, по відомому значенню проміжної частоти і коефіцієнта ділення КДЧ, легко визначається значення точного часу роботи програми, тривалість імпульсу або циклу і всього процесу відтворення ЗМП в цілому.

Режим ФГ встановлюється під час запису високого рівня сигналу в другий розряд регістра керування, відкривається ключ КЗ, дозволяючи роботу генератора в режимі завдання необхідних форм ЗМП. Так, при автоматизації відтворення заданих форм ЗМП потрібен прецизійний

генератор функцій, здатний формувати точні послідовності імпульсів з можливостями регулювання їх параметрів (амплітуди, тривалості, частоти проходження) і обліку тривалості кожного імпульсу поля або сходинки-імпульса при апроксимації необхідної форми ЗМП.

Персональний комп'ютер в такому комплексі не тільки керує роботою генератора, але і дозволяє контролювати, корегувати задану форму відтворення поля. Але повністю завантажувати процесор персонального комп'ютера тільки програмою відтворення необхідних кодів для цифро-аналогового перетворювача не раціонально. Тому, для оптимального використання процесора, розширення його функцій, а також підвищення точності та швидкодії відтворення необхідної форми ЗМП за рахунок збільшення точності генерування тактових імпульсів, нами запропоновано новий принцип суміщеної побудови автоматизованого комплексу: з виділенням тракту автономного формування заданої форми сигналу, з додатковою можливістю перепрограмування на будь-якому з циклів відтворення, з урахуванням тривалості кожного кроку дискретно ЗМП. Такий принцип побудови дозволив автоматично відслідковувати тривалість кожного кроку дискретного ЗМП, циклу і всього процесу в цілому, за допомогою всього лише одного лічильника, що використовується як для формування необхідної форми ЗМП, так і для контролю за тривалістю, здійснювати рівномірну і адаптивну дискретизацію [66, 79].

ФГ, побудований за цим принципом, може працювати як в режимах автономного формування необхідної форми ЗМП, так і програмного формування за допомогою зовнішніх пристроїв (наприклад, персонального комп'ютера чи мікроконтролера ).

На рис. 2.22 зображена структурна схема такого ФГ для АКВЗМП.

Даний ФГ складається: з генератора тактових імпульсів (ГТІ); програмованого керованого дільника частоти (ПКДЧ); логічних елементів «І»; блока синхронізації і затримки (БСЗ); реверсного лічильника (Лч); блока керування (БК); комутатора адресу (КА); запам'ятовуючого блоку (ЗБ); регістру (Р); цифро-аналогового перетворювача (ЦАП); блоку введення, який складається з регістру даних (РД), запам'ятовуючого блоку (ЗБ) і одновібратора (ОВ); регістрів коефіцієнта ділення (РКД) і адреси (РА).



надходить на котушку індуктивності, в якій відтворюється ЗМП. Блок керування з п'ятого виходу задає код, який встановлює в РКД необхідний коефіцієнт ділення при надходженні дозвільного імпульсу з БК по 6 виходу. З РКД ця кодова комбінація надходить на ПКДЧ, який виконує ділення імпульсів, що генеруються ГТІ. Через елемент «І»,

3 або 4 імпульси надходять на підсумовуючий та віднімаючий входи ЛЧ і, на блок синхронізації і затримки (БСЗ). БСЗ, що виробляє сигнал дозволу запису, який надходить на стробуючий вхід регістра, виконано у вигляді одновібратора. До запам'ятовуючого блоку (ЗБ) інформація заноситься через блок вводу інформації (БВ). По 9 виходу БК надходять інформаційні сигнали на регістр даних ЗБ, а з виходу БК, надходить сигнал дозволу на керуючий вхід регістра даних. Одночасно запускається одновібратор (ОВ) і з його виходу імпульс надходить на вхід дозволу запису ЗБ. Дані з регістра РД переписуються в ЗБ, причому інформація в ЗБ заноситься тільки за тими адресами, які встановлені на виході КА.

Такий ФГ в автоматизованому комплексі може працювати в двох режимах: режимі автономного відтворення ЗМП необхідної форми, при надходженні адреси з лічильника; програмному режимі, при надходженні адреси на ЗБ, через КА від регістра адреси ЗБ. Керування комутатором відбувається з 4 виходу блока керування (БК). Комбінація цих режимів дає можливість значно розширити функціональні можливості комплексу: формувати дуже складні форми ЗМП, автоматично переходити з режиму на режим, програмно записувати та переписувати інформацію в ЗБ. Облік тривалості циклу відбувається завдяки підключенню виходу ЛЧ до входу 1 (БК). БК аналізує стан ЛЧ і, при досягненні ним заданого стану, видає сигнал на РКД для заміни коду на його інформаційному виході. В ПКДЧ встановлюється інший коефіцієнт ділення і, з його виходу, вже з іншою тактовою частотою сигнали будуть надходити через блоки 3 або 4 на входи ЛЧ.

Алгоритм роботи даного пристрою ілюструється на рис. 2.23.



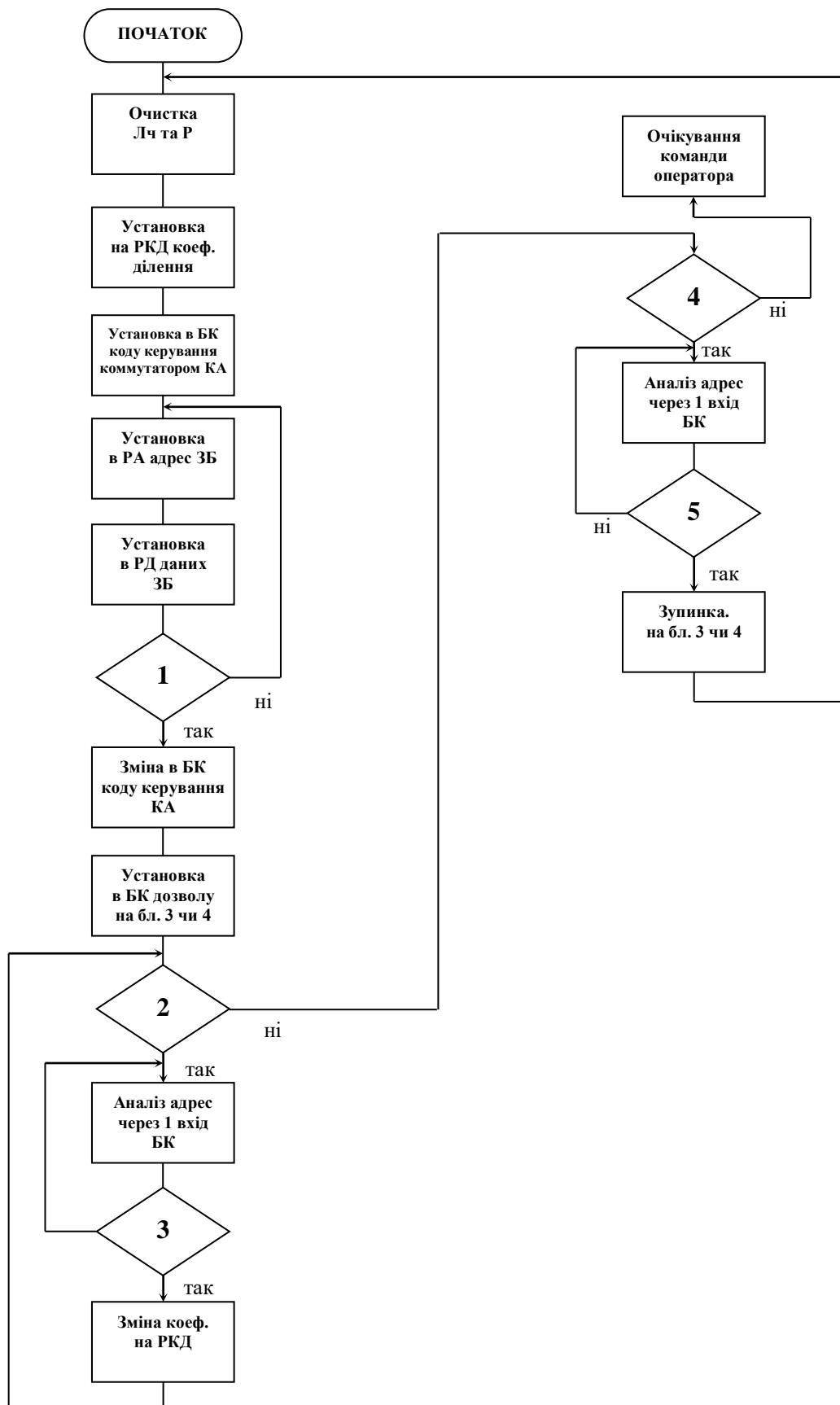


Рис.2.23. Алгоритм роботи запропонованого пристрою

ФГ в режимі автономного відтворення працює наступним чином. З блоку керування, по 3 виходу, очищується регістр (Р) і встановлюється в вихідний стан ЛЧ. Через БВ і РА заносяться дані до ЗБ. Потім встановлюється необхідний коефіцієнт ділення в ПКДЧ. З генератора тактових імпульсів періодична послідовність імпульсів  $F$  надходить в ПКДЧ,

на виході якого частота імпульсів дорівнює  $F = F / n$ . Ці імпульси приходять на входи елементів «І» і на вхід блоку синхронізації і затримки, вихідний сигнал якого надходить на вхід стробування запису регістра (Р). На другий вхід блоку «І» з блоку керування (БК) приходять сигнал дозволу і тактова частота  $F_1$  надходить на підсумовуючий вхід ЛЧ.

З виходу ЛЧ, код адреси передається на перший вхід БК і на перший вхід комутатора адреси (КА), а з його виходу на ЗБ, де зчитувані дані заносяться в регістр (Р), а з його виходу, надходять на ЦАП. На виході ЦАП формується необхідна форма ЗМП.

Режим програмного керування відбувається при з'єднанні через КА другого входу, який підключено до регістру адреси (РА) та ЗБ. Адресний код надходить з БК через РА. Такі режими потрібні як для перевірки МВЗМП, так і для метрологічної атестації самого комплексу [80, 81].

де:

- 1 - Всі дані занесені ?
- 2 - Чи потрібен аналіз адрес для зміни коду РКД ?
- 3 - Досяг адресу необхідного значення ?
- 4 - Чи потрібен аналіз адрес для зміни інформації в ЗБ ?
- 5 - Досяг адресу необхідного значення ?

В порівнянні з раніше розробленими пристроями, АКВЗМП дозволяє збільшити діапазони відтворення форм з незмінним спектральним складом при зміні масштабу часу, тобто дискретним методом відтворюється необхідна форма з кроком дискретизації  $\Delta t = t_1$ . Потім, при надходженні програмного коду на ПКДЧ, змінюється

тактова частота проходження імпульсів, які надходять на ЛЧ, а відповідно, змінюється і крок дискретизації, що дорівнює  $\Delta t = t_2$ , змінюється період відтворення, але не змінюється форма і складові спектру. Крок дискретизації можна змінювати декілька разів за період відтвореного сигналу. Тривалість інтервалу, після якого необхідно змінити керуючий код РКД, попередньо встановлюється та аналізується БК. В комплексі дуже важливо точно враховувати тривалість кожної сходинки-імпульса магнітної індукції, якими апроксимується необхідний закон зміни МП.

Окрім цього, з БК в процесі відтворення, при обмеженій кількості елементів пам'яті, використовується селективний режим роботи ЗБ і блоку введення. В процесі функціонування, в комірках пам'яті, як і звільнилися, заносяться дані при надходженні сигналу з БК з виходу 10 на дозволяючий вхід блоку введення, записуються нові кодові комбінації. В новому циклі роботи пристрою, вже починаючи з цих елементів, формується інший сигнал на ЦАП.

В даному комплексі, на відміну від інших установок [52], автоматизовано процес зміни тривалості кроку дискретизації, контролю і необхідної зміни кроку або зупинення процесу відтворення, автоматичного перезапису, у вже заповнені комірки пам'яті, нових значень необхідних кривих ЗМП. Процес контролю тривалості програмного циклу потрібен для атестації даного комплексу в якості метрологічної установки повірки тесламетрів ЗМП.

При завданні необхідної форми кривої ЗМП програмним шляхом, в блок ППЗП заносяться коди необхідних законів зміни МП. Кодова комбінація, що відповідає вхідному сигналу, заноситься в оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП) машини і передається через інтерфейс (ІС) на вхід КР, при цьому виникає імпульс струму, що надходить в ЗКМІ, де утворюється необхідне МП (рис. 2.24). При відтворенні заданої форми ЗМП в режимі експоненціально-ступінчастої апроксимації, підтримується та контролюється тривалість кожної сходинки-імпульсу до значення  $\Delta t = 10\tau$ .

При відтворенні ЗМП в режимі лінійної апроксимації, використовуються додаткові блоки керованого дільника (КД) і компаратора (К), які визначають ділянки кусково-лінійної апроксимації

(рис. 2.24). В даному режимі контролюється і корегується напруга з КД та частота спрацювань  $K$ , а також тривалість кроку дискретизації  $\Delta t$ .

В режимі «Повірка II» відтворюються будь-які необхідні форми ЗМП - з використанням експоненціально-ступінчастої і лінійної апроксимації, з забезпеченням автоматизації повірки тесламетра ЗМП [82].

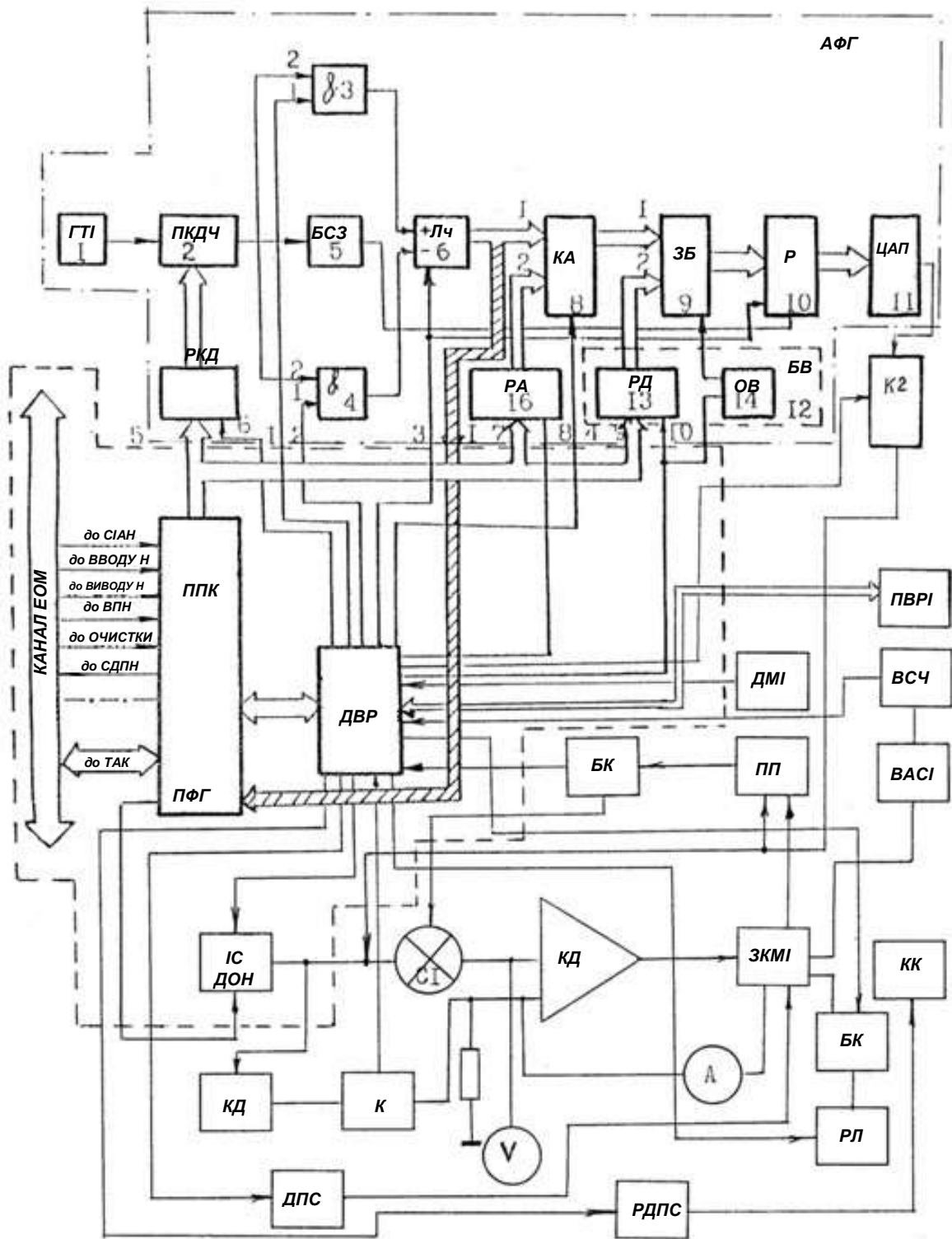


Рис. 2.24. Блок-схема відтворення ЗМП в режимі лінійної апроксимації, коли використовуються додаткові блоки керованого діляника КД і компаратора К, які визначають ділянки кусково-лінійної апроксимації

В режимі «Повірка – ЗМП», з бібліотеки програм, вибирається програма з необхідним законом відтворення ЗМП і запускається

комплекс за даною програмою. Цей режим дозволяє досліджувати вплив різних змін МП на працездатність приладів, проводити дослідження в різних масштабах часу, виділяти характерні екстремальні ділянки зміни поля, реєструвати залежність зміни магнітної індукції в часі, час установки

в різних режимах функціонування [83].

Перспективні можливості для розширення динамічного і частотного діапазонів має використання коливального режиму струму в ЗКМІ. Сигналом від персонального комп'ютера, вмикається блок комутатора К1, перемикаючи регульований навантажувальний ланцюг (РЛ).

Таким чином, автоматизація ПДЗМП базується на програмно-апаратних засобах, об'єднаннях в єдиний комплекс, який цілковито вирішує задачі як відтворення і нормування різних форм ЗМП, так і забезпечення можливості автоматизації повірки тесламетрів. Така побудова

в підсумку дозволяє автоматизувати технологічний процес випуску більш сучасних засобів вимірювання на якісно новій основі, що виражено не просто в заміні оператора-повірника автоматом, а в досягненні взаємної технологічної адаптації повірочної установки і об'єкта повірки. Дану раціоналізовану блок-схему АКВЗМП зображено на

рис. 2.24.

Такий комплекс має автономний (АФГ) і програмний (ПФГ) функціональні генератори, які формують необхідні закони відтворення ЗМП і систему інтерфейсних блоків, що забезпечують розв'язання поставлених задач. Автоматизований комплекс не тільки забезпечує проведення повірки в автономному режимі по заданій програмі, але і має можливість видачі свідоцтва про повірку.

На основі проведених досліджень та розрахунків зробимо висновки:

1. Проаналізовано принципи побудови ПДЗМП. Запропоновано їх класифікацію з точки зору методу підвищення точності відтворення необхідної форми ЗМП. Показано, що високу точність відтворення мають прецизійні джерела з замкненою структурною схемою. ПДЗМП, які використовують порівняння значень відтворюваних сигналів зі зразковими, мають похибки відтворення необхідної форми біля 0,5%. Високу точність (відносна похибка відтворення форми  $\leq (0,005 - 0,1\%)$ )

мають ПДЗМП з кусково-лінійною апроксимацією необхідного закону відтворення магнітної індукції змінного поля. Встановлені оптимальні режими кусково-лінійної і експоненціально-ступінчастої дискретизації.

2. Досліджено шляхи збільшення частотного діапазону ПДЗМП за рахунок використання ЗЗ в замкнених структурах, лінійної апроксимації відтворюваних форм ЗМП і коливальних режимів струму в зразковій котушці. В результаті досліджень показана можливість розширення на 1–2 порядки частотного діапазону ПДЗМП.

3. Виконана порівняльна оцінка точності методу дискретного відтворення необхідних форм ЗМП при різноманітних методах апроксимації. Показано, що при співвідношенні  $\Delta t / \tau \leq 0,2$  середньоквадратична похибка апроксимації синусоїдальної періодичної функції з дискретністю  $K = 64$  кроки на період та вище, не перевищує  $\delta_{an} < 0,5\%$ . При співвідношенні  $\Delta t / \tau = 0,05$  - похибка відновлення форми  $\varepsilon \leq 0,1\%$ , а довірчий інтервал складає  $\Delta = 5 \cdot 10^{-4} B_d$

4. Запропоновано спосіб відтворення ЗМП, що базується на використанні коливального режиму струму в котушці. Досліджені динамічні і частотні діапазони для ПДЗМП, які реалізують даний спосіб. Розроблені їх принципи побудови, показана можливість автоматизації процесу відтворення необхідної форми ЗМП і досліджена оригінальна структурна схема такого джерела.

5. Досліджено шляхи автоматизації ПДЗМП на базі сучасних персональних комп'ютерів. Показано, що такі джерела мають розширені функціональні можливості, більш високу точність, стабільність, гнучкість перебудови, універсальність застосування. Розроблено алгоритми роботи і програми функціонування автоматизованих комплексів відтворення ЗМП АКВЗМП. Запропоновано нові принципи побудови АКВЗМП з режимами автономного і програмного відтворення ЗМП різноманітних форм, що дозволило збільшити точність відтворення форми ЗМП в 2 рази.

## РОЗДІЛ III

# АНАЛІЗ ПОХИБОК І ОЦІНКА СТІЙКОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ ВІДТВОРЕННЯ ЗМІННИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ

### 3.1. Дослідження інструментальних похибок автоматизованого комплексу й шляхи їх зменшення

Інструментальні похибки комплексу обумовлені похибками складових блоків та поділяються на статичні і динамічні похибки. До статичних похибок належать: похибки реалізації необхідного виду апроксимації  $\delta_{p_n}$  і похибки атестації сталої  $K_B$  зразкової котушки за магнітною індукцією  $\delta_{K_B}$ . В похибку реалізації необхідного виду апроксимації  $\delta_{p_n}$  входять похибки: ФГ  $\delta_{\phi Г}$ , обумовлені нестабільністю значення опорної напруги і вихідного сигналу цифрового аналогового перетворювача (ЦАП); підсилювального блоку  $\delta_{K_n}$ , що пов'язані зі змінами значень коефіцієнта передачі; зразкової котушки  $\delta_H$ , що обумовлені розподіленими ємностями обмоток. Динамічні похибки пов'язані з комутаційними процесами і інерційністю елементів комплексу.

Проведемо аналіз складових похибок АКВЗМП, використовуючи узагальнену структурну схему (рис. 3.1), з урахуванням реальної елементної бази і конструктивних особливостей автоматизованого комплексу.

