

На правах рукопису

БОБКОВ Юрій Володимирович

УДК 621.317

ВИМІРЮВАЧІ КОЕФІЦІЄНТА ЕКРАНУВАННЯ

Спеціальність 05.11.05 — Прилади та методи
вимірювання електричних і магнітних величин

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00753993 (-)

КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

БОБКОВ ЮРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.317

ВИМІРЮВАЧІ КОЕФІЦІЄНТА ЕКРАНУВАННЯ

Спеціальність 05.11.05 - Прилади та методи вимірювання
електричних і магнітних величин

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ - 1993

НВ 27, 797

Робота виконана на кафедрі інформаційно-виміральної техніки
Київського політехнічного інституту

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор
ОРНАТСЬКИЙ Петро Павлович

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор
АНДРІВВСЬКИЙ Євгеній Олександрович
кандидат технічних наук
ФЕЩЕНКО Леонід Прокопович

Провідне підприємство - Київське підприємство "Росток"

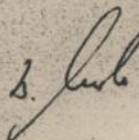
Захист відбудеться "20" вересня 1993 р. в 14³⁰ годин
на засіданні Спеціалізованої Ради К 068.14.14 в Київському
політехнічному інституті (252056, м. Київ - 56, пр. Перемо-
ги, 37, корп. 18)

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Київського
політехнічного інституту.

Відгуки на автореферат (в двох екземплярах, завірені печаткою
установи) просимо надсилати на адресу інституту вченому секретарю
Спеціалізованої Ради К 068.14.14 по захисту дисертацій.

Автореферат розісланий "16" серпня 1993 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої Ради,
кандидат технічних наук, доцент



В.В. Літвіч

АНОТАЦІЯ

Метою дисертаційної роботи є теоретичне дослідження та практична розробка засобів для вимірювання коефіцієнта екранування об'ємних екранів в діапазоні дозвуків, звукових і ультразвукових частот (від 1 Гц до 1 МГц) гармонічних електричних і магнітних полів.

Для досягнення встановленої мети в роботі виконані:

1. Огляд, аналіз і класифікація вимірювань коефіцієнта екранування (КЕ), класифікація методів вимірювання КЕ, а також засобів для вимірювання КЕ, що дозволило вибрати метод вимірювання КЕ для встановленої задачі і синтезувати узагальнену структурну схему вимірювача коефіцієнта екранування (ВКЕ).
2. Аналіз рівняння перетворення і дослідження похибок ВКЕ, що дало змогу одержати аналітичні вирази для розрахунку похибок і встановити шляхи їх зменшення.
3. Класифікація, огляд і порівняння аналіз вимірювальних перетворювачів напруженості змінних магнітних і електричних полів, що дозволило вибрати найбільш прийнятні для ВКЕ типи вимірювальних перетворювачів на основі попередньо сформульованих вимог.
4. Дослідження рівнянь перетворення вимірювальних перетворювачів напруженості змінних магнітних і електричних полів при роботі у складі ВКЕ, а також виникаючих при цьому похибок та способів їх зменшення.
5. Дослідження інструментальних похибок ВКЕ.
6. Розробка і дослідження структурних схем ВКЕ, реалізуючих запропоновані шляхи зменшення похибок.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність. При вирішенні проблем електромагнітної сумісності (ЕМС), нубуваючих особливу важливість та гостроту в останній час, найбільш радикальним засобом захисту вимірювального, електронного і радіотехнічного обладнання та каналів передачі інформації від зовнішніх електромагнітних впливів є правильно спроектовані та виготовлені екрани.

Функціональні якості екранів можна оцінити з допомогою коефі-

цієнта екранування. Теоретичний розрахунок КЕ є складною задачею, математичне рішення якої не завжди існує. Крім того, в реальних випадках властивості екрана обумовлюються наявністю отворів та дефектами, виникаючими при виготовленні і експлуатації.

Таким чином, теорія та практика створення і використання електромагнітних екранів потребують проведення вимірювань КЕ об'ємних екранів та розробки відповідного вимірювального обладнання. Причому, необхідність проведення високочутливих вимірювань, наприклад при біологічних та геологічних дослідженнях, обумовлюють розробку і дослідження екранів для діапазона низьких частот, включаючи до себе діапазон промислової сітьової завади. Але ВКЕ для низькочастотних діапазонів промисловістю не випускаються. Визначення характеристик екранів провадиться без автоматизації процедури вимірювання з допомогою універсальної вимірювальної апаратури, для якої потрібно створювати спеціальне додаткове обладнання.

Недостатньо також теоретичних робіт, присвячених створенню ВКЕ та аналізу їх похибок. Отже, дослідження і розробка автоматичних ВКЕ для низькочастотних діапазонів є актуальною задачею.

Методи дослідження. При вирішенні встановлених задач в роботі використовувалися методи теорії вимірювань, теорії електричних кіл і функціонального аналізу.