На підставі формули (2.56) отримаємо вираз для магнітної індукції в ЗКМІ

$$\bar{B} = \frac{K_B K_u \bar{U}_1}{(R_{вих} + R + R_3)[1 + j\omega\tau + K_u\beta]} \quad (3.1)$$

Прологарифмуємо і продиференціюємо модуль рівняння (3.1) і, дослідивши кінцеві прирости, як результат, отримаємо:



$$\delta = \frac{\Delta K_B}{K_B} + \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\frac{\Delta K_B}{K_B} + \frac{\Delta(R_{вих} + R)}{R_{вих} + R}}{1 + K\beta}. \quad (3.2)$$

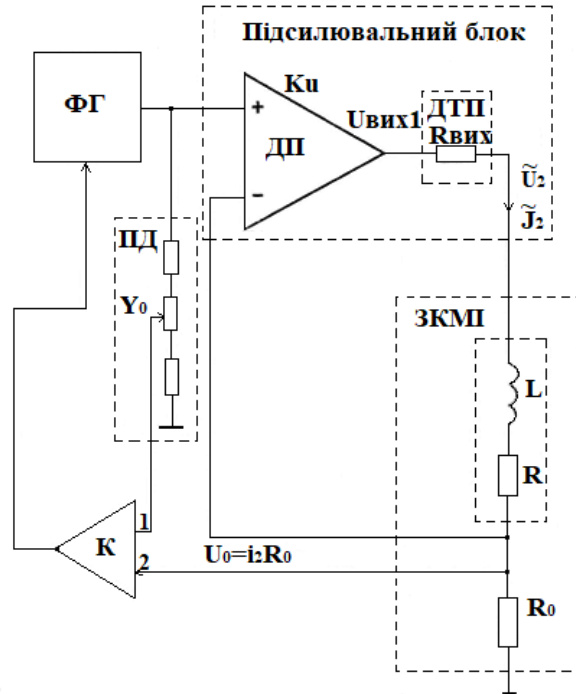


Рис. 3.1. Узагальнена структурна схема АКВЗМП

З рівняння (3.2) видно, що нестабільність загального коефіцієнта передачі  $K$  підсилювального блоку і активного опору вихідного ланцюга зменшується в  $(1 + K\beta)$  рази. Нестабільність же зразкового резистора  $R_3$ , напруги функціонального генератора  $U$  і сталої ЗКМІ за магнітною індукцією  $K_B$  - безпосередньо входить в загальну похибку комплексу. Тому високі метрологічні вимоги висуваються до зразкового резистора (похибка відхилення його від номінального значення не повинна перевищувати 0,01%), сталої  $K_B$  і стабільності вихідної напруги ФГ [75, 84].

В якості ФГ найбільш доцільно використовувати програмовані цифрові ФГ, що побудовані на основі високоточних ЦАП, які дозволяють точно формувати необхідну форму вихідного сигналу  $U(t)$  в діапазоні до одиниць мегагерц: з малим (0,1–0,2%) спотворенням форми, високою стабільністю амплітуди, тривалістю імпульсів, частоти,

можливістю програмного керування параметрами вихідного сигналу за допомогою мікропроцесорів, мікроконтролерів і персональних комп'ютерів [45, 85]. Нами запропоновані та досліджені принципи побудови багатоцільового програмованого функціонального генератора (БПФГ), який забезпечує фіксацію і регулювання тривалості кожної сходинки дискретизованого вихідного сигналу і дозволяє створювати синусоїдальний, експоненціальний, пилкоподібний, трапецієвидний та інші закони зміни напруги [62,86]. Такому функціональному генератору притаманні як статичні, так і динамічні похибки. Статичні похибки обумовлені дискретизацією  $\delta_D$  заданої форми сигналу в ФГ  $U(t)$  і нестабільністю опорної напруги  $\delta_H$  ЦАП. Перша складова статичної похибки -  $\delta_D$  для синусоїдальної форми сигналу багатьма авторами вже визначалась і, дійсно, при кількості кроків дискретизації  $K = 64 \div 70$  на період і експоненціально-ступінчастої або кусково-лінійної апроксимації ці похибки не перевищують (0,1–1)% [66]. Похибка від нестабільності і неточності установки опорної напруги ЦАП не перевищує 0,05% при коефіцієнті стабілізації джерела опорної напруги  $K_C \geq 1000$ .

Тоді, при однаковому законі розподілення ймовірностей похибки дискретизації і нестабільності опорної напруги, сумарне граничне середньоквадратичне значення статичної адитивної похибки функціонального генератора дорівнює:

$$\delta_{\text{ст.фг}} = \sqrt{\delta_D^2 + \delta_H^2} . \quad (3.3)$$

До динамічної похибки АКВЗМП перш за все належать комутаційні похибки, які визначаються за відомими методиками і не перевищують 0,05% [63, 70].

Похибка підсилювального блоку (ПБ) складається з мультиплікативної складової  $\gamma_l$ , яка обумовлена, в цілому, нестабільністю коефіцієнта передачі і, адитивної складової  $\gamma_a$ , яка виникає через вплив шуму та відхилення нульового рівня вихідного сигналу блока. Максимальне значення мультиплікативної похибки ПБ не перевищує 0,15%, при забезпеченні  $K\beta$  за струмом не менше 50 [87].

Для забезпечення стабільності коефіцієнтів передачі підсилювального блоку, використовуються високостабільні зразкові резистори (типу С2-13, С5-27) в ланцюзі ЗЗ. Зменшення похибки від зміни опору в ланцюзі керованого дільника також досягається за рахунок вибору прецизійних резисторів ПБ типу С5-27, МРГ4, а для регулювання – резистори спеціальні, з високою роздільною здатністю  $(0,0005 \div 0,002)\%$  типу СП5-35, СП5-40 і стабільністю коефіцієнта передачі  $\pm(0,001 - 0,005)\%$ .

На кінцеве значення інструментальної похибки АКВЗМП суттєво впливає похибка ЗКМІ. Точність відтворення магнітної індукції ЗКМІ визначається не тільки точністю задачі значення струму  $I(t)$ , проте і точністю встановлення сталої  $K_B$ . Державним стандартом ДСТУ 3390-96 (ГОСТ 8.144-97) - регламентовано порядок повірки і атестації сталої  $K_B$  КМІ. Але, сталі котушок атестуються тільки для постійних  $K_{B_0}$ , або змінних  $K_{B_{\square}}$  синусоїдальних МП. Для несинусоїдальних або імпульсних МП до цього часу не було нормативних документів, що визначали би порядок і режими атестації сталої  $K_{B_{\square}}$  КМІ змінних полів, через відсутність методик повірки і атестованих метрологічних засобів відтворення і вимірювання ЗМП різноманітних форм [88].

Похибка встановлення  $\delta_{K_B}$  сталої  $K_{B_3}$  для ЗМП є визначальною в інструментальній похибці АКВЗМП. Сталу  $K_{B_3}$  можна встановити на основі атестованої сталої  $K_{B_0}$  котушки. За допомогою метода одночасного компарування, пропускаючи зустрічно направлені струми  $I$ ,  $I_0$  через ЗКМІ, досягають нульового показання тесламетра діючих значень для даного виду ЗМП [89], тобто  $B_3(t) = B_0$ .

Тоді, з урахуванням того, що  $K_{B_3} \cdot I = K_{B_0} \cdot I_0$ , де  $I$  – діюче значення змінного струму;  $I_0$  – значення сили постійного струму; значення сталої  $K_{B_3}$  ЗКМІ дорівнює

$$K_{B_3} = \frac{K_{B_0} \cdot I_0}{I} . \quad (3.4)$$

Прологарифмувавши і взявши диференціал від отриманого виразу, визначимо відносну похибку встановлення сталої  $K_{B_3}$  магнітної індукції ЗКМІ

$$\delta_{K_{B_3}} = \frac{\delta_{K_{B_0}} \cdot I_0}{I} + \frac{\delta I_0 \cdot K_{B_0}}{I} - \frac{\delta I}{I} K_{B_0} I_0. \quad (3.5)$$

Згідно з роботою [46], стала  $K_{B_0}$  прецизійних котушок дорівнює

$$K_{B_0} = K_0 + P_D + P_\alpha + P_d + P_\chi + P_{np} + P_t + P,$$

де:  $K_0$  - стала для ідеальної котушки, по обмоткам якої протікає рівномірно розподілений струм;

$P_D, P_\alpha, P_d$  - поправки на рівномірність діаметру, крок намотки і розподіл струму по перетину провідника;

$P_\chi, P_{np}$  - поправки на магнітну сприйнятливості матеріалу каркаса котушки і вплив підвідних дротів;

$P_t, P$  - поправки на температуру котушки і сума поправок від впливу слабших ефектів: еліптичність і не співвісність витків, магнітну сприйнятливості дротів, кріпильних елементів і підставок, неоднорідність магнітних властивостей матеріалу каркаса котушки, деформацію дротів і нерівномірність температури, тощо.

При ретельному виготовленні ЗКМІ з використанням матеріалів з малим температурним коефіцієнтом розширення, ослаблення впливу підвідних дротів і низькою магнітною сприйнятливості матеріалів, з яких виготовлена зразкова котушка, досягається точність встановлення сталої  $K_B$  за магнітною індукцією, що дорівнює

$$K_B = K_0 \pm 0,00005 K_0. \quad (3.6)$$

Однак, для багатовиткових КГ, що відтворюють ЗМП, істотне значення має частотна похибка  $\delta_F$ , яка викликана струмами зміщення, обумовлених міжвитковою  $C_B$  і міжшаровою  $C_C$  ємністю провідників, вихоровими струмами, ефектом близькості і ефектами запізнювання при поширенні електромагнітної хвилі [90].

Частотна похибка котушки  $\delta_F$  суттєва лише на частотах, близьких до резонансної частоти ЗКМІ. Тому верхню граничну частоту  $\omega_r$ , на якій

частотна похибка  $\delta_F$  досягає гранично допустимого значення  $\delta_{F_{II}}$ , можна визначити за формулою [87]

$$\omega_{\Gamma} = \omega_o \sqrt{\frac{\delta_{F_{II}}}{\left(1 - \frac{R^2 C}{L}\right) \left(1 - \frac{R^2 C}{2L}\right)}}. \quad (3.7)$$

На частотах до  $F \leq 1000$  Гц, частотна похибка описаних котушок не перевищує 0,05%.

Діюче значення магнітної індукції в робочому об'ємі ЗКМІ, з урахуванням рівнянь (2.25), (2.70), (3.1) можна подати у вигляді

$$B_{д} = \frac{K_B K_u U}{(R_o + R + R_{вих}) \sqrt{(1 + K\beta)^2 + \omega^2 \tau^2}} \quad (3.8)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт ЗЗ, що дорівнює  $\beta = \frac{R_o}{R_o + R + R_{вих}} = \frac{R_o}{R_{\Sigma}}$ ;

$\tau$  – стала часу вихідного ланцюга, що дорівнює  $\tau = \frac{L}{R_o + R + R_{вих}}$ .

З формули (3.8) можна показати, що зміна магнітної індукції, яка викликана зміною температури навколишнього середовища, пропорційна зміні як активного опору  $R_{\Sigma}$  так і індуктивності  $L$ . Загальна індуктивність ЗКМІ дорівнює (рис. 3.2)

$$L_{\Sigma} = L_1 + L_2 + M, \quad (3.9)$$

де  $L_1 = L_2 = L, M$  - власна і взаємна індуктивність.

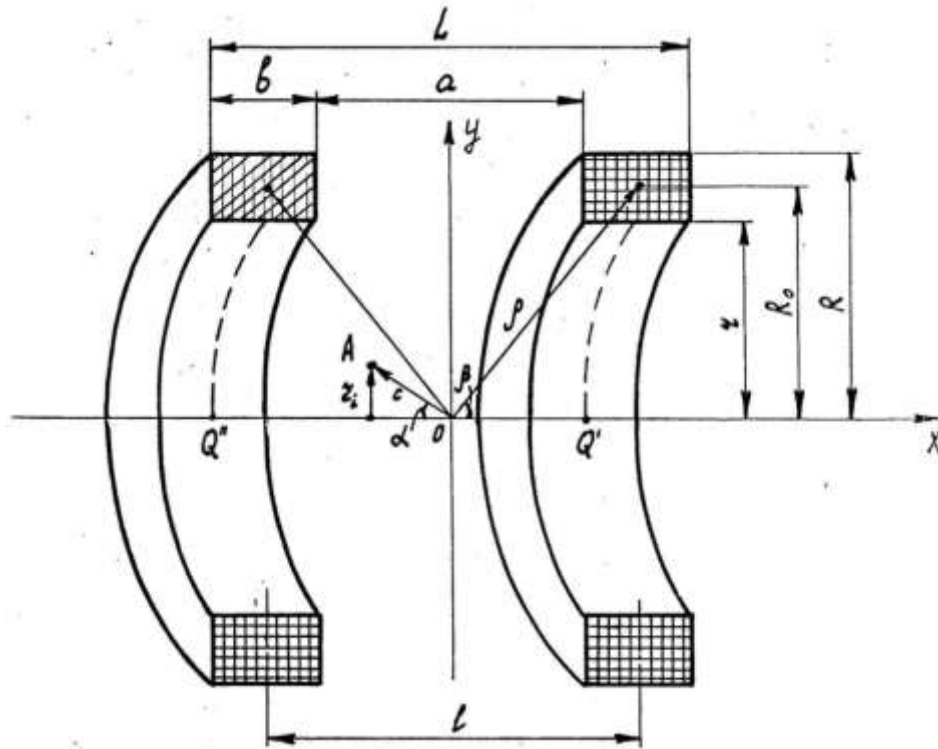


Рис. 3.2. Котушка Гельмгольца

При вимірюванні температури і з урахуванням часового старіння конструкційних матеріалів, змінюються розміри котушки і тому індуктивність дискової котушки, з урахуванням вихідного рівняння (6-13) роботи [91], дорівнює

$$L'_{\Sigma} = \frac{\mu_0}{2\pi} \omega^2 (d + \Delta d) \left[ 0,5N + 8,497k \left( \frac{a - \Delta a}{b + \Delta b} \right) \right], \quad (3.10)$$

де  $\Delta d = d' - d$  ,  $\Delta a = a' - a$  ,  $\Delta b = b' - b$  - абсолютні значення змін середнього діаметру котушки, відстані між котушками і довжиною котушки;

$\omega$  - кількість витків котушки;

$d$  - середній діаметр котушки;

$N$  - емпіричне співвідношення, встановлюється в залежності від

співвідношення  $\varphi = \frac{b}{2k_0}$  ;

$b$  - довжина котушки;

$k$  - коефіцієнт зв'язку для котушок даного типу;

$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma_H}{M}$  - магнітна стала.

Активний опір  $R$  дротів котушки також є функцією температури  $R(T)$

$$R = R_{20^\circ} [1 + \alpha(T - 20/100)] , \quad (3.11)$$

де  $R_{20^\circ}$  - опір дроту при  $T = 20^\circ C$  ;

$\alpha$  – температурний коефіцієнт опору (ТКО)  $\% / ^\circ C$  ;

$T$  - поточне значення температури в робочому діапазоні температур.

Стала часу зразкової котушки, з урахуванням (3.10), (3.11) і незначної відмінності ТКО  $\alpha_1 \approx \alpha_2$ , при зміні температури навколишнього середовища дорівнює

$$\tau_\Sigma = \frac{L'_\Sigma}{R'_\Sigma} = \frac{\mu_o \omega^2 (d + \Delta d) \left[ 0,5N + 8,497k \left( \frac{a - \Delta a}{b + \Delta b} \right) \right]}{(R_{o_{\text{вух}}} + R_{20^\circ}) [1 + \alpha(T - 20/100)] + R_o} . \quad (3.12)$$

В робочому діапазоні температур  $T \in 10^\circ, 60^\circ C$  для зразкової котушки, яка зображена на рис. 3.2, відносна похибка зміни відтворюваного значення магнітної індукції розрахована з урахуванням формул (3.10), (3.11) – не перевищує 0,15% , при  $R + R_{\text{вух}} \square R_o$  .

Таким чином, при створенні ЗКМІ з необхідним значенням  $K_{B_s}$ , спочатку сталу  $K_{B_o}$  розраховують аналітично за відомими конструктивними параметрами котушки. Але технологічні похибки при виготовленні котушки можуть змінити розраховане значення сталої котушки

за магнітною індукцією. Тому зразкові котушки атестують після їх виготовлення і в процесі експлуатації через визначені інтервали часу.

Для зменшення похибки від нестабільності опору аналогового керованого дільника і розширенні функціональних можливостей АКВЗМП, використовується й інша структурна схема побудови комплексу з цифровим керованим дільником (ЦКД) [92] (рис. 3.3).





Характеристики точності АКВЗМП залежать також від синхронності і стабільності роботи керуючих елементів, зокрема, К. Точність роботи К характеризується значенням напруги спрацьовування  $U_{cp}$ , що дорівнює  $U_{cp} = U_{o_n} + \Delta U$ . Значення  $\Delta U$  визначає поріг чутливості К, а його нестабільність (дрейф) є джерелом похибки  $\delta_{cp}$  К. Другим суттєвим джерелом похибки К є інерційність його спрацьовування, що визначається часом відновлення [93].

Для прецизійних однопорогових К, які виконані на здвоєному К типу 521СА1, поріг чутливості  $\Delta U$  знаходиться на рівні (0,1–1) мВ, але вони вимагають дуже ретельного підлаштування напруг зміщення  $U_{3M}$  та спеціальної схеми включення [52]. Кращі характеристики мають прецизійні К типу 551СА3, 544СА3, які мають виводи для регулювання напруги зміщення нуля. Для них досягнення значення чутливості  $\Delta U = (0,5–4)$  мВ призводить до суттєвого ускладнення схеми включення К. При чутливості  $\Delta U = 0,5$  мВ, похибка від неточності перемикачів рівнів не перевищує 0,5% для рівнів (0,1–1) Вольта. Але, вже при значенні їх порога чутливості одиницях мілівольта (2–8) мВ, - відбувається зміна кроку дискретизації ( $\Delta t \pm \delta t$ ) та періоду ( $T + \Delta T$ ) відтворення сигналу, що приводить до частотної похибки  $\Delta f$  ЗМП  $B(t)$ . Для зменшення цієї похибки встановлюється значення рівнів квантування  $> 50$  мВ.

Отже, підсумкова інструментальна похибка автоматизованого комплексу, з урахуванням некорельованості складових часової і температурної похибок, похибок від нестабільності вихідної напруги функціонального генератора при нормальних законах розподілення і ентропійних коефіцієнтах  $K_{\Sigma} = K_H = K_o = K_x |_{x=i,T}$ ,  $K_x |_{x=i,U,T} = K_{x_1}$  буде дорівнювати

$$\delta = K_{\Sigma} \sqrt{\sum_{x=i,T,U} \left\{ \left[ \frac{\frac{\Delta K}{K}}{1 + K\beta_x} \right]^2 + \left[ \frac{\frac{\Delta \beta}{\beta}}{K_x} \right]^2 + \left[ \frac{\frac{\Delta R_o}{R_o}}{K_x} \right]^2 + \left[ \frac{\frac{\Delta K_B}{K_B}}{K_x} \right]^2 + \left[ \frac{\frac{\Delta U}{U}}{K_{x_1}} \right]^2 \right\}}, \quad (3.13)$$

де:  $\frac{\Delta R_o}{K_x}$  - похибка, що викликана нестабільністю зразкового резистора

в вихідному ланцюзі комплексу його температурної складової;

$\frac{\Delta U}{K_{X_1}}$  - похибка, що обумовлена коливаннями опорної напруги  $U_o$

функціонального генератора, яка визначає нестабільність амплітуди ФГ.

Часова нестабільність автоматизованого комплексу складається з короткочасної нестабільності, що обумовлена флуктуаційними коливаннями і довгостроковою нестабільністю, що виникає через часове старіння конструкційних матеріалів і елементів, температурних змін [94]. До того ж, при відтворенні слабких МП (0,5–10) мТл, на значення магнітної індукції ЗКМІ впливає МП Землі  $B_3 \approx 0,005$  мТл і його варіації  $\Delta B_{3, \max} = 5 \cdot 10^{-5}$  мТл.

На підставі отриманих виразів (3.3), (3.5), (3.13) та знайдених значень похибок блоків, основна інструментальна похибка відтворення ЗМП комплексом при довірчій ймовірності 0,95, з урахуванням адитивних і мультиплікативних складових похибок і нормального закону їх розподілення, може бути обчислена за формулою

$$\delta_{o_{AK}} = 1,4 \sqrt{\left[ \left( \delta_{K_{B_u}}^2 + \delta_{\Phi G}^2 + \delta^2 \right) + \left( \delta_{K_n}^2 + \delta_T^2 \right) \right]}, \quad (3.14)$$

де:

$\delta_{K_{B_u}}$  - похибка визначення сталої  $K_{B_u}$  для даного виду МП;

$\delta_{\Phi G}$  - похибка заданого значення  $U_{вих}$  сигналу ФГ;

$\delta_3$  - похибка впливу МП Землі і його варіації;

$\delta_{K_n}$  - похибка визначення коефіцієнта передачі ПБ;

$\delta_T$  - похибка, через зміну параметрів навколишнього середовища.

З рівнянь (3.13), (3.14) виходить, що для досягнення похибок відтворення нормованої форми (0,5–1%) і діючого значення магнітної індукції (0,5%), необхідно забезпечити похибку завдання амплітуди і частоти ФГ  $\leq 0,1\%$ , похибку коефіцієнта передачі ПБ  $\leq 0,05\%$ , похибку

відхилення від номінального значення сталої  $K_{B_u}$  котушки за магнітною індукцією і зразкового резистора  $\leq 0,1\%$  .

### 3.2. Оцінка стійкості комплексу АКВЗМП

АКВЗМП в загальному вигляді являє собою одноконтурну замкнену систему. На рис. 3.4 зображено його узагальнену схему. Враховуючи наявність цифрової системи керування в структурі АКВЗМП і лінійність навантажувального ланцюга, такі джерела можна віднести до лінійних імпульсних автоматичних систем, що складаються з дискретної і приведеної безперервної частини [95]. До дискретної частини відноситься контур керування функціонального генератора, що складається з компаратора  $K_m$  і керованого елемента (КЕ), що формує необхідні закони зміни  $U(t)$ . Безперервна частина складається з підсилювального блоку і ЗКМІ з необхідними елементами навантажувального ланцюга  $L, R$ .

Визначимо передатну функцію безперервної частини, для чого згорнемо внутрішній контур ЗЗ:

$$W_{B_{E1}}(p) = \frac{K_{E1}}{T_{E1}p + 1}, \quad (3.15)$$

де  $K_{E1}$  - коефіцієнт підсилення еквівалентного ланцюга:

$$K_{E1} = \frac{K}{1 + K\beta_o};$$

$K, \beta_o$  - коефіцієнти передачі підсилювача та ЗЗ;

$T_{E1}$  - стала часу еквівалентного ланцюга, дорівнює

$$T_E = \frac{T_1}{1 + K\beta_o};$$

де  $T_1$  - стала часу розімкненого ланцюга.

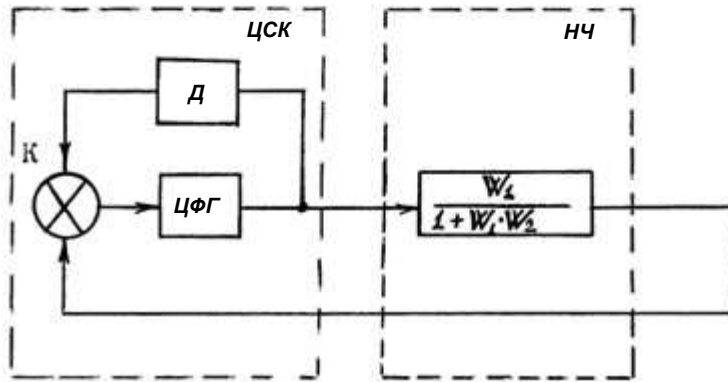
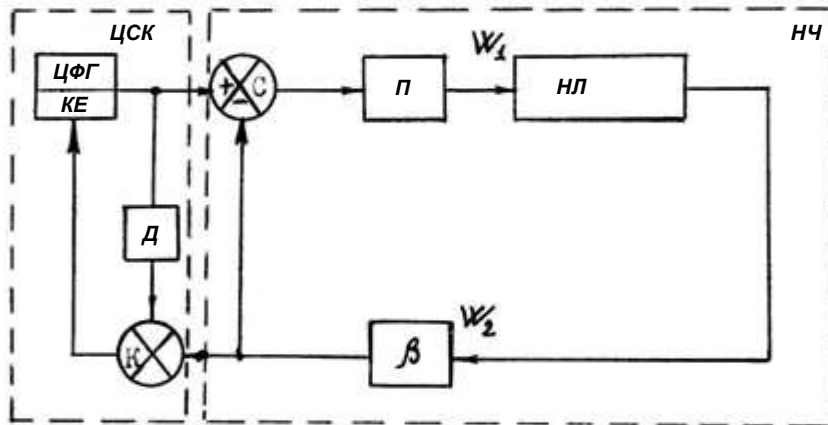
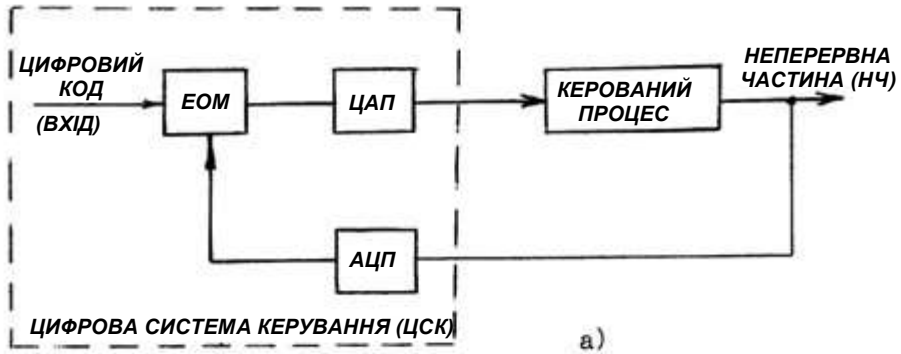


Рис. 3.4. Узагальнена схема АКВЗМП для оцінки стійкості

При включенні ємності  $C$  в навантажувальний ланцюг, для забезпечення коливального режиму струму в ЗКМІ, передатна функція безперервної частини має вигляд

$$W_{BE}(p) = \frac{K_E}{T_E^2 p^2 + 2\xi_E T_E p + 1}, \quad (3.16)$$

де:  $T_E$  - стала часу еквівалентного ланцюга, дорівнює

$$T_E = \frac{T_1}{\sqrt{1 + K\beta_o}}; \quad (3.17)$$

$\xi_E$  - стала затухання еквівалентного ланцюга, дорівнює

$$\xi_E = \frac{\xi}{\sqrt{1 + K\beta_o}}; \quad (3.18)$$

$\xi$  - стала затухання розімкненого ланцюга, дорівнює

$$\xi = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (3.19)$$

Передатну функцію автоматизованого комплексу можна подати у вигляді:

$$G(p) = \frac{K_E}{P(T_E^2 p^2 + 2\xi_E T_E p + 1)}. \quad (3.20)$$

При імпульсних впливах раціональніше використовувати Z-перетворювання. Передатну функцію в  $p$ -формі перетворимо в передатну функцію в Z-формі. Для цього помножимо чисельник і знаменник на  $p^{-3}$  і перейдемо до зображення в Z-області, використовуючи методику [64]

$$G(z) = \frac{1}{T} \cdot \frac{\frac{T^3}{2} K_E \left[ \frac{z^{-1} + z^{-2}}{(1 - z^{-1})^3} \right]}{T_E^2 + 2\xi_E T_E \frac{T}{2} \cdot \frac{(1 + z^{-1})}{1 - z^{-1}} z^{-1} + \frac{T^2}{12} \frac{1 + 10z^{-1} + z^{-2}}{(1 - z^{-1})^2}}. \quad (3.21)$$

Розв'язуючи це рівняння, отримаємо

$$G(z) = \frac{1}{(1 - z^{-1})} \cdot \frac{6T^2 K_E (z^{-1} + z^{-2})}{\left[ z^{-2} (T^2 + 12T_E^2 - 12\xi_E T_E T) + z^{-1} (10T^2 - 24T_E^2) + (12T_E^2 + 12\xi_E T_E T + T^2) \right]}. \quad (3.22)$$

Перетворимо рівняння:

$$(12T_E^2 + 12T_E \xi_E T + T^2) z^2 + (10T^2 - 24T_E^2) z + 12T_E^2 - 12T_E T + T^2 = 0 \quad (3.23)$$

до вигляду:

$$z^2 + \frac{10T^2 - 24T_E^2}{12T_E^2 + 12T_E \xi_E T + T^2} z + \frac{12T_E^2 - 12\xi_E T_E T + T^2}{12T_E^2 + 12T_E T \xi_E + T^2} = 0. \quad (3.24)$$

Для аналізу стійкості скористаємося критерієм Шур-Кона, з якого виходить, що для характеристичних рівнянь другого порядку виконуються наступні співвідношення [96]

$$a_0 z^2 + a_1 z + a_2 = 0$$

$$|D(0)| = b = z_1; \quad z_2 < 1, \quad D(1) > 0, \quad D(-1) > 0. \quad (3.25)$$

Враховуючи, що для багаточлена другого ступеня

$$\begin{aligned} a_0 - a_2 > 0 & & & 1 - \frac{a_2}{a_0} > 0 \\ a_0 + a_1 + a_2 > 0 & \text{при } a_0 > 0 & & 1 + \frac{a_1}{a_0} + \frac{a_2}{a_0} > 0 \\ a_0 - a_1 + a_2 > 0 & & & 1 - \frac{a_1}{a_0} + \frac{a_2}{a_0} > 0 \end{aligned}$$

Підставляємо в систему рівнянь їх значення з рівняння (3.24)

$$\left. \begin{aligned} 1 - \frac{12T_E^2 - 12\xi_E T_E T + T^2}{12T_E^2 + 12\xi_E T_E T + T^2} > 0 \\ 1 + \frac{10T^2 - 24T_E^2}{12T_E^2 + 12\xi_E T_E T + T^2} + \frac{12T_E^2 - 12\xi_E T_E T + T^2}{12T_E^2 + 12\xi_E T_E T + T^2} > 0 \\ 1 - \frac{10T^2 - 24T_E^2}{12T_E^2 + 12\xi_E T_E T + T^2} - \frac{12T_E^2 - 12\xi_E T_E T + T^2}{12T_E^2 + 12\xi_E T_E T + T^2} > 0 \end{aligned} \right\}. \quad (3.26)$$

Розв'язуючи перше рівняння цієї системи і підставляючи значення параметрів  $T_E$  і  $\xi_E$  з виразів (3.17) і (3.18), отримаємо

$$\frac{12T_E^2 - 12\xi_E T_E T + T^2}{12T_E^2 + 12\xi_E T_E T + T^2} < 1. \quad (3.27)$$

Помноживши обидві частини нерівності на знаменник і перетворивши обидві частини, отримаємо

$$-\frac{1}{1 + K\beta_o} < \frac{1}{1 + K\beta_o}. \quad (3.28)$$

Звідси граничне значення узагальненого коефіцієнта підсилення  $K_{ГР_1} = 1/(K\beta_o)$ , при  $K\beta_o \gg 1$  буде

$$K_{ГР_1} > 0. \quad (3.29)$$

З другого рівняння системи отримаємо:

$$12T_E^2 + 12\xi_E T_E T + T^2 + 10T^2 - 24T_E^2 + 12T_E^2 - 12\xi_E T_E T + T^2 > 0 \quad (3.30)$$

$$12T^2 > 0.$$

Дана нерівність справедлива при будь-якому значенні  $T$ , окрім  $T = 0$ .

Третю нерівність перетворимо до вигляду:

$$48T_E^2 - 8T^2 > 0. \quad (3.31)$$

Підставляючи значення  $T_E$  з формули (3.17)

$$6 > \left( \frac{T}{T_0} \right)^2 (1 + K\beta_0).$$

Тоді, друге граничне значення узагальненого коефіцієнта підсилення

$$K_{GP_2} = K\beta_0,$$

дорівнює:

$$K_{GP_2} < \frac{6}{\left( \frac{T}{T_0} \right)^2} - 1. \quad (3.32)$$

Область стійкості в площині параметрів  $(K, T/T_0)$  знаходиться між лініями, описаними рівняннями (3.29) і (3.30).

Використовуючи отримані нерівності (3.30) та (3.32), побудуємо межі областей стійкості, враховуючи, що  $T = \Delta t$  - крок дискретизації,  $T_0 = \tau$  - стала часу навантажувального ланцюга. На рис. 3.5 зображені межі областей стійкості автоматизованого комплексу відтворення ЗМП на площині фізичних параметрів, таких як відношення кроку дискретизації до сталої часу вихідного ланцюга  $\Delta t / \tau$  і добутку коефіцієнта підсилення  $K$  на коефіцієнт ЗЗ  $\beta_0$ .

Для таких джерел зі зростанням тривалості кроку дискретизації або зі зменшенням сталої часу  $\tau$  вихідного ланцюга, при співмірності її зі значенням тривалості кроку  $\Delta t$ , узагальнений коефіцієнт підсилення стає малим і мінімальне значення прагне до нуля [97]. При

$$K_{GP_2} < \lim_{T \rightarrow 0} \frac{6}{\left( \frac{T}{T_0} \right)^2} - 1$$

АКВЗМП стійкий при всіх значеннях  $T$  і  $T_0$  і дискретні системи можна розглядати як безперервні.

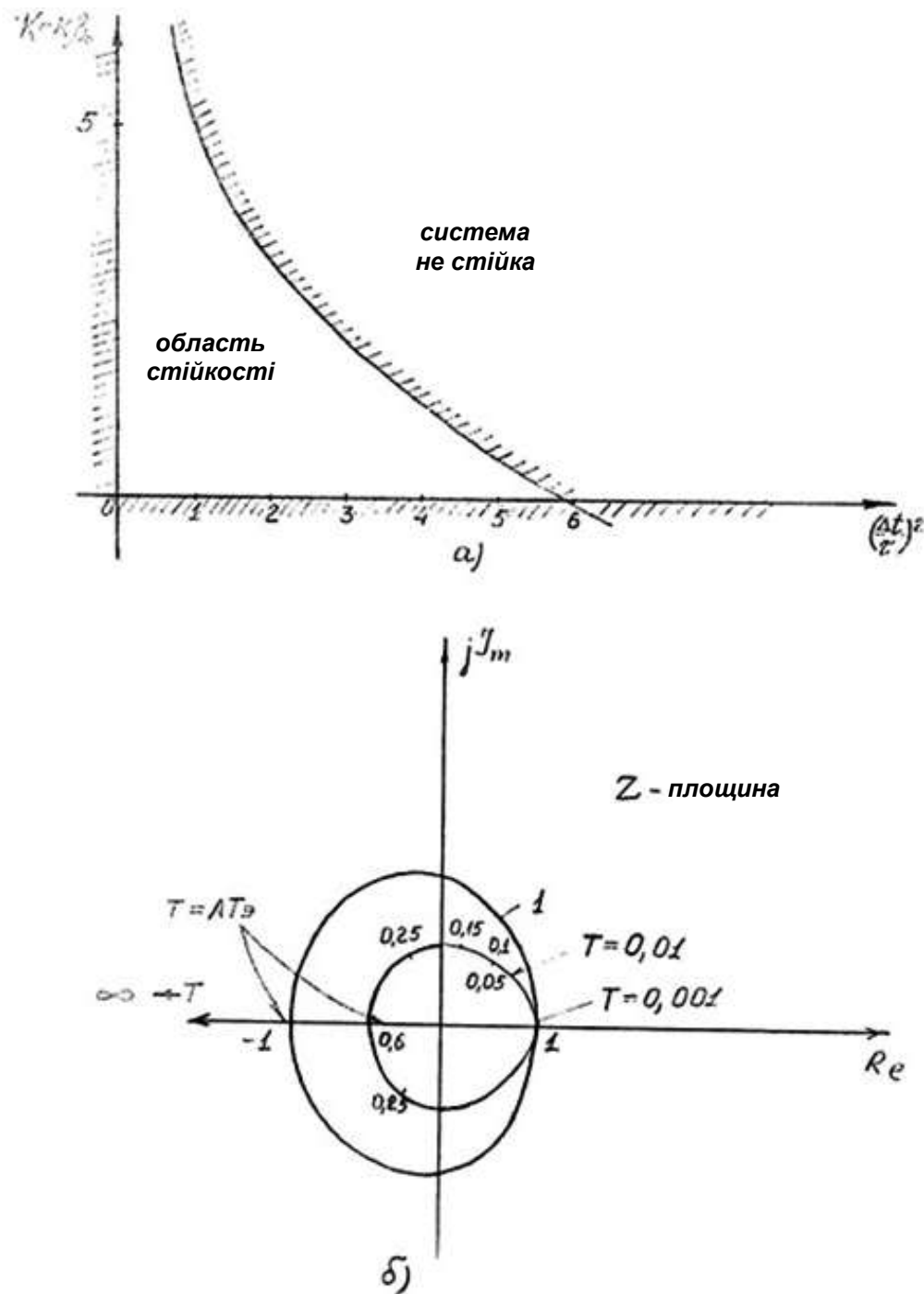


Рис. 3.5. Межі областей стійкості АКВЗМП на площині фізичних параметрів, таких як відношення кроку дискретизації до сталої часу вихідного ланцюга  $\Delta t / \tau$  і добутку коефіцієнта підсилення  $K$  на коефіцієнт  $\beta_0$ .

Для перевірки області стійкості знайдемо корені характеристичного рівняння ( 3.24)



$$\begin{aligned}
z_1 = & -\frac{10T^2 - 24T_E^2}{2(12T_E^2 + 12\xi_E T_E T + T^2)} + \\
& + \sqrt{\left[ \frac{10T^2 - 24T_E^2}{2(12T_E^2 + 12\xi_E T_E T + T^2)} - \frac{12T_E^2 - 12\xi_E T_E T + T^2}{12T_E^2 + 12\xi_E T_E T + T^2} \right]}, \\
z_2 = & -\frac{10T^2 - 24T_E^2}{2(12T_E^2 + 12\xi_E T_E T + T^2)} - \\
& - \sqrt{\left[ \frac{10T^2 - 24T_E^2}{2(12T_E^2 + 12\xi_E T_E T + T^2)} - \frac{12T_E^2 - 12\xi_E T_E T + T^2}{12T_E^2 + 12\xi_E T_E T + T^2} \right]}.
\end{aligned} \tag{3.33}$$

При всіх значеннях  $K\beta_o$ ,  $T$ ,  $T_o$ , що не виходять за межі області стійкості, корені  $z_1$  і  $z_2$  за модулем менше одиниці і знаходяться всередині одиничного кола, тобто виконуються критерії абсолютної стійкості для дискретних систем  $\{|z_1|, |z_2|\} < 1$ .

Визначимо діапазон стійкості за параметром  $T = \Delta t$ , що дорівнює тривалості кроку дискретизації і побудуємо кореневий годограф. Для характеристичного рівняння (3.24) при заданих значеннях  $T_E = T_{E_o}$  і  $\xi_E = \xi_{E_o}$ , використовуючи критерій стійкості Джюри, знаходимо діапазон стійкості АКВЗМП за параметром  $T$ , перетворивши рівняння (3.24)

до виду

$$a_o z^2 + a_1 z + a_2 = 0,$$

де

$$a_o = 12T_{E_o}^2 + 12T_{E_o} T \xi_{E_o} + T^2,$$

$$a_1 = 10T^2 - 24T_{E_o}^2,$$

$$a_2 = 12T_{E_o}^2 - 12T_{E_o} T \xi_{E_o} + T^2.$$

Критерій стійкості для рівняння другого порядку має вигляд:

$$a_2^2 - a_o^2 < 0,$$

$$(a_2^2 - a_o^2)^2 - a_1^2 (a_2 - a_o) > 0.$$

Розв'яжемо систему рівнянь відносно  $T$

$$(12T_E^2 - 12\xi_E T_E T + T^2) - (12T_E^2 + 12\xi_E T_E T + T^2) < 0.$$

Позначивши ліву частину нерівності через  $A$  отримаємо 2-ге рівняння системи

$$A^2 - (10T^2 - 24T_E^2)^2 \cdot (12T_E^2 - 12\xi_E T_E T + T^2 - 12T_E^2 - 12\xi_E T_E T - T^2) > 0.$$

Згрупуємо доданки першого рівняння системи

$$\left[ (12T_E^2 + T^2) - 12\xi_E T_E T \right]^2 - \left[ (12T_E^2 + T^2) + 12\xi_E T_E T \right]^2 < 0.$$

Звівши в квадрат та розкриваючи дужки, отримаємо

$$-48\xi_E T_E T (12T_E^2 + T^2) < 0.$$

Тоді система рівнянь запишеться у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} -48\xi_E T_E T (12T_E^2 + T^2) < 0 \\ \left[ -48\xi_E T_E T (12T_E^2 + T^2) \right]^2 - (-24\xi_E T_E T)^2 \cdot (10T^2 - 24T_E^2)^2 > 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.34)$$

Перетворивши друге рівняння

$$2304\xi_E^2 T_E^2 T^2 (12T_E^2 + T^2)^2 - 576\xi_E^2 T_E^2 T^2 (10T^2 - 24T_E^2)^2 > 0.$$

Отримаємо  $576\xi_E^2 T_E^2 T^2 (96T_E^2 T^2 + 480T_E^2 T^2 - 96T^4) > 0$ .

Звідси нерівність буде виконуватися, якщо

$$576T_E^2 T^2 - 96T^4 > 0.$$

Розв'яжемо цю нерівність відносно  $T$

$$96T^2 (6T_E^2 - T^2) > 0.$$

Звідси виходить, що

$$6T_E^2 - T^2 > 0,$$

Коли

$$T^2 < 6T_E^2$$

або

$$T < \frac{T_o \sqrt{6}}{\sqrt{1 + K \beta_o}}. \quad (3.35)$$

Таким чином, комплекс буде стійким, якщо крок дискретизації  $\Delta t = T$  буде знаходитись в діапазоні

$$0 < T < T_E \sqrt{6} = 2,4495 \cdot T_E. \quad (3.36)$$

На рис. 3.5б зображено кореневий годограф, побудований шляхом задання значень  $T$  і розв'язання рівнянь (3.24), тому що звичний спосіб побудови кореневого годографу не прийнятний через те, що параметр  $T$  входить нелінійно (як  $T^2$ ) в даному рівнянні.

Визначимо перехідну характеристику для такого прецизійного джерела в залежності від значення кроку дискретизації  $\Delta t$ . Для безперервної системи, що описується рівнянням виду

$$T_E^2 p^2 + 2\xi_E T_E p + \frac{1}{a} = K_E [1(t)], \quad (3.37)$$

де

$$T_E = \frac{T_o}{\sqrt{1 + K}},$$

$$\xi_E = \frac{\xi}{\sqrt{1 + K}},$$

$$T_o = \sqrt{LC},$$

$$a = \frac{1}{LC} = \omega^2.$$

При впливі ступінчастого збуджуючого сигналу  $K_E [1(t)]$ , перехідна характеристика буде дорівнювати [76]

$$h(t) = K_E + C e^{-\xi_E \frac{\Delta t}{T_E}} \sin \left( \frac{\Delta t}{T_E} \sqrt{1 - \xi_E^2} + \varphi \right). \quad (3.38)$$

Визначимо початкові умови при  $t=0$  і візьмемо похідну від функції  $h(t)$ :

$$h(0) = K_E + C \sin \varphi, \quad (3.39)$$

$$h'(0) = -\xi_E \sin \varphi + \sqrt{1 - \xi_E^2} \cos \varphi. \quad (3.40)$$

Тоді

$$C = -\frac{K_E}{\sin \varphi},$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sqrt{1 - \xi_E^2}}{\xi_E}.$$

Звідси, враховуючи, що  $\sin \varphi = \sqrt{1 - \xi_E^2}$ ,  $\cos \varphi = \xi_E$ , отримаємо перехідну характеристику для комплексу АКВЗМП:

$$h(t) = K_E \cdot \left[ 1 - \frac{e^{-\frac{\xi \Delta t}{\sqrt{1+K\beta_o}} \omega_{cs}}}{\sqrt{1 - \frac{\xi^2}{1+K\beta_o}}} \sin \left( \omega_{cs} \sqrt{1 - \frac{\xi^2}{1+K\beta_o}} \Delta t + \arccos \frac{\xi}{\sqrt{1+K\beta_o}} \right) \right] \quad (3.41)$$

На рис. 3.6 зображені перехідні характеристики при різноманітних  $\Delta t$  і  $\xi_E$ ,  $\omega_{cs}$ , що дорівнює

$$\omega_{cs} = \frac{1}{T_E}$$

Перепишемо рівняння у вигляді

$$h(t) = \frac{\xi \cdot e^{-\frac{\xi \Delta t}{T_o}}}{\sqrt{\xi^2 - (1+K\beta_o)}} \sin \left[ \frac{\Delta t}{T_o} \sqrt{1+K\beta_o - \xi^2} + \arccos \frac{\xi}{\sqrt{1+K\beta_o}} \right] \quad (3.42)$$

Перший максимум перехідної характеристики визначається зі значення першої похідної рівняння (3.41) за часом  $t$ .