Наукова новина результатів, здобутих в дисертаційній роботі, полягає:

1. В аналізі і класифікації вимірювань КЕ, методів вимірювання КЕ та засобів вимірювання КЕ.

2. В аналізі рівняння перетворення і похибок ВКЕ, на основі яких були визначені умови та шляхи зменшення похибок вимірювання КЕ.

3. В класифікації вимірювальних перетворювачів напруженості змінних електричних полів.

4. В порівняльному аналізі вимірювальних перетворювачів напруженості змінних магнітних і електричних полів по можливості їх застосування у вимірювачах КЕ.

5. В аналізі рівнянь перетворення вимірювальних перетворювачів напруженості змінних магнітних і електричних полів при роботі у складі ВКЕ, а також у використанні гальванічної розв'язки для усунення залежності амплітудно-фазової характеристики (АФХ) вимі-

ривального перетворювача напруженості змінних електричних полів від висоти встановлення в системі відтворення випробного електричного поля.

6. В нових структурах автоматичних ВКЕ, які захищені авторськими свідоцтвами і відрізняються підвищеними метрологічними характеристиками.

Практична цінність здобутих в роботі результатів полягає в наступному:

1. У можливості використання рівнянь перетворення і аналізу похибок ВКЕ для розрахунку параметрів ВКЕ.

2. У можливості використання рівнянь перетворення і аналізу похибок вимірювальних перетворювачів напруженості змінних магнітних і електричних полів при розробці ВКЕ.

3. В розробці та аналізі нових структур автоматичних ВКЕ, які захищені авторськими свідоцтвами і відрізняються підвищеними метрологічними характеристиками.

4. В дослідженні розробленого та виготовленого у відповідності з запропонованими структурними схемами мікропроцесорного ВКЕ.

Реалізація результатів роботи. Результати дисертаційної роботи використані при виконанні науково-дослідних робіт № 747 та № 739, проведених на кафедрі інформаційно-вимірювальної техніки Київського політехнічного інституту. В результаті виконання цих робіт була створена та впроваджена на Горьковській філії ЦНДІ ім. А.Н. Крилова інформаційно-вимірювальна система (ІВС) "Косатка", яка являє собою мікропроцесорний ВКЕ. Первинні вимірювальні перетворювачі ІВС "Косатка" пройшли метрологічну атестацію у ВНДІОФВ. Річний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи складає 32 тис. карбованців (по стану цін на 1990 р.).

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на чотирьох всесоюзних науково-технічних конференціях (Куйбишев, 1983 р.; Ленінград, 1983 р.; Москва, 1985 р.; Вільнюс, 1986 р.); чотирьох республіканських науково-технічних конференціях (Київ, 1983 р., 1986 р., 1988 р.; Житомир, 1985 р.); науковій конференції молодих вчених та спеціалістів Київського політехнічного інституту (Київ, 1984 р.); щорічних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Київ-

ського політехнічного інституту (Київ, 1983-1986 рр.).

Публікації. На тему дисертації опубліковано 12 друкованих робіт, в тому числі 2 авторських свідоцтва на винаходи.

Структура і об'єм роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновку, списку літератури та додатків. Загальний об'єм роботи складає 225 сторінок, в тому числі 142 сторінки основного тексту, 42 малюнки, 3 таблиці та п'ять додатків на 22 сторінках.

ЗМІСТ РОБОТИ

Робота присвячена питанню створення та дослідження ВКЕ для гармонічних електричних та магнітних полів у діапазоні частот 1 Гц - 1 МГц.

Оскільки результати теоретичних робіт дозволяють привести задачу про проникання електромагнітних хвиль в середину екранів до квазістатичної - проникання електричної та магнітної компонент розглядається незалежно, можна дати наступне визначення коефіцієнта екранування:

коефіцієнтом екранування магнітного (електричного) поля будемо називати векторну величину S_M (S_E), що дорівнює відношенню характеристики вектора напруженості магнітного (електричного) поля H_{K1} (E_{K1}) в середині екрана до аналогічної характеристики вектора напруженості магнітного (електричного) поля H_K (E_K) поза екраном

$$\vec{S}_M = \vec{H}_{K1} / \vec{H}_K \quad (\vec{S}_E = \vec{E}_{K1} / \vec{E}_K) .$$

В загальному випадку КЕ є комплексною відносною величиною, а також функцією простору та частоти.

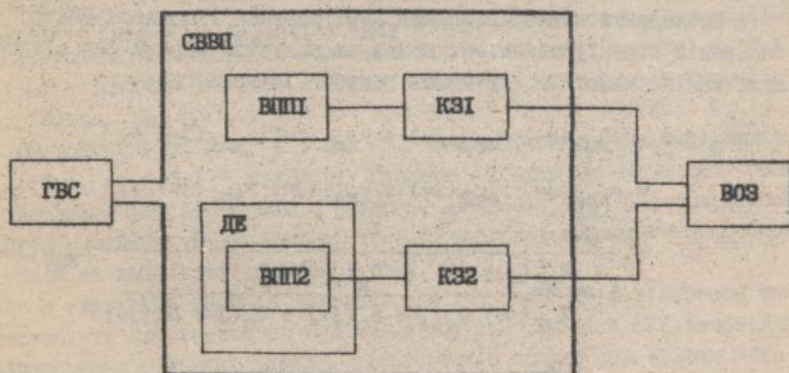
В роботі проведені огляд, аналіз та класифікація вимірювань КЕ, методів вимірювання КЕ, а також засобів для вимірювання КЕ, що дозволило визначити виникаючі при створенні ВКЕ проблеми та намітити шляхи їх вирішення. Показано, що великий динамічний діапазон зміни КЕ (від 1 до 10^{-6} в діапазоні частот $1 \cdot 10^6$ Гц) та складність отримання стабільних зразкових гармонічних випробних полів в досить великому об'ємі, що дозволяє досліджувати екрани з лінійними розмірами 1 - 2 м, зумовлюють при будівництві автоматичних ВКЕ

вибір метода вимірювання з безпосереднім отриманням значення КЕ, з кількома вимірювальними перетворювачами поля (ВПП) та з вимірюваним значенням напруженості випробного поля.

У відповідності з обраним методом вимірювання КЕ була запропонована узагальнена структурна схема ВКЕ, представлена на мал. 1 і включаюча систему відтворення випробного поля (СВВП), підключену до генератора випробного сигналу (ГВС). В межах СВВП розташовується вимірювальний перетворювач поля ВПП1, використовуючий для визначення рівня випробного поля, та досліджуєий екран (ДЕ), в середині якого розміщується вимірювальний перетворювач поля ВПП2. Сигнали, пропорціональні напруженості поля поза та в середині ДЕ, з виходів ВПП1 і ВПП2 по кабелям зв'язку КЗ1 і КЗ2 поступають до вимірювально-обчислювального засобу (ВОЗ), де провадиться визначення і реєстрація КЕ.

Для ВПП2 слід використовувати трьохкомпонентний перетворювач або три однокомпонентні, розміщені відповідно обраній системі координат.

Оскільки СВВП створює випробне поле досить високого рівня, порядку 50 А/м для магнітного поля і 200 В/м для електричного поля, яке небезпечно для здоров'я людини та працездатності вимірювальної апаратури, ВОЗ необхідно розташовувати на достатній, без-



Мал. 1

печній для оператора відстані. Довжина кабелів зв'язку КЗІ і КЗ2 значно зростає. Це приводить до посилення впливу на них зовнішніх промислових завод і заводи від випробного поля. Остання завада характерна для ВКЕ і визначається тим, що значний відрізок кабелів зв'язку від ВППІ та ВПП2 завжди буде проходити в межах СВВП, де на них буде впливати випробне поле великого рівня. При цьому частота завади від випробного поля, наведена на кабелі зв'язку, буде збігатися з частотою корисних сигналів на виході ВППІ і ВПП2. Це ускладнює виділення корисного сигналу та потребує застосування спеціальних методів, а також обмежує, разом з ефективністю СВВП, можливості по збільшенню рівня випробного поля.

Динамічний діапазон ВППІ визначається рівнем випробного поля і його чутливість може бути невисокою. Для забезпечення динамічного діапазона $1 - 10^{-6}$ необхідно відповідне підвищення чутливості ВПП2, що при збереженні широкополосності приводить до зростання особистих шумів ВПП2 та посиленню впливу на нього зовнішніх промислових завод. Причому, співвідношення сигнал/шум плюс завада для ВПП2 при збільшенні КЕ стає значно менше 1, що робить необхідним або розробку та застосування додаткових заходів по зменшенню шумів та завод, або підвищення рівня випробного поля. Останнє обмежується допустимим рівнем наводки на кабелі зв'язку ВППІ, а також необхідністю забезпечення ЕМС. Стяг потрібна розробка методів зменшення шумів.

Проведений аналіз рівняння перетворення і похибок ВКЕ по узагальненій структурній схемі дозволив отримати вирази для відносних мультиплікативної та адитивної похибок, відповідно:

$$\begin{aligned}
 \gamma_{\text{МБ}Q}(j\omega) &= \nu_{\text{КЗ2}}(j\omega) \cdot \gamma_{\text{КЗ2}}(j\omega) + \nu_{\text{КЗІ}}(j\omega) \cdot \gamma_{\text{КЗІ}}(j\omega) + \\
 &+ \nu_{\text{КЗ2}}(j\omega) \cdot \gamma_{\text{КЗ2}}(j\omega) + \nu_{\text{КЗІ}}(j\omega) \cdot \gamma_{\text{КЗІ}}(j\omega) = \\
 &= \frac{I}{I + \frac{K_{\text{К2}}(j\omega)}{K_{\text{П2}}(j\omega)} \frac{Q_{\text{П}}(j\omega) + Q_{\text{П}}(j\omega)}{Q_{\text{П}}(j\omega) \cdot S_Q(j\omega) + Q_{\text{П}}(j\omega) \cdot S_Q'(j\omega)}} \cdot \gamma_{\text{КЗ2}}(j\omega) - \\
 &- \frac{I}{I + \frac{K_{\text{КІ}}(j\omega)}{K_{\text{П2}}(j\omega)}} \cdot \gamma_{\text{КЗІ}}(j\omega) + \gamma_{\text{КЗ2}}(j\omega) - \gamma_{\text{КЗІ}}(j\omega);
 \end{aligned}$$