Прирівнявши його до нуля, отримаємо

$$\Delta t = t_{\max_1} = \frac{T_o}{\sqrt{1+K\beta_o - \xi^2}} = \frac{T_o}{\sqrt{1 - \frac{\xi^2}{1+K\beta_o}}}. \quad (3.43)$$

Підставляючи значення  $t_{\max_1}$  в рівняння (3.42), отримаємо відносне значення приросту магнітної індукції

$$b = e^{-\frac{T_o}{2\sqrt{1+K\beta_o - \xi^2}}}. \quad (3.44)$$

Нормалізовану частотну характеристику для замкнених систем зі ЗЗ, які мають передатну функцію (3.38), подамо у вигляді [52]:

$$W(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{f^2}{f_E^2}\right)^2 + 4\xi_E^2 \frac{f^2}{f_E^2}}}$$

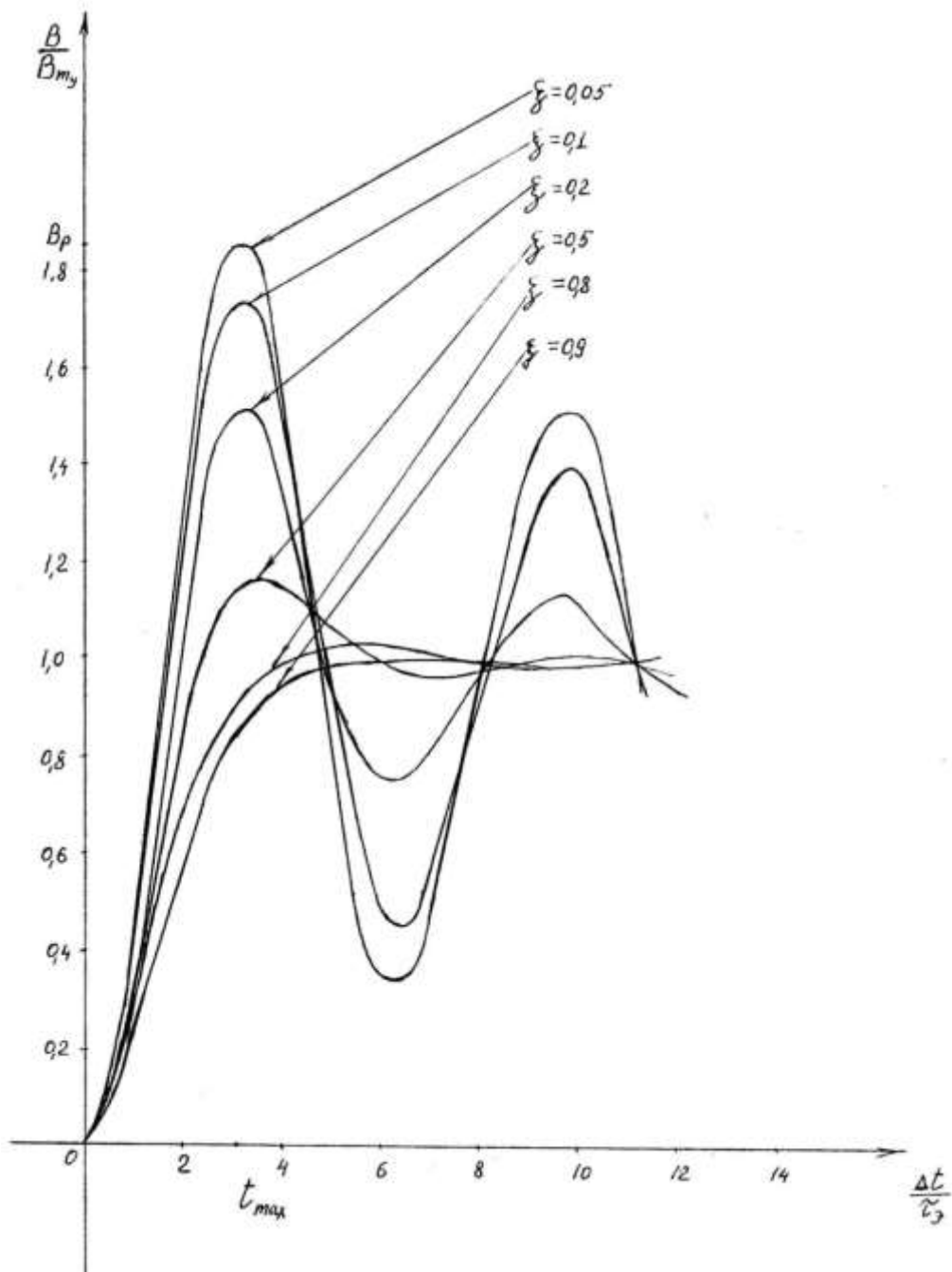


Рис. 3.6. Перехідні характеристики при різноманітних  $\Delta t$

і  $\xi_E$ ,  $\omega_{c6}$ , що дорівнює  $\omega_{c6} = \frac{1}{T_E}$

Для максимальних зростаючих ділянок, які відповідають значенням  $\xi \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,707$ , резонансний пік дорівнює

$$B_p = \frac{1}{2\xi\sqrt{1+K\beta_o-\xi^2}}, \quad (3.45)$$

при частоті резонансу

$$F_p = f_o\sqrt{1+K\beta_o-\xi^2}. \quad (3.46)$$

Тоді, запас стійкості за фазою для систем другого порядку дорівнює [77]:

$$\Phi_m = \frac{\pi}{2} - \text{arctg}\left(\frac{f_c}{F_p}\right),$$

де

$$f_c = \frac{f_o}{\sqrt{\sqrt{4\xi^4+1}+2\xi^2}}$$

Звідси, запас стійкості для досліджуваного автоматизованого комплексу

$$\Phi = \frac{\pi}{2} - \text{arctg}\left(\frac{1}{\frac{2\xi}{\sqrt{1+K\beta_o}} \sqrt{\sqrt{4\frac{\xi^4}{(1+K\beta_o)^2}+1} + \frac{2\xi}{1+K\beta_o}}}\right).$$

Перетворимо знаменник аргументу, тоді запас стійкості буде відповідати виразу

$$\Phi = \frac{\pi}{2} - \text{arctg}\left(\frac{1}{\frac{2\xi}{1+K\beta_o} \sqrt{\sqrt{4\xi^4+(1+K\beta_o)^2}+2\xi^2}}\right). \quad (3.47)$$

Для прецизійного джерела АКВЗМП з параметрами вихідного ланцюга  $\xi_E$ ,  $\tau_o$  значення показників відносної стійкості наведено в табл. 3.1.

Таким чином, для АКВЗМП з замкненою структурною схемою, що представляє собою дискретну систему керування, встановлені області стійкості і визначені: запаси стійкості за підсиленням, фазою, а також оптимальні співвідношення для кроку дискретизації при відтворенні ЗМП різноманітних форм [98].

Таблиця 3.1.

Показники відносної стійкості АКВЗМП.

Коефіцієнт затування, $\xi_E$	Запас стійкості за фазою, $\Phi$ град.	Відносний приріст, $b$ %	Час досягнення першого максимуму, $t_{\max_1}$ с, при $\tau_o = 8 \cdot 10^{-3}$ с
0,05	5,72	85,45	$5,006 \cdot 10^{-4}$
0,1	11,42	72,92	$5,009 \cdot 10^{-4}$
0,2	22,60	52,66	$5,109 \cdot 10^{-4}$
0,3	33,27	38,97	$5,248 \cdot 10^{-4}$
0,4	46,88	25,38	$5,462 \cdot 10^{-4}$
0,5	51,83	16,30	$5,780 \cdot 10^{-4}$
0,6	59,19	9,48	$6,258 \cdot 10^{-4}$
0,7	67,66	4,60	$7,009 \cdot 10^{-4}$
0,8	69,86	1,52	$8,343 \cdot 10^{-4}$
0,9	73,51	0,15	$1,148 \cdot 10^{-3}$
1,0	76,35	0	-

На основі проведених досліджень можемо зробити висновки:

1. Досліджені інструментальні похибки АКВЗМП і показано, що похибка комплексу суттєво залежить від похибки ЗКМІ, особливо від її температурної стабільності.

2. Оцінена основна похибка відтворення необхідної форми ЗМП АКВЗМП. Показано, що на основну похибку відтворення суттєво впливає: похибка зразкового резистора, похибка визначення сталої  $K_{B_u}$  за магнітною індукцією для даного виду поля, нестабільність

відтворюваних значень сигналу  $U(t)$  ФГ і непостійність коефіцієнта перетворення  $K_n$  підсилювального блоку.

3. Отримані рівняння основної похибки АКВЗМП  $B(t)$ , що дозволило прогнозувати очікуване значення похибки в різноманітних режимах роботи АКВЗМП.

4. Виконаний аналіз стійкості для АКВЗМП з замкненою структурною схемою. Встановлено, що комплекс спроектовано з запасом стійкості за модулем і фазою. Досліджена область стійкості в площині параметрів  $(K, \Delta t / T)$ . Визначений оптимальний діапазон тривалості кроку дискретизації  $\Delta t$  в залежності від сталих часу навантажувальних ланцюгів АКВЗМП. Встановлені і досліджені запаси стійкості за узагальненим коефіцієнтом підсилення  $K$  і фазою  $\Phi$ . Проведено порівняння теоретичних і експериментальних даних за запасом стійкості для АКВЗМП, показано близький збіг результатів.



## РОЗДІЛ IV

### МЕТОДИ І ЗРАЗКОВІ ЗАСОБИ ПОВІРКИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ ВІДТВОРЕННЯ ЗМІННИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ

#### 4.1 Сучасний стан метрологічного забезпечення засобів відтворення змінних магнітних полів різноманітних форм

Оснoву метрологічного забезпечення засобів вимірювання ЗСМП складає Державний спеціальний еталон і державна повірочна схема для засобів вимірювання напруженості імпульсних електричних і магнітних полів (ДСТУ ГОСТ 8.540: 2009). Але цей еталон відтворює тільки експоненціальну форму імпульсу МП з тривалістю фронту не більше  $t_{\phi} = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ c}$ , на рівні (0,1–0,9) максимального значення імпульсу  $H_M$  і сталої часу спаду не менше  $t_c = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ c}$ , у вузькому динамічному діапазоні 25–250 А/м. Нормування параметрів зразкових і робочих мір напруженості ІМП відбувається тільки на вершинах імпульсу за допомогою компаратора максимальної напруженості ІМП з відносною похибкою 3–15%. Тому даний еталон не дозволяє атестувати засоби відтворення і вимірювання форми ІМП, відмінної від експоненти в широкому динамічному діапазоні слабких і середніх МП.

В роботах [70,99] розглянута установка для повірки тесламетрів ІМП, яка забезпечує нормування максимальних значень  $B_m$  магнітної індукції періодичних імпульсів тільки на вершині і яка відтворює з похибкою 0,5% максимальне значення імпульсів магнітної індукції в вузькому динамічному діапазоні від 0,5 до 5 мТл, тривалістю 0,5-25 мс і частотою повторення 20-1000 Гц. Ця установка не забезпечує можливості повірки тесламетрів ЗМП різноманітних форм. В НВО «ВНДІФТРВ» розроблена зразкова міра сильних ІМП, яка нормує максимальне значення магнітної індукції квазіпрямокутного імпульсу [100].

Таким чином, до цього часу в державі були відсутні атестовані зразкові міри ЗМП, які дозволяли б відтворювати з високою точністю несинусоїдальні і імпульсні МП різноманітних форм в широкому динамічному та частотному діапазонах (див. табл.4.1). Проведемо порівняльний аналіз існуючих методів повірки джерел ЗМП з метою створення зразкових засобів ЗМП.

Методи повірки джерел ЗМП поділяються за способом перевірки значень  $B(t)$ : на методи прямого вимірювання зразковим вимірювальним приладом діючого значення  $B_x$  відтворюваного мірою, що повіряється і, методи безпосереднього порівняння значень  $B_x$  міри, що повіряється (ПМ), зі значенням  $B_o$  зразкової міри (ЗМ) того ж виду за допомогою компараторів або вимірювальних приладів (рис. 4.1).

До першої групи можна віднести і метод повірки мір і джерел ЗМП, що ґрунтується на різночасовому звірянні показань зразкового тесламетра в змінному і постійному полях [101-104]. Але цей метод може бути використано лише для повірки мір магнітної індукції квазістаціонарних полів з високою точністю в діапазоні вимірювання зразковим тесламетром ядерного магнітного резонансу, значень індукції. Наступним суттєвим недоліком методу є обмежений частотний діапазон, тривалий час повірки і додаткова похибка, що пов'язана з різночасовістю звір'яння [105-109].

Друга група методів ґрунтується на порівнянні відтворюваних значень  $B_x$  ПМ і  $B_o$  ЗМ. До цієї групи належать методи, що засновані на порівнянні діючих або амплітудних значень магнітної індукції перевірюваної і зразкової мір за допомогою компараторів [110]. Ці методи використовувалися в НВО «ВНДІМ ім. Д. Менделєєва» коли створювались повірочні установки вищої точності для повірки тесламетрів

в змінних і імпульсних полях. Серед цих методів отримали розповсюдження методи різночасового порівняння, а також одночасного порівняння за допомогою двох зустрічно включених перетворювачів магнітної індукції постійного і імпульсного полів, що знайшли своє використання при розробці зразкової повірочної установки 2-го розряду для повірки тесламетрів ІМП.



Таблиця 4.1

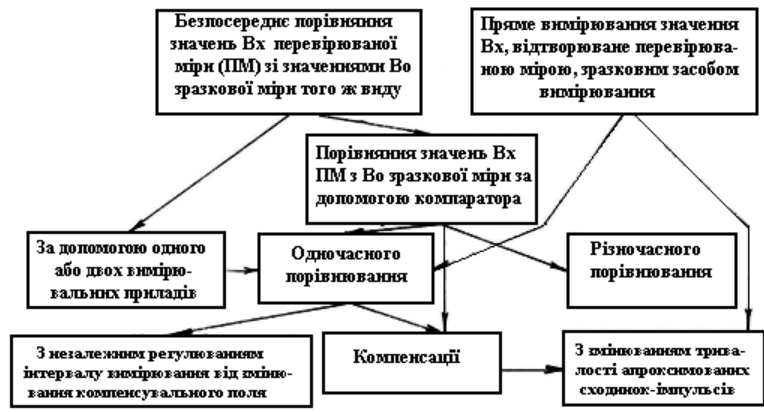
№ п.п	Тип і назва повірочної установки	Країна, підприємство, рік розробки	Метод повірки нормованих параметрів	Тип міри	Діапазон створюваних показників в В, мТл	Частотний діапазон, Гц; тривалість імпульсів, мс	Відтворення і повірки %	Неоднорідність %/см	Форма магнітного поля	Діапазон зміни струму, мА	Робочий об'єм міри, мм	Література
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Установка для наладки і повірки мілітесламетрів змінних магнітних полів У744	СРСР ВНДШЕП 1980	$B = K_B I$ , $K_B$	ОКГ	1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 20, 30 $\frac{B_m}{B_{cp}} \leq 3,3$ , $\frac{1500}{F}$	40, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500 $t_u \geq 1\text{мс}$ , $B_c = 30\text{Тл} / c$	1, 3; 4	0,2÷0,3	Синусоїдальна, спотворена, з коефіцієнтом гармонік до 140% і однополярні імпульси з $K = \frac{B_m}{B_{cp}} \leq 3,14$		10x10x10	[101]
2	Установка для повірки імпульсних тесламетрів	СРСР ВНДІМ 1979	Метод одночасного компарування значень магнітної індукції $B_u$ і $B_o$ ; $B_m$	ОКГ	0,5÷5	20-1000 20-20000 $t_u = 0,5 - 25$	0,5 1,0		-	25-250	-	[99]

Продовження таблиці 4.1

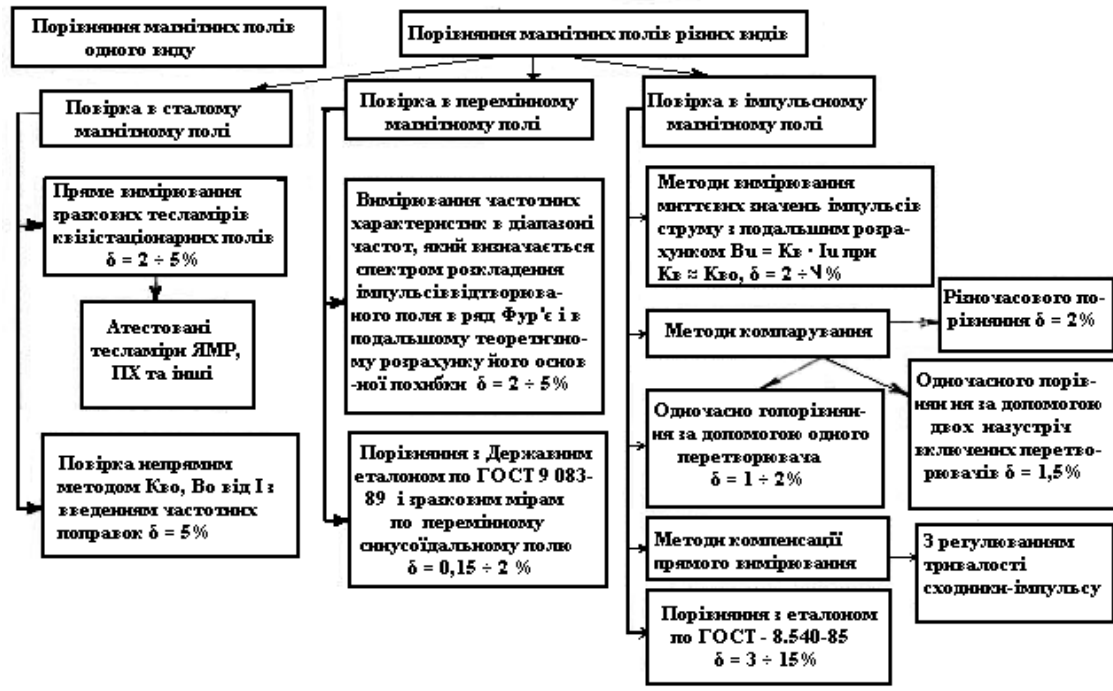
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
3	Установка для перевірки тесламетрів змінних магнітних полів У4356	СРСР ВО «Електрови мірювач», м. Житомир 1977	$B = K_B I$ , $K_B$	ОКГ, електромагніт	0,1÷1 1÷5 5÷1000	20-20000 20-400 20-50	1,0 0,5		синусоїдальна		30х30х4	[102]
4	Установка У739	СРСР ВНДІЕП	$B = K_B I$ , $K_B$	ОКГ	$10^{-4} \div 10$	$20 - 2 \cdot 10^4$	1,5÷3	0,2	синусоїдальна		10х10х1	[101]
5	УПМИ №1	СРСР ВНДІМ 1975	розрахунк овий, $K_B$	соленоїд	$1 \cdot 10^{-4} \div$ $3 \cdot 10^{-3}$ $T / A$	1-10000	0,5		синусоїдальна			[101]
6	Установка У747	СРСР ВНДІЕП 1979	-	соленоїд	1÷1300	1-1000	1,5÷5	2	синусоїдальна		30х30х2	[101]
7	Робочий еталон за ГОСТ 8.093-80, який раніше діяв в Україні	СРСР ВНДІМ 1983	розрахунк овий, $K_B, B_s$	ОК	$1 \cdot 10^{-3} \div$ $50 / F$ , $Tл$	45-1000	0,1		синусоїдальна			[64]

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
8	Державний спец. еталон за ГОСТ 8.540-85, який раніше діяв в Україні	СРСР ОФИ 1985	розрахунко вий, $B_m$	ЮК	$25 \div 250$ А/м	$1,5 \cdot 10^{-8} c$ $1,4 \cdot 10^{-8} c$	$0,4 \div$ 3		експоненціальна			[56]
9	Зразкова міра	СРСР ВНДІФТРІ 1989	-	ОК, соленоїд	$(1-13) \cdot 10^3$	$(3,3 \div 5) \cdot 10^{-3}$	1,5		-			[100]
10	АКВЗМП	СРСР ІЕД АН УРСР 1985	розра- хунково- дослідний, $B_d$	ОКГ	$0,5 \div 5$		1,5		Синусоїдальна, експоненціальна, пилкоподібна, трапецієподібна та інші		-	[118]
11	АКВЗМП-М	СРСР ІЕД АН УРСР 1988	-	-	$0,1 \div 10,0$		0,5		-		-	[108]



a)



б)



в)

Рис. 4.1. Методи повірки мір та джерел ЗМП: а) за способом порівнювання та вимірювання  $V_x$   $V_o$ ; б) за видом (закон зміни МП в часі); в) за використуваними методами вимірювання

Метод одночасного порівняння ґрунтується на підсумовуванні індукції із зустрічно спрямованими векторами полів в секціонованій ЗКМІ, стала  $K_B$ , якої попередньо визначена за постійним полем, а результуюче поле виникає внаслідок одночасного пропускання постійного  $I_0$  і імпульсного  $I(t)$  струмів по мірі [111]. Потім регулюють значення магнітної індукції одного з полів до отримання нульового амплітудного значення магнітної індукції різницевого поля. Для підвищення точності вимірювань, при майже плоскій вершині імпульсу, використовується незалежне регулювання часу  $t_3$  затримки інтервалу,  $t_{вим}$  вимірювання, відносно початку імпульсу магнітної індукції від вимірювання значення магнітної індукції  $B_K$  компенсуючого поля. Але такий метод не дозволяє повірити складні форми періодичних і поодиноких імпульсів, а також вимагає більшого часу для перевірки періодичного ІМП. Основні регулювальні операції здійснюються оператором-метрологом, що призводить до похибки перевірки від спостереження і порівняння [70].

Наступна група методів перевірки джерел ЗМП ґрунтується на компенсації діючого значення  $B_D$  магнітної індукції змінного поля  $B(t)$  різноманітної форми сталим МП  $B_0$  зразкової котушки [112]. Але ці методи не дозволяють оцінити форму ЗМП.

Способи перевірки, що ґрунтуються на даному методі, в порівнянні з відомими способами одночасного компарування зустрічно направлених полів імпульсного повірюваного джерела і з джерелом зразкового постійного поля, переважають їх широкими функціональними можливостями. Більш універсальний метод перевірки ПДЗМП, запропонований в ІЕД НАН України, базується на прямому вимірюванні кожного дискретного рівня  $B(KT)$  індукції дискретизованої форми  $B(t)$  зразковим тесламетром постійного поля, шляхом збільшення тривалості кожного дискретного рівня індукції до значення  $t_0$ , що не менше часу її вимірювання [113], такими, як можливість оцінки форми несинусоїдальних і імпульсних МП, а також можливістю автоматизації повірочних робіт, що приводить до вилучення похибки спостереження і зменшення похибки порівняння.



За законом зміни магнітної індукції в часі (види) порівнюваних МП, повірки поділяються на методи, що використовують порівняння МП різних видів. Друга група методів, в свою чергу, ділиться на методи повірки, що використовують порівняння магнітних індукцій постійного і змінного полів. До методів повірки ПДЗМП належить метод, що полягає в вимірюванні частотних характеристик міри, що повіряється, в робочому діапазоні частот, який визначається спектром розкладання імпульсів вимірюваного поля в ряд Фур'є і, подальшому теоретичному розрахунку його основної похибки [114]. Похибка методу складає більше  $2 - 5\%$  в діапазоні частот від 1 Гц до 100 Гц [70]. При повірці мір і джерел ЗМП в імпульсному полі, значення магнітної індукції яких розраховується як добуток значень імпульсного струму  $I_u$ , що протікає через міру і сталої  $K_{B_0}$ , за магнітною індукцією, що визначається в постійному струмі з урахуванням частотної поправки [115]. Похибка такого методу більше 5% і він має обмежене використання.

За використовуваними методами вимірювання, методи повірки поділяються на методи, які використовують прямі порівняння з однотипною величиною і опосередковані. Друга група методів поділяється на методи повірки, що ґрунтуються на теоретичних розрахунках змінної міри магнітної індукції (ЗММІ) [70] і на порівнянні з іншими величинами, функціонально залежними від тих, що повіряються [116].

Серед розглянутих методів повірки мір і джерел ЗМП поки єдиним і найбільш перспективним методом, з точки зору можливостей оцінки будь-якої форми досягнення високої точності нормування, автоматизації повірки і наявності реальних засобів вимірювання, є запропонований метод повірки з регулюванням тривалості кожної з апроксимованих сходинок-імпульсів магнітної індукції ЗМП [78].

## **4.2 Розробка та дослідження способу метрологічної атестації АКВЗМП**

Теоретичною основою виділеного вище способу повірки є те, що безперервний сигнал, який має спектр  $S(j\Omega)$  на кінцевому інтервалі  $[0, T]$ , можна подати у вигляді дискретних відліків  $B(n\Delta t)$ , що визначаються на підставі теорії континуальних і дискретизуючих сигналів і інтеграла Дюамеля наступним чином [117, 118]:

$$B(n\Delta t) = \Delta t \sum_{x=-\infty}^{\infty} B_x(t) \delta(t - x\Delta t), \quad (4.1)$$

де  $\Delta t$  - значення тривалості рівномірного кроку дискретизації;  
 $\delta(t)$  - дельта – функція.