$$\gamma_{вв}(j\omega) = \gamma_{вп2}(j\omega) - \gamma_{вп1}(j\omega) + \gamma_{вк2}(j\omega) - \gamma_{вк1}(j\omega) =$$

$$= \frac{I}{I + \frac{Q_{в}(j\omega) S_Q(j\omega)}{Q_{п}(j\omega) S'_Q(j\omega)} + \frac{I + \frac{Q_{в}(j\omega)}{Q_{п}(j\omega)} K_{к2}(j\omega)}{S'_Q(j\omega) K_{п2}(j\omega)}}} - \frac{I}{\left[I + \frac{Q_{в}(j\omega)}{Q_{п}(j\omega)} \right] \cdot \left[I + \frac{K_{к1}(j\omega)}{K_{п1}(j\omega)} \right]} + \frac{I}{I + \frac{S'_Q(j\omega) \cdot \left[I + \frac{Q_{в}(j\omega) S_Q(j\omega)}{Q_{п}(j\omega) S'_Q(j\omega)} \right]}{\left[I + \frac{Q_{в}(j\omega)}{Q_{п}(j\omega)} \right] \cdot \frac{K_{к2}(j\omega)}{K_{п2}(j\omega)}}}} - \frac{I}{I + \frac{I}{K_{к1}(j\omega)/K_{п1}(j\omega)}}$$

де $\gamma_{кп1}(j\omega)$, $\gamma_{кп2}(j\omega)$ - відносні мультиплікативні похибки АФХ ВПП1 та ВПП2; $\gamma_{кк1}(j\omega)$, $\gamma_{кк2}(j\omega)$ - відносні мультиплікативні похибки АФХ 1-го та 2-го каналів ВОЗ; $\psi_{кп1}(j\omega)$, $\psi_{кп2}(j\omega)$, $\psi_{кк1}(j\omega)$, $\psi_{кк2}(j\omega)$ - коефіцієнти впливу для мультиплікативних похибок $\gamma_{кп1}(j\omega)$, $\gamma_{кп2}(j\omega)$, $\gamma_{кк1}(j\omega)$, $\gamma_{кк2}(j\omega)$, відповідно; $Q_{в}(j\omega)$, $Q_{п}(j\omega)$ - напруженість випробного поля та поля промислової заводи; $S_Q(j\omega)$, $S'_Q(j\omega)$ - істинне значення КЕ для випробного поля і поля промислової заводи; $K_{п1}(j\omega)$, $K_{п2}(j\omega)$ - АФХ ВПП1 і ВПП2; $K_{к1}(j\omega)$, $K_{к2}(j\omega)$ - АФХ кабелів зв'язку КЗ1 та КЗ2 для впливаючих на них полів; $\gamma_{вп1}(j\omega)$, $\gamma_{вп2}(j\omega)$ - відносні адитивні похибки із-за впливу поля промислової заводи на ВПП1 і ВПП2; $\gamma_{вк1}(j\omega)$, $\gamma_{вк2}(j\omega)$ - відносні адитивні похибки із-за впливу поля промислової заводи та випробного поля на кабелі зв'язку КЗ1 і КЗ2.

З одержаних виразів виходить, що оскільки КЕ є відносною величиною, то для зменшення мультиплікативної похибки ВКЕ необхідне забезпечення близьких значень коефіцієнтів впливу для мультиплікативних похибок ВПП за рахунок підвищення заводозахисності кабелів

зв'язку ВПП з ВОЗ і, в першу чергу, заводозахищеності каналу ВПП2. При рівності коефіцієнтів впливу одноіменних похибок мультиплікативна похибка вимірювання КЕ буде визначатися неідентичністю та нестабільністю АФХ каналів ВКЕ.

Зменшення адитивної похибки можливе при підвищенні заводозахищеності ВКЕ, особливо каналу ВПП2, адитивні похибки якого є домінуючими, і досягається зменшенням адитивних похибок із-за впливу поля промислової заводи на ВПП1 та ВПП2 шляхом збільшення співвідношення напруженість випробного поля/напруженість поля промислової заводи, а також зменшенням адитивних похибок із-за впливу випробного поля та поля промислової заводи на кабелі зв'язку ВПП шляхом зменшення АФХ кабелів зв'язку для впливаючих полів.

Таким чином, проведені в роботі дослідження рівняння перетворення та похибок ВКЕ дозволили визначити домінуючі похибки вимірювання КЕ, якими є: адитивна похибка із-за впливу поля промислової заводи на ВПП (особливо ВПП2), яка може досягати 75 % при співвідношенні рівня випробного поля та поля заводи 100; адитивна похибка із-за впливу випробного поля та поля промислової заводи на кабелі зв'язку ВПП (особливо на КЗ2), яка може досягати 33 %; похибка із-за шумів ВПП та попередніх підсилювачів, особливо ВПП2, для якого співвідношення сигнал/шум при збільшенні КЕ до 10^{-3} може стати порядку $5 \cdot 10^{-3}$, тобто значно менше 1; мультиплікативна похибка із-за неідентичності і нестабільності АФХ каналів ВКЕ, яка для ВПП1 може доходити до 40 %; мультиплікативна похибка із-за зміни АФХ ВПП, яка для вимірювальних перетворювачів напруженості змінних електричних полів доходить до 50 %.

Для зменшення вказаних домінуючих похибок окрім відомих конструкційних способів запропоновано використовувати наступні структурні способи: для зменшення адитивної похибки із-за впливу поля промислової заводи на ВПП - синхронне накопичування, цифрову фільтрацію, компенсацію сигналу заводи; для зменшення адитивної похибки із-за впливу випробного поля і поля промислових завод на кабелі зв'язку ВПП - диференціальні, цифрові, оптичні канали передачі інформації та компенсацію сигналів наводки; для зменшення похибки із-за шумів ВПП і попередніх підсилювачів - синхронне накопичування і послідовне усереднення сигналів ВПП; для зменшення мультиплікативної похибки із-за неідентичності каналів ВКЕ та їх нестабіль-

ності - попередню калібровку та корекцію результатів вимірювання; для зменшення мультиплікативної похибки із-за зміни АФХ ВПП - гальванічну розв'язку ВПП та введення поправок. При цьому суттєве підвищення точності вимірювання КЕ може бути одержане при реалізації цілого комплексу способів по кожній з составляючих похибки, оскільки реалізація лише окремих заходів є недостатньою.

Одним з основних елементів ВКЕ, визначаючим його метрологічні характеристики є ВПП. В роботі проведені класифікація, огляд та порівняльний аналіз різних типів вимірювальних перетворювачів напруженості змінних магнітних і електричних полів по можливості їх використання у ВКЕ на основі попередньо сформульованих вимог. Це дозволило для вимірювання змінних магнітних полів напруженістю 10^{-5} - 10^2 А/м у частотному діапазоні $1 - 10^6$ Гц вибрати пасивні індукційні перетворювачі, які мають достатню широкополосність, порівняно малий рівень шумів, стабільні параметри, мало реагують на великі металеві тіла, прості у виготовленні. Для вимірювання змінних електричних полів напруженістю 10^{-4} - 10^2 В/м слід використовувати електроіндукційні двоелектродні перетворювачі з плоскими електродами, які характеризуються невеликими габаритами та простою конструкцією.

Складені еквівалентні електричні схеми ВПП, розміщених в середині та поза ДЕ в СВВП, дозволили проаналізувати рівняння перетворення вимірювальних перетворювачів напруженості змінних магнітних та електричних полів при роботі в складі ВКЕ, визначити похибки вимірювання КЕ та шляхи їх зменшення.

Так, похибка із-за нерівномірності АФХ ВПП може бути зменшена до 0,3 % шляхом використання коректуючих чотириполосників, запропонованих і досліджених в роботі.

Похибка із-за зміни АФХ вимірювального перетворювача ВПП2 напруженості змінних магнітних полів під впливом ДЕ досягає суттєвих значень при близьких розмірах вимірювальної котушки перетворювача та ДЕ, а також при розміщенні ВПП2 безпосередньо поблизу від стінки ДЕ. Тому необхідно накладати обмеження на мінімально допустиму відстань між ВПП2 та ДЕ.

Похибка із-за зміни АФХ вимірювальних перетворювачів напруженості змінних електричних полів від висоти їх встановлення в системі відтворення випробного електричного поля, яка може досягати

50 %, зменшується до зневажливого значення введенням гальванічної розв'язки, що походить з наданих нижче рівнянь перетворення ВПП відповідно без гальванічної розв'язки і з гальванічною розв'язкою:

$$|K_{\text{КП}}(j\omega)| \approx \frac{d_E}{\epsilon_E h_C} \frac{\sqrt{1 + \left[\frac{\omega R_0 \epsilon_0 S_E}{h_E - d_E/2} \right]^2}}{\sqrt{4 + \left[\frac{(R_1 + 2R_0)d_E}{\omega R_0 R_1 \epsilon_K \epsilon_0 S_E} - \frac{\omega R_0 \epsilon_0 S_E}{h_E - d_E/2} \right]^2}};$$

$$|K_{\text{КПР}}(j\omega)| \approx \frac{d_E}{\epsilon_E h_C} \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{(R_1 + 2R_0)d_E}{2\omega R_0 R_1 \epsilon_K \epsilon_0 S_E} \right]^2}},$$