Тоді, з рівняння (4.1) виходить, що площа дискретизованого сигналу повинна дорівнювати площині ступінчастої функції, що збігається з початковим сигналом  $B_x(t)$  в точках  $t = n \cdot \Delta t / 2$

$$\int_0^T B(n\Delta t) dt = \sum_{x=0}^{N-1} \Delta t \cdot B(x\Delta t). \quad (4.2)$$

З урахуванням рівнянь (4.1) і (4.2), діюче значення дискретно-змінного сигналу  $B(n\Delta t)$  дорівнює

$$B_{\bar{A}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{x=1}^n B^2(x\Delta t)} = \sqrt{\frac{1}{n} (B_{x_1}^2 + B_{x_2}^2 + \dots + B_{x_n}^2)}, \quad (4.3)$$

де  $B_{x_n}$  - вимірне значення магнітної індукції в точках дискретизації;  
 $n$  – кількість ділянок дискретизації.

Для досліджуваного сигналу  $B(t)$  зі спектром  $S(j\omega)$ , при зміні масштабу часу  $\theta = kt$ , перетворений сигнал  $B(\theta)$  має спектр вигляду [105]

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} B(t) e^{-j\omega t} dt = \frac{1}{k} \int_{-\infty}^{\infty} B(\theta) e^{-j\frac{\omega}{R}\theta} d\theta = \frac{1}{k} S\left(j\frac{\omega}{R}\right). \quad (4.4)$$

Перетворений спектр  $S_1(j\omega)$  відрізняється від початкового лише частотним масштабом (часовим інтервалом), тобто повністю зберігається форма сигналу, його діюче значення  $B_{\bar{A}}$  і спектральні складові. Звідси виходить, що в запропонованому способі, при однакової зміні кроку дискретизації всіх вибірок, форма ЗМП не змінюється. Тому даний спосіб метрологічної повірки дозволяє атестувати

АКВЗМП на серійно випущеній магнітовимірвальній апаратурі, тому їх час вимірювання значень індукції відповідає тривалості кроку дискретизації. При тривалості часу вимірювання  $t_{вим}$  індукції  $B_n$ , зразковим тесламетром  $t_{вим} \geq \Delta t > 5\tau$  і роботі АКВЗМП в режимі експоненціально-ступінчастої апроксимації – перевірка кожної сходинки і всієї форми  $B(t)$  відбувається експериментально. Перевірка виконується шляхом багатократних незалежних спостережень, вимірювань значень індукції  $B_n$  сходинок [119].

В режимі кусково-лінійної апроксимації відтворюваних форм ЗМП і кроці дискретизації  $\Delta t < 5\tau \leq t_{вим}$ , перевірка виконується експериментально-розрахунковим методом, шляхом збільшення тривалості кожної сходинки до значення  $t_{Д_n}$  не менше значення часу вимірювання  $t_{вим}$  її індукції  $B_{Д_n}$ . Вимірюють значення індукції  $B_{Д_n}$  кожної зі сходинок. Потім розраховують значення  $B_{Х_p}$  з урахуванням кроку дискретизації  $\Delta t$  за формулою (2.56). За отриманими значеннями будують криву  $B_{Х_{Pn}}$  ЗМП. Накладають отриману криву на форму ЗМП, яка задається. У вузлах дискретизації обчислюються значення  $\Delta B = |B_{Х_p} - B_{Д_n}|$  і визначаються похибки відтворювання, як діючого значення  $\Delta B_{Д}$  ЗМП, так і її форми  $\delta_B$ . За максимальним значенням  $\Delta B$  встановлюється довірчий інтервал  $\Delta$ .

Функціональну схему метрологічної установки (МУ), що реалізує запропонований спосіб, представлено на рис. 4.2.

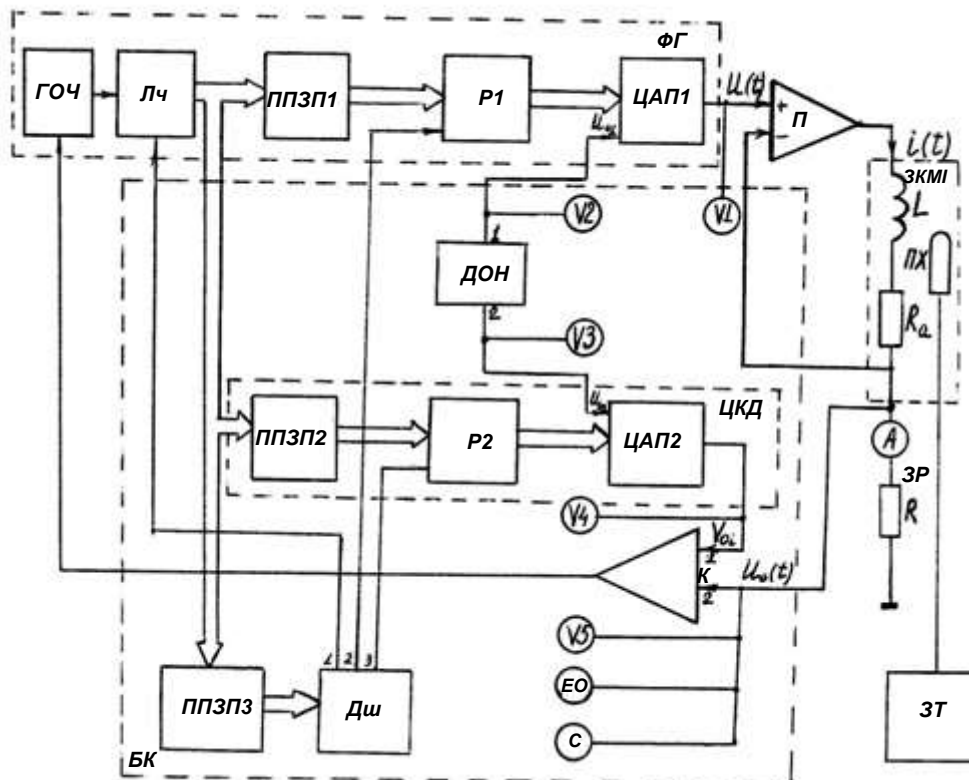


Рис. 4.2. Функціональна схема метрологічної установки (МУ) з кусково-лінійною апроксимацією відтворюваних форм ЗМП

Генератор (ФГ) виконаний на базі персонального комп'ютера і блоків: генератора опорної частоти (ГОЧ), Лч, ППЗУ1, Р, ЦАП1, разом з підсилювальним блоком ПБ, ЗКМІ і блоком керування (БК) в складі компаратора (К), джерела опорної напруги (ДОН), цифрового керуваного діляника (ЦКД) - складають АКВЗМП, що атестується.

До МУ входять: зразковий тесламетр (ЗТ); вимірювальний зонд, вимірювальний перетворювач Холла (ПХ), який знаходиться в робочому об'ємі ЗКМІ; вольтметр V1, що вимірює напругу на виході ФГ; вольтметри V2 і V3, що під'єднані відповідно до виходу ЦКД і зразкового резистора (ЗР), до якого під'єднані і виходи електронного осцилографу (ЕО) і самописця (С).

До ланцюга ЗКМІ і ЗР підключений амперметр А. Вольтметри V4 і V5, відповідно, з'єднані з першим і другим виходом ДОН. При нормуванні кожної сходинки дискретно-змінного поля, збільшується їх тривалість до значення  $t_{\lambda_n}$ , що перевищує час встановлення  $t_{вим}$  процесу вимірювання зразкового тесламетра в 2-3 рази і, вимірюють ці значення

$B_{D_n}$ . Проводять п'ять незалежних рівноточних вимірювань  $B_{D_n}$  і за ними визначається середнє арифметичне  $B_{D_{no}}$  виправлених результатів спостережень, що приймається як результат вимірювань. Тоді, за відомим значенням сталої часу  $\tau$  і відрізків часу  $t_{D_n}$ , з формули

$$B_{D_{np}}(nT) = B_{D_{no}} \left( 1 - e^{-\frac{t_{D_n}}{\tau}} \right), \quad (4.5)$$

обчислюють розрахункові значення  $B_{D_{np}}$ . За отриманими даними будується крива і накладається на форму  $B_T(t)$ , що задається. Зі значень, отриманих в точках дискретизації  $B_{D_{nT}}$ ,  $B_{D_{np}}$ , визначають абсолютну похибку відтворення  $n$ - точки

$$\Delta_n = \left| B_{D_{nT}} - B_{D_{np}} \right|. \quad (4.6)$$

Відносна похибка відтворення індукції

$$\delta_n = \frac{\Delta_n}{B_{D_{no}}} \cdot 100\%. \quad (4.7)$$

Таким чином, виходячи зі значень сталої часу  $\tau$ , тривалість рівня  $\Delta t$  магнітної індукції  $B_{D_n}$ , розрахункового значення  $B_{D_{np}}$  на кожному кроці і значенні  $B_{D_{nT}}$ , що задається в даній точці, можна пронормувати відтворену форму магнітної індукції  $B(t)$  змінного поля.

При умові незалежності кожного вимірювання, середньоквадратична похибка відтворення діючого значення магнітної індукції заданої форми визначається з урахуванням рівнянь (4.3)

$$\Delta_{B_d} = \sqrt{\frac{1}{n} (\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_n^2)}, \quad (4.8)$$

де  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$  - похибки відтворення кожного рівня ЗМП. При рівності  $\delta_1 \square \delta_2 \square \dots \square \delta_n = \delta_o$

$$\Delta_{B_d} = \delta_o. \quad (4.9)$$

Для автоматизації процесу повірки, зменшення похибок спостереження і порівняння в модернізованій установці використовується програмний режим [120]. В такій установці, в якості функціонального генератора використовується багатоцільовий програмований генератор імпульсів, виконаний на базі персонального комп'ютера (рис. 4.3).

Вихід з лічильника (Лч) функціонального генератора підключений до цифрового керованого дільника (ЦКД). Вихід компаратора (К) з'єднаний з входом дешифратора вибору регістра.

Алгоритм роботи такої установки при повірці регульованих мір і джерел магнітної індукції, що відтворюють складні форми ступінчасто-апроксимованих сигналів ЗМП, побудований наступним чином (рис. 4.4).

Блоки:

- 1 - Всі дані записані ?
- 2 - Чи потрібна зміна адреси керування комутатором ?
- 3 - Подача керуючих кодів на регістр (Р), відтворення ступені з великою довжиною, установка порогового рівня ?
- 4 - Чи потрібен аналіз адрес для встановлення терміну затримки в БК?
- 5 - Чи рівні адреси ?
- 6 - Чи "нульовий" рівень сигналу на вх. БК ?
- 7 - Чи "одиничний" рівень сигналу на 1 вх. БК ?
- 8 - Чи потрібен аналіз адрес для зміни інформації в ЗБ ?
- 9 - Чи рівні адреси ?
- 10 - Чи остання зростаюча ступінь ?
- 11 - Чи остання спадаюча ступінь ?
- 12 - Чи остання ступінь дискретизації ?
- 13 - Встановлення рівномірного кроку за найбільшим значенням із встановленою довжиною ступенів ?
- 14 - Чи потрібен перехід на повірку наступної форми ЗМП ?

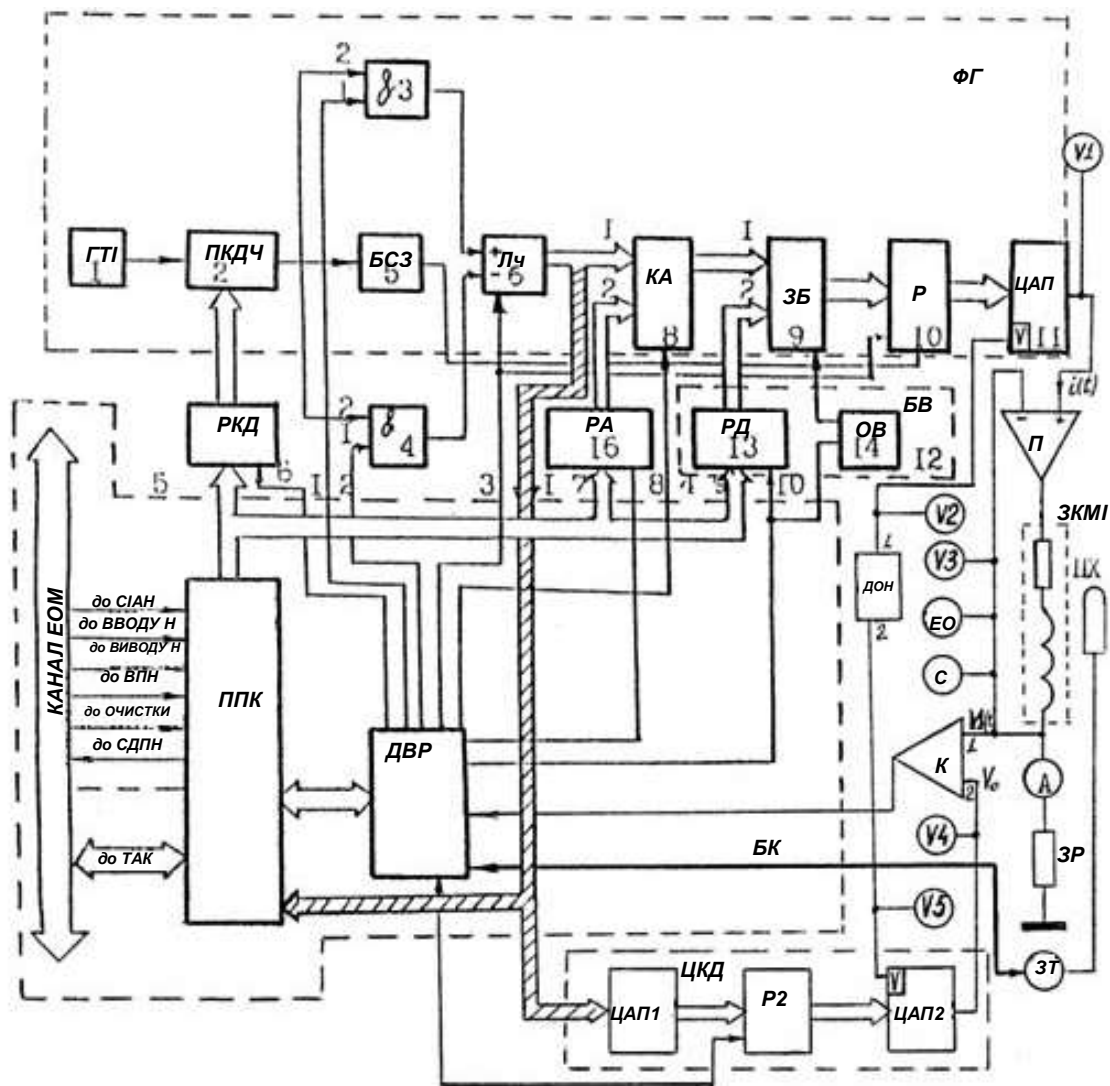
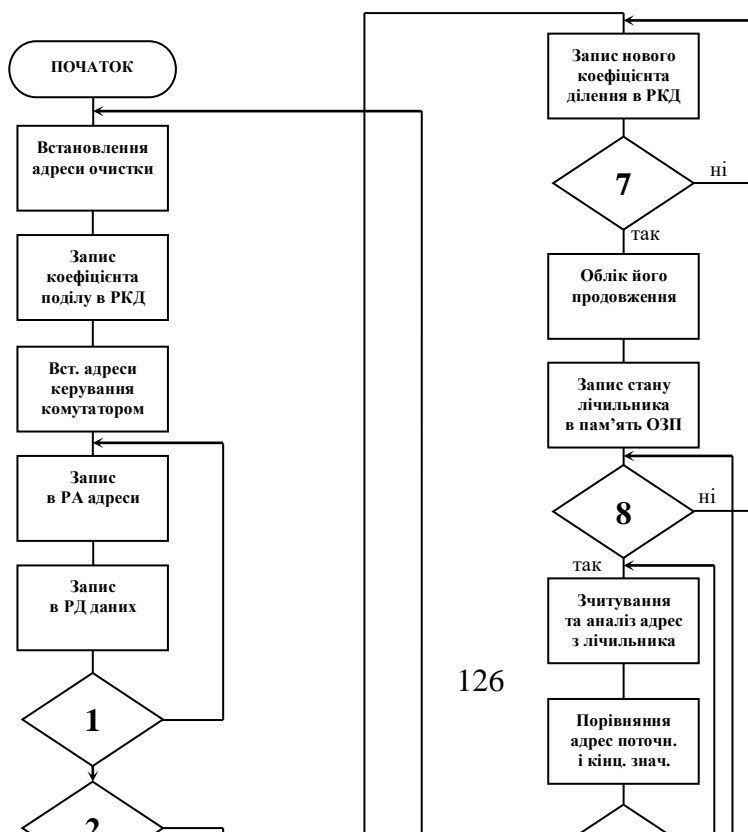


Рис. 4.3. Багатоцільовий програмований генератор імпульсів







об'єму ЗКМІ. Ці складові похибки  $\delta_3$  і  $\delta_{i^*}$  в нормальних умовах експлуатації не перевищують тисячних долей відсотка і не мають суттєвого впливу на основну похибку атестації.

Основна гранична похибка атестації регульованих мір магнітної індукції змінного поля, при довірчій ймовірності  $P=0,96$ , дорівнює

$$\Delta_a = 1,4 \sqrt{(\delta_M)^2 + (\Delta_{B_d})^2 + (\delta_T)^2 + (\delta_{K_B})^2}. \quad (4.10)$$

Підтвердженням правильності запропонованої методики атестації може бути порівняння отриманих результатів при відтворенні значення  $B_{D_s}$  магнітної індукції синусоїдальної форми, з результатами повірки, за якою, для синусоїдального поля  $B_{D_s}$ ,  $\Delta_B$  розраховується за значеннями сталої  $K_{B_0}$  і струму  $I_0$ . Проведена експериментальна повірка підтверджує збіг результатів в межах сотих часток відсотка.

Впровадження запропонованого способу повірки і установки для його реалізації в метрологічну практику держави, дозволило би створити в народному господарстві України метрологічну базу вимірювань несинусоїдальних і імпульсних МП різноманітних форм.

### 4.3. Результати експериментальних досліджень АКВЗМП і методика його метрологічної атестації

При випробуванні АКВЗМП досліджується похибка функціонального генератора, підсилювального блоку і зразкової котушки, атестується стала за магнітною індукцією  $K_{B_0}$  ЗКМІ в постійному полі  $B_0$  і стала  $K_{B_0}$  цієї ж котушки в СММП  $B(t)$ , в діапазоні частот 0,1 - 20000 Гц. За допомогою тесламетра визначається значення сталої магнітної індукції поля Землі і промислових перешкод на підставі багаторазових спостережень і, обчислюється його середньоарифметичне значення [121].

Значення магнітної індукції, яке відтворюється в робочому об'ємі ЗКМІ, можна обчислити з рівняння (2.56) для кожної сходинки. При  $\Delta t \geq 8\tau$ , рівняння (2.58), з похибкою 0,035%, можна записати

$$B_n \approx K \Delta U_n, \quad (4.11)$$

де  $K$ - узагальнений коефіцієнт перетворення, що дорівнює

$$K = \frac{K_{B_0} K_u \beta}{1 + K_u \beta_0}. \quad (4.12)$$

Потім за формулою (4.12) обчислюється загальний коефіцієнт передачі підсилювального блоку, навантаженого на ЗКМІ, а за рівнянням (2.56) можна визначити значення магнітної індукції в момент часу, що відповідає обраному кроку  $\Delta t$ . Таким чином, з урахуванням експериментальних даних, знаючи  $\Delta U, K$  і  $\Delta t$ , можна визначити значення магнітної індукції, відтворюване автоматизованим комплексом, в будь-який момент часу.

Повірка форми кривої ЗМП, відтворюваної комплексом в режимі експоненціальної апроксимації, відбувається на основі запропонованого способу атестації, який полягає в послідовному нормуванні кожного дискретного рівня відтворюваного поля. Універсальним тесламетром «43205М» або іншим зразковим тесламетром, вимірюється значення магнітної індукції кожного дискретного рівня  $B_{D_n}$ , тривалість якого збільшують до значення, достатнього за часом для вимірювання даним типом тесламетру  $\Delta t = (2 \div 3)t_{zmn}$ . Потім зменшують тривалість рівня до  $\Delta t = t_{min}$ , при якому відхилення граничного значення індукції  $B_{D_{on}}$  не перевищує абсолютну задану похибку  $\Delta B$  відтворювання рівня

$$B_{D_{no}} = B_{D_{on}} \pm \Delta B. \quad (4.13)$$

Тоді, для цієї тривалості  $\Delta t$ , на кожному кроці дискретизації, проводять п'ять незалежних вимірювань. Вилучається відома систематична похибка, викликана впливом поля Землі і отримують виправлені результати спостережень  $B'_{n_1}, B'_{n_2}, \dots, B'_{n_5}$ . Визначають середньоарифметичне значення виправлених результатів спостереження магнітної індукції  $B_{D_{no}}$  і приймають його в якості результату вимірювання для кожного рівня дискретизованої кривої ЗМП. За отриманими значеннями будується відтворювана крива  $B(n\Delta t)$ , яку

порівнюють з заданою формою  $B_T(t)$ . Потім встановлюються відхилення від заданого значення  $B_{ДнТ}$  кожного рівня магнітної індукції

$$\nu = |B_{Дно} - B_{ДнТ}|. \quad (4.14)$$

Середньоквадратичне відхилення результату відтворювання рівня, який визначається за допомогою багаторазового вимірювання кожного рівня, обчислюється за формулою:

$$\sigma(B_n) = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^m \nu_n^2}{m(m-1)}}, \quad (4.15)$$

де  $m$  – кількість спостережень, рівних  $m = 5$ .

Відносна середньоквадратична випадкова похибка відтворювання кожного рівня, обраховується за формулою

$$\delta_{\nu_n} = \frac{\sigma(B_n) \sqrt{m}}{B_{ДнТ}}. \quad (4.16)$$

Діюче значення магнітної індукції  $B_{Дo}$  відтворюваного ЗМП визначається за формулою

$$B_{Д} = \sqrt{\frac{1}{n} (B_{Дo1}^2 + B_{Дo2}^2 + \dots + B_{Дon}^2)}, \quad (4.17)$$

де  $n$  – кількість кроків дискретизації.

Враховуючи, що середньоквадратичні оцінки випадкових похибок відтворювання кожного рівня некорельовані і, ймовірно, викликані взаємно незалежними джерелами або причинами, то сумарна середньоквадратична похибка дорівнює:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{n=1}^n \sigma_n^2(B_n)}. \quad (4.18)$$

Сумарна відносна середньоквадратична випадкова похибка відтворювання діючого значення необхідної форми ЗМП обчислюється за формулою:

$$\delta_{n_{\Sigma}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n=1}^n \delta_{\nu_n}^2}. \quad (4.19)$$

Потім перевіряють гіпотези про приналежність результатів спостереження нормальному закону розподілення. Для отримання результатів спостереження можна використовувати критерій Шапіро-Уїлка, тому що кількість спостережень за результатами експерименту незначна [122].