де S_E - площа пластини ВПП; d_E - відстань між пластинами ВПП; ϵ_E - діелектрична проникність речовини ВПП; ϵ_0 - абсолютна діелектрична постійна; h_C - відстань між пластинами СВВП; h_E - відстань від нижньої пластини СВВП до центра ВПП; R_0 - опір вхідного каскаду попереднього підсилювача для синфазного сигналу; R_1 - диференціальний опір вхідного каскаду попереднього підсилювача.

Проведені дослідження похибок та шляхів їх зменшення дозволили розробити структурну схему автоматичного ВКЕ, захищену авторським свідоцтвом [8], в якому для зменшення наводок на кабелі зв'язку ВПП попередній підсилювач був зроблений у вигляді єдиного блоку з вимірювальним перетворювачем, а аналого-цифровий перетворювач (АЦП) - у вигляді окремого блоку, розташованого в безпосередній близькості від ДЕ в СВВП, що дозволило скоротити довжину кабелів зв'язку ВПП до 1,5 м при максимальних лінійних розмірах ДЕ 1,5 × 1,5 × 5 м. Для зв'язку ВПП з АЦП використовувався диференціальний канал зв'язку, а для зв'язку АЦП з остаточною частиною ВСОЗ - цифровий. Зменшення рівня шумів і завад більш ніж у 100 разів досягалося синхронним накопичуванням сигналів ВПП та послідовним усередненням. Вибір саме синхронного накопичування для зменшення шумів і завад зумовлений необхідністю вимірювання фазової характеристики КЕ, а можливість його застосування - априорно відомими, заданими

параметрами випробного сигналу. Був одержаний вираз, зв'язуючий між собою значення відносної похибки із-за шуму на виході синхронного накопичувача з часом усереднення:

$$\gamma_{\text{ш}} = \frac{G_{\text{ш}}}{n_{\text{сн}} T_{\text{о}} U_{\text{с}}^2}$$

де $G_{\text{ш}}$ - спектральна густина потужності шуму; $U_{\text{с}}$ - діюче значення синусоїдального сигналу на вході синхронного накопичувача; $T_{\text{о}}$ - період синусоїдального сигналу; $n_{\text{сн}}$ - число синхронних накопичувань.

Вжиті заходи дозволили зменшити адитивні похибки із-за впливу поля промислової заводи на ВПП2 та із-за впливу випробного поля та поля промислової заводи на кабелі зв'язку ВПП2 відповідно до 1 і 2 %, а похибку із-за шумів ВПП2 при максимальному числі синхронних накопичувань 2^{14} до 2 - 6 %.

Внаслідок нелінійності ГВС, СВВП і ВВП, а також нелінійності самого ДЕ, сигнали на виході ВПП1 і ВПП2 містять вищі гармоніки випробного сигналу, які в силу гребенчатого характеру частотної характеристики синхронного накопичувача без перешкод проходять на його вихід. При цьому, із-за залежності КЕ від частоти, форми вихідної напруги ВПП1 і ВПП2 будуть різними. Це приводить до похибки із-за нелінійності при вимірюванні КЕ.

Для усунення вказаної похибки модуль КЕ слід визначати як відношення амплітуд перших гармонік вихідних напруг ВПП2 і ВПП1, а фазову характеристику - як різницю кутів сдвигу фаз вказаних перших гармонік відносно випробного сигналу. Виділення і визначення амплітуди першої гармоніки провадиться з допомогою аналізатора спектра.

Проведені в роботі дослідження рівняння перетворення та похибок автоматичного ВКЕ дозволили встановити, що основний вклад до результуючої похибки вносять: випадкова мультиплікативна похибка із-за розкиду АФХ ВВП і систематичні адитивні похибки із-за впливу поля промислової заводи на ВПП2 та із-за впливу випробного поля і поля промислової заводи на кабель зв'язку КЗ2 ВПП2. При цьому остання є домінуючою адитивною похибкою.

Оскільки прийняті міри виявилися недостатніми, то для зменшення систематичної адитивної похибки із-за впливу випробного по-

ля та поля промислових завод на кабелі зв'язку ВПП була застосована компенсація сигналів наводки у розробленому заводозахисному автоматичному ВКЕ, структурна схема якого також захищена авторським свідоцтвом [12].

Використання інших методів боротьби з заводами крім компенсації в цьому випадку ускладнюється тим, що параметри наводки від випробного поля збігаються з параметрами корисного сигналу ВПП. Промислові заводи з частотою сіті 50 Гц та кратними попадають в робочий діапазон ВКЕ, що виключе в загальному випадку використання звичайних методів фільтрації.