За графічними значеннями критерію Шапіро-Уїлка перевіримо гіпотезу про приналежність отриманих результатів спостереження нормальному закону розподілення. Через координати отриманого значення  $\nu = Z_\nu = 0,88445$  і кількість результатів спостережень  $m = 5$  не проходить жодна з кривих нормального розподілу для різних довірчих ймовірностей. Тому, можна зробити висновок, що отримані результати спостереження не належать до нормального закону розподілення. Тоді визначимо довірчі межі фактичного значення вимірюваної величини при ймовірності  $P = 0,95$  з п'яти незалежних рівноточних спостережень, середньоарифметичне значення, наприклад, яких

$$m^* = 1,000 .$$

Виправлене середньоквадратичне відхилення результату спостереження

$$S = \sqrt{\left[ \sum_{i=1}^5 (b_i - m^*)^2 \right] / (m - 1)} =$$

$$= \sqrt{\frac{(1,01 - 1)^2 + 3(1 - 1)^2 + (0,99 - 1,00)^2}{4}} = 0,00707.$$

Для  $m = 5$  і довірчій ймовірності  $P = 0,95$  знаходимо коефіцієнт Ст'юдента  $t_\gamma = 2,78$  . При цій точності оцінки

$$t_\gamma (S / \sqrt{m}) = 2,78 \cdot 0,00707 / 5 = 0,00879 .$$

Довірчі межі:

$$m^* - t_\gamma (S / \sqrt{m}) = 1 - 0,00879 = 0,9912089$$

$$m^* + t_\gamma (S / \sqrt{m}) = 1 + 0,00879 = 1,0087911.$$

З ймовірністю  $P = 0,95$  фактичне значення відтворюваної величини укладене в довірчому інтервалі:

$$0,9912080 < m < 1,0087911.$$

Визначимо довірчі межі не вилученої систематичної похибки результату вимірів, зважаючи на те, що систематичну похибку повністю вилучити не вдасться. Не вилучена систематична складова похибки утворилася

з систематичної похибки методу (методична похибка дискретного методу, методу атестації) і інструментальних похибок засобів вимірювання (універсального тесламетра «43205М», вольтметра «В7-34» і т.п.). Так як випадкові складові похибки нікчемно малі, в порівнянні з систематичною похибкою, то в якості меж складових не вилученої систематичної похибки, можна прийняти межі допустимих основних і додаткових похибок засобів вимірювання. При підсумовуванні складових не вилученої систематичної похибки результату вимірювання, не вилучені систематичні похибки засобів вимірювань («43205М», «В7-34») кожного типу можна розглядати як випадкові величини. При відсутності відомостей про вид їх розподілу, розподіл цих випадкових величин можна прийняти за рівномірний. Межі не вилученої систематичної похибки  $\Delta_C$  результату відтворювання, обчислюються шляхом підсумовування не вилучених систематичних похибок універсального тесламетра «43205М» і вольтметра «В7-34», а також похибки методу дискретного відтворювання ЗМП і систематичних похибок від впливу МП Землі, його варіації і полів промислових перешкод. При однаковому рівномірному розподілі не вилучених похибок, максимальні межі не вилученої систематичної похибки можна визначити з формули для довірчої ймовірності  $P = 0,95$

$$\Delta_C = k \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_{C_i}^2}, \quad (4.20)$$

де  $k = 1,4$  - коефіцієнт, який визначається довірчою ймовірністю і числом просумованих не вилучених систематичних похибок  $n \geq 4$ .

Результуюча похибка відтворювання діючого значення магнітної індукції змінного поля автоматизованим комплексом складається з:

- методичної похибки  $\gamma_M$ , що обумовлена методом дискретного відтворювання магнітної індукції заданої форми поля. Ця похибка належить до систематичних похибок АКВЗМП;
- інструментальних похибок складових блоків комплексу;

– похибок ФГ, обумовлених похибками ЦАП, викликаних кінцевою розрядністю  $\gamma_{Ц}$  (систематична), нестабільністю джерела опорної напруги (ДОН)  $\gamma_{он}$  (випадкова);

– підсилювального блоку, похибка якого обумовлена нестабільністю коефіцієнта передачі блока, ця похибка належить до випадкових похибок;

– ЗКМІ, що обумовлена значенням похибки атестації її сталої  $K_B$ , динамічною похибкою  $\gamma_V$  встановлення сигналу, ця похибка належить до систематичних;

– похибка вимірювання, обробки результатів вимірювання і метрологічної атестації, викликаних прийнятим методом атестації. До цього класу похибок належать: основна похибка вимірювання магнітної індукції тесламетром  $\gamma_T$  і тривалості рівня  $\Delta t$  - частотоміром  $\gamma_{\Delta t}$ , похибка, обумовлена його межею чутливості  $\gamma_x$ , динамічна похибка  $\gamma_{П}$  встановлення показань, приведена динамічна похибка від усереднення показів  $\gamma_{ПШ}$ , похибка від впливу МП Землі  $\gamma_3$ , її варіацій  $\gamma_{3B}$  і промислових наводок  $\gamma_{ПН}$ , похибок від короткочасної нестабільності  $\gamma_K$  - при виконанні незалежних спостережень, похибка від асинхронізму  $\gamma_{НС}$  - при урахуванні тривалості рівня магнітної індукції.

Похибки від обробки результатів вимірювання, обумовлені похибками оточення  $\gamma_{OK}$  і відновлення діючого значення  $\gamma_{ДЗ}$ . Похибки метрологічної атестації  $\gamma_{МА}$ , обумовлені використанням опосередкованого методу вимірювання значення магнітної індукції дискретизованого сигналу необхідної форми і обчислення її значення за формулою (4.14).

Похибки  $\gamma_T, \gamma_{\Delta t}, \gamma_x, \gamma_{П}, \gamma_{ПШ}, \gamma_3$  - тесламетра і частотоміра належать до систематичних похибок, також як і похибки  $\gamma_{OK}, \gamma_{ДЗ}, \gamma_{МА}$  - обробки результатів вимірювання і метода метрологічної атестації. Інші похибки  $\gamma_{3B}, \gamma_{ПН}, \gamma_K, \gamma_{НС}$  належать до випадкових.

Оцінимо похибки блоків автоматизованого комплексу. Максимальне значення приведеної похибки функціонального генератора, як виходить з розділу 3, дорівнює  $\gamma_{m_{ФГ}} = 0,2\%$ . Ця похибка

обумовлена нестабільністю початкового (нульового) сигналу ФГ і є адитивною [123].

Підсилювальний блок (ПБ) призначений для отримання необхідного струму в зразковій котушці і, виконаний як підсилювач, з НЗЗ за струмом з метою пониження сталої часу котушки і стабілізації його коефіцієнта передачі.

ЗКМІ виконана у вигляді кілець Гельмгольца і була атестована головним інститутом Держстандарту СРСР – НВО «ВНДІМ ім. Д. Менделєєва», з межею основної допустимої похибки котушки за сталою  $K_{B, \square} = (0,3 - 0,5)\%$ . Динамічна похибка від встановлення магнітної індукції в діапазоні дискретизованого сигналу до  $f = 1000 \text{ Гц}$  не перевищує  $\gamma_v = 0,12\%$ . Вимірювання температури викликає похибку  $\gamma_{\theta_{ок}} = +0,2\% / 10 \text{ К}$ .

Універсальний цифровий тесламетр «43205М» має клас точності 0,15-0,5 з відліком трьох десяткових знаків при вимірюванні радіальної складової ПМП, реєструючи дані вимірювань з максимальною частотою - 12 відліків в секунду на цифровому індикаторі і часом встановлення не більше 1,5 мс по аналоговому виходу ЗМП.

Вихідні значення магнітної індукції, відтворювані комплексом, встановлюються за допомогою регулювання опорної напруги  $U_o$  на функціональному генераторі, значення якого фіксується цифровим вольтметром «В7-34» з класом точності 0,015-0,002 і відліком шести десятинних знаків. Тривалість дискретних рівнів відтворюваної форми ЗМП вимірюється цифровим частотоміром «ЧЗ-54», який має основну похибку 0,005%.

Для визначення результуючої похибки відтворювання діючого значення магнітної індукції заданої форми змінного поля, необхідно для кожної зі складових похибки встановити відповідний закон розподілення, знайти середньоквадратичне відхилення і підрозділити похибки на адитивні і мультиплікативні. При виконанні розрахунків максимальних похибок і середньоквадратичного відхилення, будемо використовувати відносні приведені значення, зберігаючи при обробці результатів спостережень

в проміжних розрахунках один зайвий недостовірний знак в їх значеннях, а округлення результату проводити в кінцевому розрахунку.

Перед початком перевірки визначаємо значення нормального МП Землі в робочому об'ємі ЗКМП  $B_{O_3}$  за результатами багаторазових незалежних спостережень. Середньоквадратичне відхилення результату вимірювання  $B_{O_3}$  при  $n = 50$  спостережень, дорівнює

$$\sigma_{B_{O_3}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{50} \frac{(B_{O_{3i}} - B_{O_3})^2}{50 \cdot 49}} = 0,000012 \text{ мТл}.$$

Оскільки, закон розподілення ймовірності похибки вимірювання - нормальний, то при ймовірності  $P = 0,9$  ентропійний коефіцієнт цього розподілення дорівнює  $k_{o_3} = 1,65$  [46].

Довірчі межі

$$B_{O_3} - \varepsilon \text{ і } B_{O_3} + \varepsilon,$$

де  $\varepsilon = k_{o_3} \cdot \sigma_{B_{O_3}} = 1,65 \cdot 0,000014 = 0,0000231 \text{ мТл}.$

Приведена відносна похибка від неточності обліку значення магнітної індукції поля Землі складає:

$$\gamma_{B_{O_3}} = \frac{\sigma_{B_{O_3}}}{B_{O_3}} \cdot 100\% = 0,028\% .$$

Похибка, що виникає від впливу МП Землі, неточність його обліку є адитивною, тому що не залежить від значення відтворюваної індукції АКВЗМП.

Потім вимірюють магнітну індукцію  $\Delta B_{III, \varepsilon}$ , що обумовлена промисловими перешкодами і варіаціями поля Землі. Короткоперіодичні зміни МП Землі представляють собою варіації елементів геомагнітного поля з періодом від  $0,2 - 5c$  до  $0,5$  часу, амплітудою від  $0,2$  до  $10$  нТл. Вплив цих варіацій і промислових перешкод, навіть на нижній нормованій межі, не перевищує соті долі відсотку. Похибки, що викликаються даними змінами, в порівнянні з іншими складовими загальної похибки комплексу на порядок нижчі, тому їх можна не враховувати. Похибка,



що обумовлена варіаціями геомагнітного поля Землі і промисловими перешкодами адитивна.

Основна похибка ФГ характеризується максимальним значенням відносної приведенної похибки. Для визначення середньоквадратичного відхилення, необхідно встановити вид закону розподілення похибки. Однією зі складових похибки ФГ є похибка від дискретизації і квантування. Наприклад, для синусоїдальної форми сигналу, при  $n = 64$  рівномірних ділянок дискретизації періоду такої функції, ця похибка складає 0,1%. Для експоненціальної, пилкоподібної і трапецієподібної форм ЗМП - ця похибка коливається від 0,1% до 0,15%. Похибки від дискретизації і квантування мають рівномірне розподілення.

Інша складова похибки ФГ обумовлена нестабільністю його прецизійного ДОН і, при коефіцієнті стабілізації  $K_{CT} = 1000$ , має слабкий вплив на похибку генератора. Визначальною похибкою, в даному ФГ, є похибка від дискретизації і квантування, тому загальне розподілення похибки можна вважати близьким до рівномірного. Тоді значення максимальної похибки  $\gamma_{m_{\text{ФГ}}}$ , що дорівнює 0,2%, можна вважати половиною ширини цього рівномірного розподілення і середньоквадратичне відхилення дорівнює

$$\sigma_{\text{ФГ}} = \gamma_{m_{\text{ФГ}}} / \sqrt{3} = 0,1155\% .$$

З роботи [123] знаходимо значення ексцесу  $\varepsilon = 1,8$ , контрексцеса  $\chi = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} = 0,745$  і ентропійного коефіцієнта  $k = \Delta_E / \sigma = 1,73$  для рівномірного закону розподілення похибок, які враховуються при підсумовуванні похибок.

Похибка від коливання опорної напруги відповідає трикутному закону розподілення і при  $\gamma_{\text{ФГ}_{\text{OH}_m}} = 0,01\%$  його середньоквадратичне відхилення дорівнює:

$$\sigma_{\text{ФГ}_{\text{OH}}} = \frac{\gamma}{\sqrt{6}} = \frac{0,01\%}{2,45} = 0,00408\% .$$

Похибка коефіцієнта перетворення ( $K$ ) ПБ є мультиплікативною і розподілена за трикутним законом, тому що викликає зміну коефіцієнта передачі і частково коливання напруги живлення [47].

Розподілення похибки напруги живлення в мережі, як показано в роботі [123], близьке до трикутного закону.

Похибка ПБ, що викликана коливаннями напруги живлення мережі, також мультиплікативна і розподілена за тим же законом, що і відхилення напруги мережі від свого номінального значення  $U_H = 220V$ . Межі відхилення напруги живлення мережі складають  $\Delta = \pm 2\%$ , вони обумовлені методичними вказівками на методи і засоби перевірки АКВЗМП і паспортом. Стабілізатор напруги, що живить ПБ, має коефіцієнт стабілізації за напругою  $K_{CT_u} = 200$  і знижує розмах коливань в  $K_{CT_u}$  рази. На виході стабілізатора розподілення також трикутне, але вже з розмахом

$$l = \frac{\Delta}{K} = 0,01\% .$$

Максимальне значення цієї похибки складає  $\gamma_{m_{yBK}} = 0,01\%$ .

Середньоквадратичне відхилення похибки, з урахуванням трикутного закону розподілення

$$\sigma_{U_{yBK}} = \frac{\gamma_{m_{yBK}}}{\sqrt{6}} = 0,0041\% .$$

Параметри для такого закону розподілення можна знайти в таблиці 2-2 роботи [52]:  $\varepsilon = 2,4$ ;  $\chi = 0,65$ ;  $k = 2,02$ . Тоді максимальне значення похибки коефіцієнта перетворювання ПБ з урахуванням похибки, що викликана коливанням напруги живлення мережі, дорівнює

$$\gamma_{m_{Iy}} = \frac{0,01}{l/I} = 0,2273\% .$$

Середньоквадратичне відхилення

$$\sigma_{Iy} = \frac{0,2273}{\sqrt{6}} = 0,0928\% .$$

Похибка відхилення нуля підсилювального блоку при зміні температури, є адитивною, а закон її розподілення повторює закон розподілення температури всередині блока. В межах  $20 \pm 2^\circ C$  закон розподілення можна вважати рівномірним, з номінальним значенням  $20^\circ C$

і розмахом  $\pm 2K$ . Максимальне значення цієї похибки складає

$$\gamma_{m_{By}} = 0,1\% \cdot \frac{2}{10} = 0,02\% ,$$

а середньоквадратичне відхилення

$$\sigma_{\theta_y} = 0,02 / \sqrt{3} = 0,01155\% .$$

Основна похибка ЗКМІ нормована максимальним значенням сталої  $K_B$  за постійним полем  $\gamma_{m_k} = 0,3\%$ . Але для того, щоб перейти до середньоквадратичного відхилення необхідно знати вид закону розподілення похибки котушки. Однією зі складових похибки ЗКМІ є похибка, що викликана неоднорідністю магнітної індукції в робочому об'ємі, яка обумовлена кінцевими розмірами перетину котушки, гвинтоподібністю її намотки, неоднаковістю радіусів і геометричних розмірів котушок.

В робочому об'ємі  $10\text{ì}\text{ì}^3$ , при зовнішньому діаметрі котушок  $\text{Ø} 100$  мм, внутрішньому  $\text{Ø} 25$  мм і ширині багатовиткової котушки  $b = 30\text{ì}\text{ì}$  - для КГ розрахована неоднорідність поля складає  $\gamma_H = 0,2\%$ . Розподілення похибок в такому об'ємі рівномірне і середньоквадратичне відхилення  $\sigma_{OM_H} = 0,2 / \sqrt{3} = 0,1155\%$ . Похибка носить мультиплікативний характер.

Другою складовою похибки є частотна похибка котушки, що обумовлена нерівномірністю її амплітудно-частотної характеристики. Для частот  $f \leq 5$  кГц ця похибка складає  $0,034\%$  [37]. Похибка мультиплікативна. Розподілення середньоквадратичного відхилення даної похибки наближене до трикутного закону і середньоквадратичне відхилення

$$\text{дорівнює } \sigma_{OM_f} = 0,034 / \sqrt{6} = 0,0138\% .$$

Наступною складовою похибки зразкової котушки є похибка визначення сталої  $K_B$  за магнітною індукцією для даного виду поля, що обумовлена класом точності метрологічної апаратури, яка використовується для встановлення значення сталої.

ЗКМІ атестовано в НВО «ВНДІМ ім. Д.І. Менделєєва» за допомогою робочих еталонів одиниць магнітної індукції змінного і постійного полів, перевіркою за допомогою комп'ютера. Максимальна похибка обумовлена відносними похибками еталонів і похибками

звірки, не перевищує  $\gamma_{n_{\max}} = 0,05\%$ . Ця похибка носить мультиплікативний характер. Розподілення таких похибок приблизно рівномірне, тому середньоквадратичне відхилення

$$\sigma_{OM_H} = \frac{\gamma_{n_{\max}}}{\sqrt{3}} = 0,0289\%.$$

Температурна похибка зразкової котушки була досліджена експериментально і встановлено, що в діапазоні температур  $18^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$  ця похибка складає

$$\gamma_{t^{\circ}} = \frac{\Delta R}{|Z_o|} \cdot 100\% = 0,3819\%.$$

Враховуючи, що в автоматизованому комплексі використовується стабілізація значення коефіцієнта передачі з коефіцієнтом  $K_{CT} = 25$ , то це сприяє зменшенню температурної похибки

$$\gamma_{t^{\circ}_o} = 0,3819 / 25 = 0,01528\%.$$

Розподілення температурної похибки відповідає закону розподілення температури в приміщенні, де знаходиться автоматизований комплекс. В основному температура в приміщенні коливається в вузькому діапазоні  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ , тому можна припустити рівномірне розподілення. При ймовірності  $P = 0,98$ , в таблиці даного розподілення, знаходимо межі  $\sigma\sqrt{3}$ , тоді середньоквадратичне відхилення

$$\sigma_{OM_{\theta}} = \frac{0,0153}{\sqrt{3}} = 0,009\%.$$

Ентропійний коефіцієнт, ексцес і контрексцес для такого розподілення відповідає

$$k = 1,73, \varepsilon = 1,8, \chi = 0,745.$$

Основна похибка цифрового вольтметра «В7-34» нормована двочленною формулою

$$\gamma_B = \pm \left[ 0,015 + 0,002 \left( \frac{U_K}{U_{\chi}} - 1 \right) \right] \%.$$

Її мінімальне значення в кінці діапазону дорівнює  $\gamma_{B_K} = 0,015\%$ , а на початку  $\gamma_{B_H \max} = 0,033\%$  з межами вимірювань кратними 10. Розподілення даної похибки є композицією рівномірного розподілення похибки квантування і повільно спадаючого розподілення суми похибок нуль-індикаторів, аналогових вузлів вольтметра і розкиду окремих сходинок кодувальної сітки. Ці розподілення в основному можна вважати експоненціальними розподіленнями, з показником ступеня  $\alpha = 0,5$ , що має вигляд

$$P(x) = 0,25e^{-\sqrt{|x|}}.$$

В роботі [124] показано, що у високоточних цифрових вимірювальних приладів (вольтметрів, амперметрів, аналогово цифрових перетворювачів, тощо) з великим числом розрядів - експоненціальне розподілення похибки, а у низькоточних приладів переважає рівномірне розподілення. Враховуючи те, що вольтметр «В7-34» належить до високоточних приладів, середньоквадратичне відхилення його похибки визначимо спочатку з грубим наближенням, як для рівномірного розподілення

$$\sigma_{B_H} = \frac{0,033}{\sqrt{3}} = 0,01905\%; \quad \sigma_{B_K} = \frac{0,015}{\sqrt{3}} = 0,00866\%,$$

а потім, з урахуванням експоненціальної складової похибки, що дорівнює 0,1 загальної дисперсії на початку діапазону вимірювань

$$\sigma_{B_{1H}} = \sqrt{(0,0191)^2 \cdot 0,9} = 0,01812\%, \quad \sigma_{B_{2H}} = \sqrt{(0,0191)^2 \cdot 0,1} = 0,00604\%$$

і в кінці

$$\sigma_{B_{1K}} = \sqrt{(0,00866)^2 \cdot 0,9} = 0,008216\%, \quad \sigma_{B_{2K}} = \sqrt{(0,00866)^2 \cdot 0,1} = 0,00274\%.$$

Для експоненціального розподілення складової похибки середньоквадратичного відхилення ентропійний коефіцієнт, ексцес і контрексцес дорівнюють

$$k = 1,35, \quad \varepsilon = 25,2, \quad \chi = 0,2.$$

Середньоквадратичне відхилення похибок  $\sigma_{B_{2H}}$ , при відсутності вхідного вимірювального сигналу, належить до адитивної складової

похибки, а середньоквадратичне відхилення  $\sigma_{B_{2k}}$  - до сумарної складової адитивної і мультиплікативної похибки.

Похибка універсального тесламетра «43205», при вимірюванні радіальної складової постійного поля, дорівнює

$$\gamma_T = \pm \left[ 0,5 + 0,5 \left( \frac{B_K}{B_x} - 1 \right) \right] \% .$$

Мінімальне значення основної похибки універсального цифрового тесламетра в кінці діапазону  $\gamma_{T_k} = 0,5\%$ , на початку  $\gamma_{T_H} = 5\%$ , з межами вимірювань 2, 20, 200, 1500 мТл. Розподілення похибок тесламетра рівномірне і середньоквадратичне відхилення дорівнює

$$\sigma_{T_k} = \frac{0,5}{\sqrt{3}} = 0,2887\% , \quad \sigma_{T_H} = \frac{5}{\sqrt{3}} = 2,8871\% .$$

Але, враховуючи, що похибка всіх електромагнітних вимірювальних приладів, відповідно стандарту нормується з 25% запасом на старіння, тобто похибка нового приладу складає  $0,8\gamma_{KE}$ , тобто середньоквадратичне відхилення дорівнює

$$\sigma_{T_{k_0}} = 0,8 \cdot \sigma_{T_k} = 0,23096\% ,$$

$$\sigma_{T_{H_0}} = 2,3096\% .$$

Похибка цифрового частотоміра, при вимірюванні тривалості кроку, дорівнює

$$\gamma_x = \pm 0,005\% .$$

Середньоквадратичне відхилення похибки частотоміра при рівномірному законі розподілення дорівнює

$$\sigma_x = \frac{\gamma_x}{\sqrt{3}} = 0,00289\% .$$

Складемо зведену таблицю складових загальної похибки відтворення магнітної індукції ЗМП автоматизованим комплексом (табл. 4.2). Визначення результуючої похибки проведемо методом алгебраїчного підсумовування незалежних і корельованих складових похибок. До корельованих похибок відносять похибки ПБ і ЗКМІ, що

обумовлені коливаннями напруги живлення мережі, які мають трикутний закон розподілення.