Суть реалізованої компенсації завод полягає в попередньому визначенні миттєвих значень сигналів сітьової заводи і заводи від випробного поля, наведених на кабелі зв'язку, при відключеному ВПП, запом'ятовуванні та послідууючому відніманні їх значень із сигналів ВПП в процесі вимірювання КЕ. При цьому підстройка під частоту і фазу сітьової заводи провадиться з допомогою помножувача частоти сіті. Введена компенсація наводок на кабелі зв'язку ВПП дозволяє зменшити рівень заводи від випробного поля і поля промислової заводи до 80 разів при нестабільності амплітуди вказаних завод менше 1 % за час вимірювання. Цього досить для усунення систематичної адитивної похибки із-за впливу випробного поля та поля промислової заводи на кабелі зв'язку ВПП.

Аналіз структур ВКЕ показує, що одержання високих метрологічних характеристик потребує реалізації досить великого об'єма операцій по обробці сигналів ВПП. Це приводить до ускладнення структури ВКЕ та великим апаратним витратам, зменшення яких можливе шляхом використання засобів обчислювальної техніки, зокрема, мікропроцесорів.

В роботі розглянута розроблена структурна схема мікропроцесорного ВКЕ [4, 11]. В ній для підвищення метрологічних характеристик додатково була реалізована компенсація промислової сітьової заводи, впливаючої на ВПП, здійснена аналогічно компенсації наводок на кабелі зв'язку ВПП в заводозахисному автоматичному ВКЕ. Зменшення рівня наводок до 80 разів дозволило зменшити систематичну адитивну похибку із-за впливу поля промислової заводи на ВПП до неважливого значення.

Відзначимо, що виконання всіх операцій по обробці сигналів

ВПП після аналого-цифрового перетворення провадиться в мікропроцесорній частині ВКЕ у відповідності з одержаними в роботі рівняннями перетворення.

Підрахована відносна результуюча похибка для розроблених структур ВКЕ при значенні $KE 10^{-3}$, яка не перевищує: для автоматичного ВКЕ - 14 % при вимірюванні KE магнітного поля та 13 % при вимірюванні KE електричного поля; для автоматичного заводозахисного ВКЕ - 12 %; для мікропроцесорного ВКЕ - 11,5 %. Аналіз відносної результуючої похибки розроблених ВКЕ в діапазоні KE від 1 до 10^{-3} для магнітного та електричного випробних полів вказує на зменшення систематичної адитивної похибки вимірювання KE відповідно на 2,8 і 1,4 %, а також на те, що основний вклад в результуючу похибку ВКЕ вносить випадкова мультиплікативна похибка із-за розкиду АФХ ВПП.

Отримані в роботі результати були використані при розробці та впровадженні мікропроцесорного ВКЕ - інформаційно-вимірювальної системи "Косатка", яка дозволила отримати похибку вимірювання KE не більше 12 % в діапазоні вимірювання KE електричного поля від 1 до 10^{-6} та магнітного поля від 1 до 10^{-5} .

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ І РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Зроблені аналіз і класифікація вимірювань KE , а також огляд, аналіз і класифікація методів вимірювання KE та засобів для вимірювання KE .

2. На основі огляду і запропонованих класифікацій вказана доцільність створення ВКЕ для гармонічних магнітних та електричних полів з вимірюванням напруженості випробного поля з допомогою окремого вимірювального перетворювача, та з безпосереднім отриманням значення KE . Зроблений вибір метода вимірювання KE дозволив синтезувати узагальнену структурну схему ВКЕ.

3. Проведений аналіз рівняння перетворення та похибок ВКЕ по узагальненій структурній схемі вказав, що мультиплікативна та адитивна похибки ВКЕ дорівнюють різниці відповідних похибок однотипних блоків по 1-му та 2-му каналам з урахуванням коефіцієнтів впливу. Дослідження коефіцієнтів впливу для мультиплікативних похибок ВПП дозволили визначити можливості та умови зменшення мульт-

типікативної похибки ВКЕ за рахунок забезпечення близьких значень коефіцієнтів впливу при підвищенні заводозахисності кабелів зв'язку ВПШ з ВОЗ і, в першу чергу, заводозахисності каналу ВППЗ.

4. Встановлено, що компенсації адитивних похибок однотипних блоків по 1-му та 2-му каналам не відбувається, оскільки домінуючими є похибки більш чутливого каналу ВППЗ. Для зменшення адитивної похибки треба підвищувати заводозахисність ВКЕ і, особливо, ВППЗ та його кабелю зв'язку з ВОЗ.

5. Зроблені класифікація, огляд і порівняльний аналіз вимірювальних перетворювачів напруженості змінних магнітних і електричних полів по можливості їх використання у ВКЕ. Встановлено, що для вимірювання КЕ в частотному діапазоні $1 - 10^6$ Гц найбільш підходять пасивні індукційні перетворювачі та двоелектродні електроіндукційні перетворювачі.

6. Досліджені рівняння перетворення вимірювальних перетворювачів напруженості змінних магнітних і електричних полів при роботі у складі ВКЕ, що дозволило встановити шляхи зменшення їх похибок та запропонувати гальванічну розв'язку для усунення залежності АФХ вимірювальних перетворювачів напруженості електричних полів від висоти їх встановлення в системі відтворення випробного електричного поля.

7. Запропоновані та досліджені нові структури автоматичних ВКЕ, захищені авторськими свідоцтвами та відрізняються підвищеними метрологічними характеристиками за рахунок реалізації розроблених шляхів зменшення похибок.

8. Основні результати дисертаційної роботи використані при розробці і впровадженні на Горьковській філії ЦНДІ ім. А.Н. Крилова ІВС "Косатка", призначеної для вимірювання КЕ об'ємних екранів. Проведені дослідження ІВС "Косатка" підтвердили отримані в роботі теоретичні результати. Річний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи складає 32 тис. карбованців (за станом цін на 1990 р.).

Основний зміст дисертаційної роботи викладений у наступних роботах:

І. Оряетский П.П., Яремчук А.А., Тарабан Н.Е., Бобков Ю.В. Автоматизация измерений коэффициентов экранирования // Проблемы

магнитных измерений и магнитно-измерительной аппаратуры. Тез. докл. VI Всесоюзн. науч.-техн. конф. - Л., 1983. С. 79-80.

2. Орнатский П.П., Яремчук А.А., Тарабан Н.Е., Бобков Д.В. ИИС для автоматического измерения коэффициентов экранирования // ИИС-83. Тез. докл. VI Всесоюзн. науч.-техн. конф. - Куйбышев, 1983. - С. 170.

3. Яремчук А.А., Тарабан Н.Е., Бобков Д.В. Структурные методы повышения точности ИИС для измерения коэффициентов экранирования // Структурные методы повышения точности средств и систем автоматизации экспериментальных исследований. Тез докл. Республ. науч.-техн. конф. - Киев, 1983. - С. 137-138.

4. Модернизация информационно-измерительной системы "Косатка": Отчет по НИР (заключит.) / Киевский политехн. инст.; Руководитель П.П. Орнатский. - № ГР 01823033448; Инв. № 02840078827. - Киев, 1984. - 53 с.: ил. - Яремчук А.А., Бобков Д.В., Серпилин К.Л.

5. Яремчук А.А., Бобков Д.В., Мильман А.М. Оптронный широкополосный электрометрический преобразователь // Высокоскоростная фотография, фотоника, и метрология быстротекущих процессов. Тез. докл. 12 Всесоюзн. науч.-техн. конф. - М., 1985. - С. 120.

6. Яремчук А.А., Тарабан Н.Е., Бобков Д.В. Улучшение метрологических характеристик измерителей коэффициентов экранирования // Структурные методы повышения точности, чувствительности и быстродействия измерительных приборов и систем. Тез докл. Республ. науч.-техн. конф. - Житомир, 1985. - С. 46-47.

7. Яремчук А.А., Тарабан Н.Е., Бобков Д.В., Лепеха Ю.В. Испытательный стенд для исследования помехозащищенности цифровых технических средств // Методы и средства борьбы с помехами в цифровой технике. Тез. докл. Всесоюзн. науч.-техн. конф. - Вильнюс, 1986. - С. 25-27.

8. А.с. 1228150 СССР, МКИ³ G 12 B 17/00. Устройство для измерения электромагнитных параметров объемных экранов / Яремчук А.А., Тарабан Н.Е., Мелехов С.С., Бобков Д.В. - Бил. 1986. № 16.

9. Яремчук А.А., Бобков Д.В., Кацлюнов Б.С. Широкополосный электрометрический преобразователь для систем контроля параметров электрических полей // Системы контроля параметров электронных устройств и приборов. Тез докл. Республ. науч.-техн. конф. - Киев, 1986. - С. 19.

10. Яремчук А.А., Бобков Д.В. Широкополосный электрометрический преобразователь с оптронной развязкой // Автоматика и электроприборостроение. Вестн. Киев. политехн. ин-та. Вып. 24. - Киев: Вища школа, 1987. - С. 109-111.

11. Яремчук А.А., Тарабан Н.Е., Бобков Д.В. Микропроцессорный измерительно-вычислительный комплекс для исследования коэффициентов экранирования объемных экранов // Применение вычислительной техники и математических методов в научных и экономических исследованиях. Тез. докл. Республ. науч.-техн. конф. - Киев, 1988. - С. 68-69.

12. А.с. 1583981 СССР, МКП³ G 12 B 17/00. Устройство для измерения электромагнитных параметров объемных экранов / Яремчук А.А., Тарабан Н.Е., Бобков Д.В., Малов Д.П. - Бюл. 1990. № 29.

Яремчук

AB 27.797