Для алгебраїчного підсумовування корельованих похибок встановимо їх знаки. Коефіцієнт впливу на похибку коефіцієнта перетворення від коливання напруги і струму живлення є позитивним

$$\psi_{I_y} = +0,1\% \left( 10\% \frac{\Delta U}{I} \right),$$

тобто коефіцієнт перетворювання з ростом напруги живлення зростає. Також позитивним є коефіцієнт впливу на похибку функціонального генератора від коливань опорної напруги. Тому результуюче значення похибки дорівнює сумі похибок:

$$\sigma_{U-I(\text{ФГ-УБ})} = 0,00408 + 0,0938 = 0,097\% .$$

Таблиця 4.2. Похибки АКВЗМП

№ п/п	Найменування похибки і її вид	Систематичні, %		Випадкові с.к.в., %		Вид закону розподілення	Ентропійний коефіцієнт k	Ексцес ε	Контро- ексцес χ
		адит.	мульти.	адит.	мульти.				
I	Методичні похибки а) похибка відновлення необхідної форми ЗМП, ε	0,1							
II	Інструментальні а) функціонального генератора: – кінцева розрядність ЦАП; – дискретизація квантування; – нестабільність ДОН. б) підсилювального блоку: – нестабільність $U_n$ живлення; – нестабільність $K_n$ від коливання $U / I$ ; – температурна похибка зміщення нуля «0»	0,2		0,1155	0,00408	рівномірний трикутний	1,73 2,02	1,8 2,4	0,745 0,65
				0,1155	0,0041	трикутний	2,02	2,4	0,65
				0,1155	0,0928	трикутний	2,02	2,4	0,65
				0,1155		рівномірний	1,73	1,8	0,75



Продовження табл.4.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ІІ	в) ЗКМІ: – атестації $K_B$ ;	0,3	0,009	0,0289	0,1155	рівномірний	1,73	1,8	0,75	
	– динамічна похибка встановлення;					рівномірний	1,73	1,8	0,75	
	– температурна похибка $\delta_{t_0}$ ;					рівномірний	1,73	1,8	0,745	
	– похибка від МП Землі і його варіацій $B_{S_0} = 0,050 мТл$ ;									
	– частотна похибка.									
	г) вольтметра «В7-34» похибка нуль-індикаторів.				0,028		нормальний	1,65	3	0,58
	д) тесламетра «43205».					0,014	трикутний	2,02	2,4	0,65
е) частотоміру «ЧЗ-54»			0,01812	0,008216	експонен- ціальний	1,35	25,2	0,2		
			0,23096		рівномірний	1,73	1,8	0,75		
		0,005			0,0029	рівномірний	1,73	1,8	0,75	
ІІІ	Похибка обробки результатів вимірювання і обчислювання від усереднення.	0,04								

Закон розподілення цієї сумарної похибки зберігається трикутним.

Температурна похибка ПБ позитивна ( $\psi_{\theta_y} = +0,1\% / 10K$ ) і обумовлено це використанням в блоці, крайовому каскаді транзисторів, включених за схемою емітерного повторювача. З ростом температури падіння напруги на ділянці база-емітер зменшується, а, відповідно, напруга

і струм на навантаженні зростають. Похибка, викликана впливом температури на зразкову котушку від'ємна, тому що збільшення температури призводить до зростання повного опору, зменшення струму, що протікає, і зменшення значення магнітної індукції. Але ці похибки розподілені за різними законами і некорельовані поміж собою.

Адитивна складова результуючої похибки відтворення діючого значення магнітної індукції складається зі складових:  $\sigma_{\Phi T} = 0,1155\%$ ,  $\sigma_{\theta_y} = 0,0116\%$ ,  $\sigma_{OM_{KB}} = 0,01812\%$ ,  $\sigma_B = 0,01812\%$ ,  $\sigma_T = 0,23096\%$ . Складовими похибки  $\sigma_{\theta_y}$ ,  $\sigma_{OM_{KB}}$ ,  $\sigma_B$  - можна знехтувати, тому що їх значення більш ніж у 7 разів менше найбільшої з підсумовуючих складових адитивної похибки.

Тоді, середньоквадратичне відхилення адитивної похибки відтворення діючого значення магнітної індукції змінного поля дорівнює

$$\sigma_{AD} = \sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_{\Phi T}^2} = 0,25823\% \approx 0,26\%. \quad (4.21)$$

Підсумовувані складові похибки розподілені рівномірно, тоді результуюче розподілення є трапецієподібним. При визначенні параметрів цього розподілення розраховується вага дисперсії другого доданку в загальній дисперсії

$$g = \frac{\sigma_{\Phi T}^2}{\sigma_T^2} = 0,25.$$

Ексцес цього розподілення обрховується за формулою [60]

$$\varepsilon_{AD\Sigma} = \varepsilon(x)g^2 + 6g(1-g) + \varepsilon(y)(1-g)^2 = 2,25.$$

Контрекссес

$$\chi_{AD} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{AD}}} = \frac{1}{1,5} = 0,6667 \approx 0,67.$$

Ентропійний коефіцієнт композиції двох рівномірних розподілень визначаємо з [66] при  $g = 0,25$

$$k_{AD} = 2,00.$$

Ентропійне значення приведеної адитивної похибки АКВЗМП

$$\gamma_{AD} = k_{AD} \cdot \sigma_{AD} = 2,00 \cdot 0,26 \approx 0,5\%. \quad (4.22)$$

Довірчу ймовірність можна визначити з формули

$$P_D = 0,899 + \chi^2 / 5,5 = 0,98, \quad (4.23)$$

для похибки  $\gamma_{AD} = 0,5\%$ .

При розрахунку похибки в кінці діапазону відтворення до отриманого значення  $\sigma_{AD} = 0,26\%$  необхідно додати мультиплікативні складові:  $\sigma_{\Phi_{\Gamma_{\text{ион}}}} = 0,0408\%$ ,  $\sigma_{y_{\text{жив}}}$  ,  $\sigma_{I_y} = 0,0928\%$  ,  $\sigma_{OM_{\text{неод}}} = 0,1155\%$  ,  $\sigma_{OM_f} = 0,0204\%$  ,  $\sigma_f = 0,0029$  .

$$\sigma_u = 0,008216\% .$$

Враховуючи, що значення складових похибок  $\sigma_{y_{\text{жив}}}$  ,  $\sigma_u$  ,  $\sigma_f$  більш ніж у 7 разів менше найбільшого значення складової похибки цими значеннями можна знехтувати. Середньоквадратичне відхилення мультиплікативної похибки за трикутним законом розподілення можна визначити, не враховуючи середньоквадратичного відхилення  $\sigma_{OM_f}$  , тому що її значення у 5 разів менше найбільшого значення

$$\sigma_{M_1} = \sqrt{\sigma_{\Phi_{\Gamma_{\text{ион}}}}^2 + \sigma_{I_y}^2} = 0,1214\% . \quad (4.24)$$

Вага дисперсії другого з доданків в сумарній дисперсії

$$g = \frac{\sigma_{\Phi_{\Gamma}}^2}{\sigma_{M_1}^2} = 0,16$$

$(1 - g) = 0,84$  , ексцес цього розподілення

$$\varepsilon_{M_1} = \varepsilon_{\Phi_{\Gamma}} g^2 + 6g(1 - g) + \varepsilon_{I_y} (1 - g)^2 = 2,56 \approx 2,6,$$

де контрексес  $\chi_{M_1} = 0,63$ , ентропійний коефіцієнт  $k = 2,03$  при  $g = 0,16$ , тобто розподілення наближене до нормального.

Потім визначимо результуючу підсумовуючу мультиплікативну похибку всього автоматизованого комплексу

$$\sigma_{M_\Sigma} = \sqrt{\sigma_{OM_{неод}}^2 + \sigma_{M_1}^2} = 0,1537\% . \quad (4.25)$$

Похибка зразкової міри від неоднорідності МП  $\sigma_{OM_{неод}}$  розподілена за рівномірним законом, а підсумовуюча мультиплікативна похибка від коливання напруги і струму розподілена за нормальним. Вага значення цієї дисперсії в підсумовуючій дисперсії

$$g = \frac{\sigma_{M_1}^2}{\sigma_{M_\Sigma}^2} = 0,44$$

$(1 - g) = 0,56$  - ексес цього розподілення

$$\varepsilon_M = \varepsilon_2 g^2 + 6g(1 - g) + \varepsilon_1(1 - g)^2 = 2,538 ,$$

де контрексес  $\chi_M = 0,617$ .

За координатою  $g$  та кривою підсумовування рівномірного і нормального законів знаходимо ентропійний коефіцієнт  $k_M = 2,05$ , що відповідає нормальному закону розподілення.

Результуючу похибку автоматизованого комплексу отримаємо підсумовуючи значення адитивної і мультиплікативної складової середньоквадратичного відхилення

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_{АД}^2 + \sigma_{M_\Sigma}^2} = 0,302\% . \quad (4.26)$$

Вага дисперсії  $\sigma_{M_\Sigma}$  мультиплікативних похибок з нормальним законом розподілення складає

$$g = \frac{\sigma_{M_\Sigma}^2}{\sigma_\Sigma^2} = 0,259 \approx 0,26 ,$$

$(1 - g) = 0,74$ .

Ексес цього розподілення

$$\varepsilon_M = \varepsilon_2 g^2 + 6g(1 - g) + \varepsilon_1(1 - g)^2 = 2,538 .$$

Контрексес  $\chi = 0,62$ .

Ентропійний коефіцієнт композиції трапецієвидного і нормального законів визначаємо за графічними кривими і координатою ваги  $g = 0,26$ , він близький до ентропійного коефіцієнта нормального закону  $k_{\Sigma} = 2,05$ .

Таким чином, при підсумовуванні великої кількості значень випадкових складових похибок, підтверджується центральна гранична теорема теорії ймовірності, тому що ексцес отриманих композицій все ближче наближається до ексцесу нормального розподілення. Ентропійне значення похибки відтворення діючого значення магнітної індукції ЗМП дорівнює

$$\gamma_{AKB3MP} = k_{\Sigma} \sigma_{\Sigma} = 2,05 \cdot 0,302 = 0,6191\% . \quad (4.27)$$

Довірчу ймовірність отриманого ентропійного значення  $\gamma_{AKB3MP}$  можна визначити за формулою

$$P_D = 0,899 + 0,1818 / \varepsilon_{\Sigma} . \quad (4.28)$$

З урахуванням останнього, похибка відтворення АКВЗМП діючого значення магнітної індукції буде дорівнювати

$$\begin{aligned} \gamma(B_x) &= (B_{AD} + \sigma_{AD}) + (\theta_M + \sigma_{M_{\Sigma}}) \frac{B_K}{B_x} = \sigma_{AD} + \delta_M \left( \frac{B_K}{B_x} - 1 \right) = \\ &= 0,36 + 0,36 \left( \frac{B_K}{B_x} - 1 \right) \end{aligned} \quad (4.29)$$

Для встановлення класу точності АКВЗМП необхідно в значенні межі допустимої похибки врахувати 25% запасу на старіння, прийнятого при випуску нових приладів в експлуатацію, тоді

$$\gamma(B_x) = 0,45 + 0,45 \left( \frac{B_K}{B_x} - 1 \right) . \quad (4.30)$$

Проте найближче встановлене значення нормованого ряду дорівнює 0,5. Тому клас точності АКВЗМП встановлюється за двочленною формулою і дорівнює

$$\gamma_{KL} = 0,5 + 0,5 \left( \frac{B_K}{B_x} - 1 \right) . \quad (4.31)$$

Враховуючи результати атестації ЗКМІ і результати повірок універсального тесламетра, вольтметра і частотоміра та, приймаючи до

уваги, що старіння засобів вимірювання відбувається не швидше  $0,1\gamma_{кл}$  на рік, такий запас нормованої похибки АКВЗМП забезпечить міжремонтний і міжповірочний інтервал в 4 роки.

Методика метрологічної атестації комплексу базується на запропонованому способі повірки мір і джерел ЗМП, розглянутому в попередньому розділі. Особливість її полягає в нормуванні кожної сходинки магнітної індукції дискретнозмінного поля шляхом збільшення її тривалості і вимірюванні її індукції зразковим тесламетром. Обробка результатів вимірювання проводиться методом статичного аналізу. Визначення діючого значення магнітної індукції відтворюваної форми  $B(t)$  змінного поля відбувається за формулами (4.8), (4.3). Оцінка похибки відтворення форми відбувається за довірчим інтервалом.

При кусково-лінійній апроксимації відтворюваної форми визначення індукції на інтервалах дискретизації виконується за формулою (2.56) при заданому значенні кроку  $\Delta t$ . Підтвердженням правильності методики і вірогідності отриманих результатів атестації комплексу служить операція порівняння значень індукції  $B_{S_k}$  СМП, відтворюваного комплексом в ЗКМІ, з заданим значенням  $B_{S_{ko}} = K_{БП} \cdot I_{S_k}$  індукції в тій же ЗКМІ, при підключенні її до джерела синусоїдального струму.

Таким чином, на підставі методичних вказівок на методи і засоби повірки «АКВЗМП 67-11-05» і випробовуванні самого комплексу, результати яких розглянуті в даному розділі, головним Інститутом Держстандарту СРСР – НВО «ВНДІФТРВ» були атестовані в 1986 і 1988 роках дві модифікації автоматизованого комплексу відтворення ЗМП

в якості зразкової повірочної установки несинусоїдального ЗМП і ІМП І і ІІ розряду в діапазоні  $0,1 - 10,0$  мТл, частотою  $1-1000$  Гц і з тривалістю імпульсів  $10-1000$  мс. Похибки відтворення комплексом «АКВЗМП-М» нормованих форм  $B(t)$  і діючого значення магнітної індукції не перевищують  $0,5\%$ .

На основі проведених досліджень можна зробити висновки:

1. Досліджено стан метрологічного забезпечення засобів відтворення ЗМП різноманітних форм. Показано, що до розробки «АКВЗМП-М» були відсутні атестовані джерела ЗМП несинусоїдальних і імпульсних полів нормованих форм, а запропоновані методи атестації не були забезпечені серійно випущеною магнітовимірювальною апаратурою.

2. Проведено порівняльний аналіз методів атестації джерел – мір магнітної індукції змінного поля різноманітної форми. Встановлено, що для джерел з дискретизованою кривою МП поки що єдиним практичним методом атестації може бути спосіб перевірки, що ґрунтується на масштабному змінюванні тривалості, вимірюванні і нормуванні кожної сходинки кривої магнітної індукції змінного поля необхідної форми за індукцією зразкового сталого поля. Це дозволило створити теоретичну базу метрологічного забезпечення нового класу приладів – ПДЗМП різних форм.

3. Досліджено і показано, що найбільш повними характеристиками засобів вимірювання і відтворення ЗМП різноманітної форми є похибка вимірювання і відтворення діючого значення індукції ЗМП і форми ЗМП.

4. Запропонована методика метрологічної атестації автоматизованого комплексу відтворювання ЗМП, яка полягає в нормуванні сходинок апроксимованої кривої ЗМП. Досліджено похибки блоків АКВЗМП і вимірювальних засобів комплексу. Розраховано, проаналізовано і експериментально перевірено систематичні і випадкові, адитивні і мультиплікативні, статичні і динамічні похибки АКВЗМП, що дало можливість атестувати комплекс як зразкові засоби вимірювання (повірочні установки) магнітної індукції змінних і імпульсних полів різноманітних форм I – II розрядів. Максимальна похибка відтворення нормованих форм і діючого значення магнітної індукції комплексів АКВЗМП не перевищує 0,5 – 1,5% .

Таким чином, основним підсумком теоретичних і експериментальних досліджень є: теоретичне обґрунтування, дослідження і розвиток методу дискретного відтворення МП, розробка нових принципів побудови, створення і метрологічна атестація засобів

точного відтворення магнітної індукції різноманітних форм змінного поля – АКВЗМП.

## ПІСЛЯМОВА

За результатами досліджень можна зробити наступні висновки.

1. На підставі теоретичних досліджень, порівняльного аналізу, кваліфікації методів створення ЗМП і джерел цих полів з точки зору методу підвищення точності відтворюваних заданих форм таких полів показано, що найбільш універсальним і перспективним методом для створення високоточної автоматизованої апаратури відтворення різноманітних форм магнітної індукції ЗМП може бути метод дискретного відтворення, який полягає в дискретній зміні значення магнітної індукції шляхом варіювання струмом живлення зразкової котушки. Проаналізовано метрологічні характеристики джерел ЗМП. Це дозволило запропонувати оптимальні структурні схеми побудови нового класу ПДЗМП з метою досягнення високої точності, швидкодії та їх широких функціональних можливостей.

2. Досліджено запропонований метод дискретного відтворювання ЗМП з нормуванням інформативних параметрів і визначені його можливості. Встановлена залежність між кроком дискретизації, граничною частотою відтворення, похибками встановлення і відтворення магнітної індукції необхідних форм і сталої часу вихідного ланцюга джерела ЗМП, що дозволило прогнозувати можливості і характеристики джерел на сучасному етапі розвитку елементарної бази вимірювальної техніки.

3. Запропоновано нові принципи побудови і досліджено шляхи збільшення частотного діапазону прецизійних джерел на 1-2 порядки за рахунок використання ЗЗ в замкнених структурах, кусково-лінійній



апроксимації відтворюваних форм ЗМП і коливальних режимів струму в зразковій котушці, а також були запропоновані напрямки автоматизації ПДЗМП, що дозволило розробити перспективні структури АКВЗМП.

4. Проведено порівняльну оцінку точності методу дискретного відтворення необхідних форм ЗМП при різних методах апроксимації. Встановлено, що найбільш оптимальним, з точки зору мінімальної похибки відтворення форм ЗМП дискретним методом і забезпечення раціонального динамічного діапазону є спосіб відтворення ЗМП початковими ділянками експоненціальних кривих, у яких відношення тривалості кроку дискретизації до сталої часу  $\tau_E$  повинно бути в межах  $\Delta t / \tau_E \leq 0,2$ . Аналіз дослідження методичних і інструментальних похибок при експоненціально-ступінчастій і кусково-лінійній апроксимаціях заданих форм ЗМП дозволив отримати рівняння основної похибки АКВЗМП. Встановлені області стійкості для замкнених структур АКВЗМП, що дало можливість запропонувати шляхи вдосконалення метрологічних і техніко-економічних параметрів комплексу.

5. Досліджено стан метрологічного забезпечення засобів відтворювання магнітної індукції ЗМП різноманітних форм. Встановлено, що для джерел з дискретизованою кривою ЗМП практично єдиним методом атестації може бути запропонований метод перевірки, заснований на масштабній зміні тривалості, вимірюванні і нормуванні кожної сходинки магнітної індукції змінного поля. Даний метод дозволив створити теоретичну базу метрологічного забезпечення нового класу приладів – ПДЗМП різних форм.

6. Створений і атестований АКВЗМП різноманітних форм, який дозволяє відтворювати форми ЗМП з похибкою 0,5 – 1,5% в діапазонах магнітної індукції 0,1 – 10,0 мТл.

Основні результати виконаних теоретичних досліджень реалізовані в атестованих нестандартизованих засобах вимірювання – АКВЗМП, які є на даний час приладами нового класу – ПДЗМП різноманітної форми з нормованими характеристиками, що забезпечують єдність вимірювання магнітної індукції змінних полів різноманітних форм в слабкому і середньому діапазонах інтенсивності МП.



## ЛІТЕРАТУРА

1. Сердюк В.В. Магнитотерапия: Прошлое, настоящее, будущее. Справочное пособие / В.В. Сердюк – К.: «Азимут – Украина», 2004. – 536с.
2. Гринберг И.П. Измерители индукции переменных магнитных полей / И. П. Гринберг, Е. А. Шуляковский. – К. : Техніка, 1982. – 168с.
3. А.с. 1019338 СССР, МКИ<sup>4</sup> GOIR 33/08. Способ измерения амплитуды прямоугольных импульсов магнитного поля / И.З.Рутковский, Г.Г. Федорук, Л.В. Цвирко и др. – Оpubл. в Б.И., 1983, №19. – С.136.
4. Состояние и перспективы развития метрологического обеспечения измерений электрических и магнитных величин в электроэнергетике. Колтик Е.Д., Фоменко В.И. // Измерения, контроль, автоматизация. – 1985. - № 1/53. – С.3-9.
5. Терещенко М.Ф. Біофізика: підручник / М.Ф. Терещенко, Г. С.Тимчик, І.О. Яковенко. - Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019.- 444 с. ISBN 978-966-622-942-0 <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/27589>
6. Терещенко М.Ф. Моделювання впливу змінних магнітних полів на параметри біологічних тканин / М.Ф. Терещенко, В.Ю. Рудик // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. –2011. – Вип. 41. – С.131 –139.
7. Tymchik G.S. The temperature method of control in a magnetotherapy / G.S. Tymchik, M.F. Tereshchenko, V.U. Rudyk // XIV PhD Workshop OWD 2012, Wisla. - P. 318-324.
8. Магнитотерапия: теоретические основы и практическое применение / В.С. Улащик [и др.]: под общ. ред В.С. Улащика. – Минск: Беларуская навука, 2015 . – 379 с.
9. Самосюк И.З. Терапия магнитными полями : науч.- практ. материалы / И.З. Самосюк, Н.В. Чухраев, В.М. Парамончик, Н.И. Самосюк, А.К. Кожанова, А.Н. Сопильник. - К., 2000 – 224 с.
10. Соловьева Г.Р. Магнитотерапевтическая аппаратура / Г.Р. Соловьева. - М.: Медицина, 1991. - 176с.

11. Золотухина Е.И. Основы импульсной магнитотерапии. Справочное пособие / Е.И. Золотухина, Улащик В.С.- Витебск, 2008. – 144 с.

12. Тимчик Г. С. Система температурного контролю в магнитотерапії / Г. С. Тимчик, М. Ф. Терещенко, В. Ю. Рудик // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2013. – № 1. – С. 111 –116.

13. Рудик В.Ю., Терещенко М.Ф. Безконтактний тепловий контроль роботи магнітотерапевтичної апаратури // XI Міжнар. науково-техн. конф. “Приладобудування 2012: стан і перспективи”, 24—25 квітня 2012 р. — К.: НТУУ “КПІ”, 2012. — С. 193—194.

14. Пат. 74810 Україна, МПК А61В 5/00. Спосіб впливу на організм магнітним полем / Терещенко М.Ф., Рудик В.Ю., Тимчик Г.С., Терещенко С.М.; заявник та патентовласник НТУУ “КПІ”. - № u 2012 05263; заявл. 27.04.2012; опубл. 12.11.2012, Бюл. №21.

15. Терещенко М.Ф. Біофізика: практикум / М.Ф. Терещенко, Г. С.Тимчик, І.О. Яковенко. - Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019.- 288 с. ISBN 978-966-622-952-9 <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/28227>

16. Ультразвукові фізіотерапевтичні апарати та пристрої: монографія / Терещенко М.Ф., Тимчик Г.С., Чухраєв М.В., Кравченко А.Ю. - Київ.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. -184 с. <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/25501>

17. Рудик В. Ю. Спосіб адаптивної магнітотерапії / В. Ю. Рудик, М. Ф. Терещенко, Т. О. Рудик // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія : Приладобудування. - 2016. - Вип. 51. - С. 139–144.

18. Терещенко М.Ф., Гриценко В.В.. «Методи та принципи побудови фізіотерапевтичної апаратури імпульсних магнітних полів», Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. –Вип.38.- с.127-135, 2009.

19. Терещенко М.Ф., Кос О.С. «Особливості та структура автоматизованого магнітотерапевтичного апарату», Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування, Вип.48(2).- с.188-193, 2014.

20. Терещенко М.Ф. Принципи побудови універсальних магніто-фізіотерапевтичних апаратів / Терещенко М.Ф., Пищик М.В. // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Приладобудування.-2008.-№36.-С. 118-126.

21. Тимчик Г. С. Біокерована система магнітофонотерапії на основі оцінки фізіологічних показників людини / Г. С. Тимчик, М. Ф. Терещенко, В. Ю. Рудик. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2014. – №1. – С. 85–92
22. Терещенко М.Ф. Безконтактний температурний метод контролю впливу поля при магнітотерапії / Терещенко М.Ф., Рудик В.Ю., Терещенко С.М. // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Приладобудування. - 2012. - №43. - С. 147-153.
23. Tymchik G.S., Tereshchenko M.F., Soroka S.O., Tereshchenko M.M. Control over influence of the magnetic field parameters on a biological object/ XIII International PhD Workshop OWD 2011, 22–25 October 2011 - с. 295-299
24. Бадалян Г.В. Получение постоянных магнитных полей заданной формы с помощью неявнополюсной магнитной системы // ЖТФ. – 1963. - №3. – С.345.
25. Закутин В.В. Регулировка пространственного распределения импульсного магнитного поля экранированием отдельных участков соленоида // Приборы и техника эксперимента. – 1976, №5 – С.178.-180.
26. А.с. 662979 СССР, МКИ2НОIF 7/00. Многополюсный магнит / Я.Д.Рабинович. Оpubл. в Б.И., 1979, №18. – С.216.
27. Вальков В.И., Смирнов В.М., Тодис Б.М. Создание сильного импульсного поля в контейнере высокого давления // Приборы и техника эксперимента. – 1976. – №3. – С.197-198.
28. Брехна Г. Сверхпроводящие магнитные системы. – М.: Мир, 1976. – 706 с.
29. Алиханов С.Г., Белан В.Г., Будкер Г.И. и др. Получение мегагауссных полей методом магнитодинамической кумуляции // Атомная энергия. – 1967. – Т.23, вып.6. – С.536-541.
30. Левин Д., Смит П. Получение очень больших магнитных полей путем сжатия потока // Приборы для научных исследований. – 1964. - №4. – С.3-11.
31. Кнопфель Г., Свириденко Ю.П., Николаев Ф.А. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 392 с.
32. Кольм Г., Фриман А. Сильные магнитные поля // Успехи физических наук. – 1966. – Т.88, вып.4. – С.704-723.

33. Терещенко М. Ф. Оцінка та контроль ефективності впливу на біологічний об'єкт лазерним випромінюванням / М. Ф. Терещенко, С. П. Якубовський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2012. – Вип. 44. – С. 90 – 97.

34. Кирко И.М., Кирко Г.Е. Магнитная гидродинамика при экстремальных процессах. – М.: Наука, 1982. – 136 с.

35. Шихин А.Я. Автоматические магнитоизмерительные системы. – М.: Энергия, 1977. – 136 с.

36. Андриевский Е.А., Лесник Л.Н., Шевердин Г.П. Устройство для создания магнитных полей при испытании магнитотвердых материалов. – Киев / Препринт. Институт электродинамики АН УССР, № 19. – 1979. – 26 с.

37. Исследование специального эталона единицы магнитной индукции переменного поля // Калабин В.Н., Комышева Т.А., Студенцов Н.В. и др. // Труды метрологических институтов СССР. Исследования в области магнитных измерений. – 1975. Вып.180(240) – С.9-17.

38. Терещенко Н.Ф., Гончаренко Ю.Н. Комплекс аппаратуры для исследования физико-технических свойств ферромагнитных материалов // Получение, исследование свойств и применение сверхтвердых материалов. – Киев: ИСМ АН УССР, 1984. – С.110-113.

39. Терлецкий Я.П. Получение сверхсильных магнитных полей путем быстрого сжатия проводящих обмоток // ЖЭТФ. – 1957. – Т.32, №2. – С.387-388.

40. Терещенко Н.Ф. Установка метрологической аттестации магнитоуправляемых коммутационных элементов // Специальные коммутационные элементы. Секция [5]. Диагностика и надежность СКЭ. Тез.докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. – Рязань. -1984, - С.7-8.

41. Бартолак Д. Использование микропроцессора для управления работой сверхпроводящего магнита при адиабатическом размагничивании // Приборы для научных исследований. – 1981. - №1. – С. 146-147.

42. Вавилов А.А., Солодовников А.И., Шнайдер В.В. Низкочастотные измерительные генераторы. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 104 с.

43. Беркутов А.М. Системы комплексной электромагнитотерапии: Учебное пособие для вузов / А.М. Беркутов, В.И. Жулев, Г.А. Кураев и др. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2000. – 376 с.
44. Ноткин Л.Р. Функциональные генераторы и их применение. – М.: Радио и связь, 1983 – 184 с.
45. А.с. 1121634 СССР, МКИ4 GOIR 33/00. Способ создания импульсного магнитного поля / Н.Ф.Терещенко. – Оpubл. в Б.И., 1984, №40, С.137.
46. А.с. 1273752 СССР, МКИ4 GOIR 33/02. Устройство создания образцового изменяющегося магнитного поля / В.В.Брайко, С.Г.Таранов, Н.Ф.Терещенко. – Оpubл. в Б.И., 1986, №44. – С.155.
47. Гальваномагнитные преобразователи в измерительной технике / В.В.Брайко, И.П.Гринберг, Д.В.Ковальчук и др.; под ред. С.Г.Таранова. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 360 с.
48. Dworschak G., Naberey F., Hildebrand P. and others. Production of Pulser Magnetic Fields with a Flat Pulse of 440 kQe and 1 msec Duration // Rev. Sci. Instrum. 45, №2, 1974.-S.243-249.
49. Терещенко М.Ф. Магнітотерапевтичний апарат та міра для його повірки / М.Ф. Терещенко, В.Ю. Рудик // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2010. – Вип. 39. – С. 142 – 148.
50. Чепалов В.К. Контроль параметров импульсных сигналов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеchnическая. – 1982. – Вып.8. – С.78-86.
51. Грязнов М.И. Интегральный метод измерения импульсов. – М.: Сов. радио, 1975. – 280 с.
52. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. - 2-е изд., перераб. и доп.-Л.: Энергостандарт, 1991. - 304 с.
53. Демирчян К.С., Коровкин Н.В., Нейман Л.Р., Теоретические основы электротехники: В 2-х т. Учебник для вузов. Том 1. – 5-е изд. – Изд-во: Питер, 2009. – 512 с.
54. Зайцев А.В., Манибаев В.М., Нудельман Е.Ш. О погрешности регистрации параметров переменного магнитного поля многоканальными магнитоизмерительными системами / Исследования в области магнитных измерений // Труды метрологических институтов СССР, - 1975. – Вып. 180 (240). – С.35-40.

55. Кондратьев В.Т. Исследование и разработка методов и устройств, основанных на компенсации нелинейности характеристик намагничивания для испытания ферросердечников в переменном магнитном поле. Автореф. дис. ... канд.техн.наук. – М.: МЭИ, 1982. – 18 с.

56. Петрова О.В., Чхиквадзе Т.И., Шифрин В.Я. Методика исследования по повышению однородности магнитного поля катушек магнитной индукции // Исследования в области электрических измерений: Сб. научн. тр. / НПО «ВНИИ метрологии им. Д.И.Менделеева». – 1985.-С.73-78.

57. Нестеренко А.П. Магнитные измерения [Текст] / А. П. Нестеренко ; Восточноукраинский национальный ун-т им. Владимира Даля. - Луганск : [б.и.], 2003. - 123 с.: рис., табл. - Библиогр.: с. 97, 121. - ISBN 966-590-427-2.

58. Бондаренко В.И. Аналоговые измерительные приборы. Магнитные измерения [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов / В. И. Бондаренко [и др.] ; Национальный технический ун-т "Харьковский политехнический ин-т". - Х. : НТУ "ХПИ", 2007. - 132 с.: рис., табл. - Библиогр.: с. 131. - ISBN 978-966-384-057-4.

59. Белый И.В., Хименко Л.Т., Фертик С.М. Справочник по магнитоимпульсной обработке металлов. – Харьков: Вища школа, 1977. – 160 с.

60. Зирка С.Е. Расчет цепей коррекции вершины импульса в импульсных трансформаторах // Радиотехника. – 1982. - №2. – С.85-87.

61. Кухтенко А.И. Проблемы инвариантности в автоматике. – К.: Госиздат техн. лит. УССР, 1963. – 112 с.

62. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. Учебник. 3-е изд., стер. – СПб.: изд-во «Лань», 2009. – 432 с., ил.

63. Сорочинский В.В., Терещенко Н.Ф. Многоцелевой программируемый генератор импульсов // Приборы и техника эксперимента. – 1985. - №5. – С.96-98.

64. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления. Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.

65. Земельман М.А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 199 с.



66. Терещенко Н.Ф. Прецизионные источники изменяющихся магнитных полей. Автореферат диссертации на соиск. уч. степ. канд.техн. наук – К.: ИЭД АН Украины, 1991г. – 19с.: ил

67. Волгин Л.И. Высокостабильные усилительные устройства. Методы построения, схемотехника. – Саратов, 1985. – 128 с.

68. Терещенко Н.Ф. Способы повышения точности воспроизведения формы импульсного магнитного поля // Электромагнитные и тепловые процессы в электромеханических преобразователях и технологических установках: Сб. научн. тр. – К., 1988. – С.59-70.

69. Заездный А.М. Гармонический синтез в радиотехнике и электросвязи. - Л.: Энергия, 1972. – 272 с.

70. Гордон О.И., Щелкин А.П. Проверка тесламетров импульсных полей // Исследования в области магнитных измерений. Труды метрологических институтов СССР. – 1979. – Вып. 233(293). С.5-8.

71. Бабак В.П., Бабак С.В., Еременко В.С., Куц Ю.В. и др. Теоретические основы информационно-измерительных систем. – К.: ТОВ «Софія-А», 2014. – 832 с.

72. Смеляков В.В. Цифровая измерительная аппаратура инфранизких частот. – М.: Энергия, 1975. – 168 с.

73. Туз Ю.М., Серпилин К.Л., Гапченко Л.М. Анализ погрешностей измерительных усилителей // Совершенствование устройств для измерения комплексных параметров и величин в широком диапазоне частот. – Киев, 1968. – С.60-62.

74. Скородумов С.А., Обоишев Ю.П. Помехоустойчивая магнитоизмерительная аппаратура. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 176с.

75. Брайко В.В., Таранов С.Г., Терещенко Н.Ф. Метрологический комплекс воспроизведения изменяющихся магнитных полей // Техн. электродинамика. – 1984. - №3. – С.88-91.

76. Задачник по теории автоматического управления. Учеб. пособие для вузов / Андреев Н.И., Васильев С.К., Захаров В.Н. и др.; Под ред. А.С.Шаталова. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1979. – 544 с.

77. Достал И. Операционные усилители. Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 512с.

78. Брайко В.В., Терещенко Н.Ф. Метрология в области измерений несинусоидальных и импульсных магнитных полей разнообразных форм // Измерительная техника. – 1990. - №3. – С.62-64.

79. Терещенко Н.Ф. Оценка динамических характеристик прецизионного источника изменяющегося магнитного поля // Динамические измерения: Тез.докл. V Всесоюз.симпоз. Л.: НПО «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», 1988. – С.201-204.

80. Таранов С.Г., Терещенко Н.Ф. Принципы физического моделирования изменяющихся магнитных полей // Теория и применение моделирующих систем. Тр. Всесоюз. науч.-техн. конф. «Моделирование-85. Теория. Средства. Применение» - Киев: Наук.думка. 1986. – С.221-226.

81. Брайко В.В., Терещенко Н.Ф. Метод аттестации мер изменяющегося полигармонического магнитного поля// Метрология и технические средства в автоматике. Респ.науч.-техн.конф. Тез.докл. – Харьков, 1984. – С.113-114.

82. Брайко В.В., Терещенко Н.Ф. Принципы метрологической аттестации прецизионных источников изменяющегося магнитного поля // Проблемы магнитных измерений и магнитоизмерительной аппаратуры: Тез.докл. VII Всесоюз.науч.-техн.конф. Л.: НПО «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева». – Ч.2, 1989, С.70-71.

83. А.с. 1589226 СССР, МКИ<sup>5</sup> GOIR 35/00. Способ воспроизведения импульсных магнитных полей / Н.Ф.Терещенко, А.К.Кривасов, С.И.Кудрявцев и др. // Открытия, Изобретения. – 1990, - №32.

84. Терещенко Н.Ф. Оценка погрешности воспроизведения импульсного магнитного поля // Элементы и схемы электроизмерительных устройств и систем. Сб. науч. тр. Ред. кол.: Ф.Б.Гриневич (отв.ред.) и др. Киев: Наук. думка. – 1985. – С.96-99.

85. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. – Л.: Энергия, 1978, - 262с.

86. Терещенко Н.Ф. Способ создания и расчета нормированного изменяющегося магнитного поля // Электромеханические преобразователи энергии. – Киев: Наук.думка. 1986. – С.122-125.

87. Таранов С.Г. Самонастраивающиеся измерительные приборы. – К.: Наукова думка, 1981. – 204 с.

88. Брайко В.В., Терещенко Н.Ф. Метод воспроизведения изменяющихся магнитных полей // Техн. электродинамика. – 1983. - №6, С.99-102.

89. Абрамзон Г.В., Обоишев Ю.П. Индукционные измерительные преобразователи переменных магнитных полей. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1984. – 120с.

90. Терещенко Н.Ф. Моделирование полигармонических магнитных полей // Физико-технические проблемы надежности электрических машин. – Киев: Наук.думка. 1986. – С.106-112.

91. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Справочная книга. 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1986.- 488с.

92. Терещенко Н.Ф. Поверочная установка для магнитоизмерительных приборов // Стабилизированные источники питания для потребителей с переменной нагрузкой. – Киев: Наук.думка. 1984. – С.157-160.

93. Терещенко Н.Ф. Регулируемая мера изменяющегося магнитного поля // Метрология и технические средства в автоматике. Респ.науч.-техн.конф. Тез.докл. – Харьков, 1984. – С.114-115.

94. Брайко В.В., Терещенко Н.Ф. Структурные методы повышения точности воспроизведения изменяющихся магнитных полей // Структурные методы повышения точности, чувствительности и быстродействия измерительных приборов и систем: Тез.докл. Респ.науч.-техн. конф. – Житомир. 1986. – С.211.

95. Терещенко Н.Ф. Автоматическая коррекция погрешностей воспроизведения магнитных полей // Структурные методы повышения точности, чувствительности и быстродействия измерительных приборов и систем: Тез.докл. Респ.науч.-техн.конф. – Житомир. 1985. – С.148.

96. Иващенко И.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с.

97. Брайко В.В., Таранов С.Г., Терещенко Н.Ф. Универсальный метрологический комплекс для поверки измерителей полигармонических магнитных полей // Тез.докл. VI Всесоюз.конф. по проблемам магнитных измерений и магнитоизмерительной аппаратуры.– Ленинград. 1983. – С.9-10.

98. Брайко В.В., Таранов С.Г., Терещенко Н.Ф. Принципы построения метрологических установок для воспроизведения изменяющихся магнитных полей разнообразных форм // Методы и средства поверки параметров магнитного поля: Тез.докл. III Всесоюз.конф. Ленинград. 1985. – С.68-69.

99. Брайко В.В., Терещенко Н.Ф., Шувалов Г.И. Цифровой универсальный тесламетр и аппаратура метрологической аттестации для диапазона слабых и средних полигармонических магнитных полей // Устройства преобразования информации для контроля и управления в энергетике: Тез.докл. Респ.науч.-техн.конф. – Харьков. 1985. – С.118-119.

100. Проскурякова С.Ф. Создание и метрологическое исследование средств точных измерений магнитной индукции сильных импульсных магнитных полей: Автореф. дис. ... канд.техн.наук. – М., 1989. – 20с.

101. Брайко В.В., Таранов С.Г., Терещенко Н.Ф. Информационно-измерительная система для поверки измерителей магнитных полей // Информационно-измерительные системы: Тез.докл. VII Всесоюз.науч. - техн.конф. – Винница. 1985. – С.66-67.

102. Брайко В.В., Таранов С.Г., Терещенко Н.Ф. Экспериментально-расчетный метод оценки метрологических характеристик автоматизированного комплекса воспроизведения изменяющегося магнитного поля // Системные исследования и автоматизация в метрологическом обеспечении ИИС и управлении качеством: Тез.докл. Всесоюз. науч.-техн.конф. Львов. 1986. Ч.1. – С.170-172.

103. А.с. 1213445 СССР, МКИ GOIR 33/00. Устройство дискретного воспроизведения изменяющегося магнитного поля / В.В.Брайко, Н.Ф.Терещенко // Открытия. Изобретения. – 1986, №7. – С.223.

104. А.с. 1397863 СССР, МКИ GOIR 33/12. Устройство воспроизведения изменяющегося магнитного поля / В.В.Брайко, Н.Ф.Терещенко и др. // Открытия. Изобретения. – 1988, №19. - С.186.

105. Magnetoscop 1-580- Katalog // Institut dr. Förster. Rentlingen, - BRD.1990.

106. Feldstärke Messgerät MP-U. Katalog // Tiede,-1990.

107. Universal-Feldmesser, Typ. MP-U. Produkt-Katalog // Helling,-1990.

108. Entmagnetisierungsgeräte, Produkt-Katalog // Helling,-1990.

109. Magnetfeld-Messgeräte, HFM1, Serie U // Katalog // Helling,-1990.

110. Ю.В. Афанасьев. Средства измерений параметров магнитного поля / Ю.В. Афанасьев, Н.В. Студенцов, В.Н. Хорев, Е.Н. Чечурина, А.П. Щелкин.-Л: Энергия. Ленингр. Отд-ние, 1979. – 320 с., ил.

111. Брайко В.В., Терещенко Н.Ф. Вопросы автоматизации прецизионных источников изменяющихся магнитных полей // Теория и математические модели электрических цепей и интегральных схем. – Киев: Ин-т электродинамики АН УССР, 1988. – С.151-154.

112. Вассерман М.И., Щелкин А.П. Методы компарирования магнитной индукции средних и сильных переменных и постоянных полей. Исследования в области магнитных измерений. Труды метрологических институтов СССР. – 1978. – Вып. 215(275), - С.19-23

113. А.с. 1542249 СССР, МКИ GOIR 33/02. Способ поверки мер магнитной индукции изменяющегося поля / В.В.Брайко, С.Г.Таранов, Н.Ф.Терещенко. – 12с. ДСП.

114. Макаров Ю.В., Нартов С.В. Некоторые результаты исследований магнитного поля в гидромагнитной ударной трубе // Журнал технической физики. – 1963. Т.33. Вып.6.

115. Филлипс Р., Тернер Е. Конструкция и метод градуировки магнитных зондов // Приборы для научных исследований. – 1965. №12.

116. Брайко В.В., Терещенко Н.Ф. Аттестация поверочных установок изменяющихся магнитных полей // Методы и средства измерения параметров магнитного поля. Тез. докл. III Всесоюзн. конф. – Л.: 1985. – С.94-95.

117. Citt W., Schon K. Numerische Verfahren zur Entfaltung des Duhamel-Integrals in Hinblick auf die Berechnung des seitlichen Verlaufs // Archiv für Elektrotechnik. Vol.63. №6, 1981.-s.317-325.

118. Трахман А.М., Трахман В.А. Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах // - М.: Сов.радио, - 1975, - 297 с

119. Брайко В.В., Терещенко Н.Ф. Система автоматизации поверки тесламетров изменяющихся магнитных полей разнообразных форм // Измерительные информационные системы: Тез.докл. Всесоюз.науч.-техн.конф. «ИИС-89». М.: 1989, НП К УМЦ. – С.262.

120. А.с. 1594465 СССР, МКИ<sup>5</sup> GOIR 35/02. Устройство для воспроизведения периодического импульсного магнитного поля / Н.Ф.Терещенко, А.К.Кривасов, С.И.Кудрявцев // Открытия, Изобретения, - 1990, №35.

121. Терещенко М.Ф. Біофізика: лабораторний практикум / М.Ф. Терещенко, Г. С.Тимчик, І.О. Яковенко. - Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019.- 176 с. ISBN 978-966-622-980-2 <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/31467>

122. Дипломне проектування [Електронний ресурс] : методичні вказівки до виконання дипломних проектів для студентів напрямку 6.0909 – «Прилади» спеціальності “Медичні прилади і системи” усіх форм навчання / НТУУ «КПІ» ; уклад.: Г. С. Тимчик, М. Ф. Терещенко, С. П. Вислоух, О. І. Паткевич. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,26 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2008. – 104 с. – Назва з екрана <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/32089>

123. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств.- Л.: Энергия, 1968.- 248 с.

124. Алексеева И.У. Теоретическое и экспериментальное исследование законов распределения погрешностей, их классификация и методы оценки их параметров / Автореф. дис. .... канд. техн.наук: Л, 1975.- 20с.

Наукове видання

**Терещенко** Микола Федорович  
**Тимчик** Григорій Семенович  
**Рудик** Валентин Юрійович  
**Рудик** Тетяна Олександрівна

**Високоточні джерела змінних  
магнітних полів**

## *Монографія*

Комп'ютерне верстання *С. А. Боброва*

*В авторській редакції*

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Свідоцтво про державну реєстрацію: серія ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

просп. Перемоги, 37,

м. Київ, 03056

Темплан 2020 р., поз. 3-1-008

Підп. до друку 29.07.2020. Формат 60×84<sup>1/16</sup>. Папір офс. Гарнітура Times.

Спосіб друку – ризографічний. Ум. друк. арк. 9,07. Обл.-вид. арк. 6,42. Наклад 30 пр.

Зам. № 20-075.

Видавництво «Політехніка», КПІ ім. Ігоря Сікорського

вул. Політехнічна, 14, корп. 15

м. Київ, 03056

тел. (044) 204-81-78





**Терещенко Микола Федорович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Науковими інтересами є дослідження впливу фізичних полів і сигналів на біологічні тканини та розробка методів і засобів фізіотерапії та метрології. Автор понад 350 наукових публікацій, 4 монографій і підручників та 125 патентів.



**Тимчик Григорій Семенович** – доктор технічних наук, професор, декан приладобудівного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Науковими інтересами є створення спеціалізованих лазерних інформаційно – вимірювальних систем для контролю технічного стану і параметрів динамічних об'єктів, створення нового класу спектрально – кореляційних лазерних систем на основі пасивних резонаторів Фабрі – Перо у прецизійному приладобудуванні. Автор 568 наукових публікацій, 52 наукових монографій та підручників, 116 винаходів.



**Рудик Валентин Юрійович** – інженер Інституту прикладних проблем фізики та біофізики НАН України. Науковими інтересами є дослідження впливу магнітного поля на біологічну тканину та адаптивні апарати магнітотерапії. Автор 39 наукових публікацій та 6 патентів



**Рудик Тетяна Олександрівна** – кандидат фізико – математичних наук, доцент кафедри математичної фізики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Науковими інтересами є: магнітотерапія, аналітичне та екологічне приладобудування. Автор 73 наукових публікацій та 1 патенту.