

УДК 621.317

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СТРУМУ НА ОСНОВІ ДАТЧИКІВ ХОЛЛА

С.Г. Таранов, чл.-кор. НАН України, **Ю.Ф. Тесик**, докт. техн. наук, **В.В. Брайко**, канд. техн. наук, **О.Л. Карасинський**, канд. техн. наук, **Г.І. Шувалов**, пров. інж., **С.Ю. Пронзелєва**, інж. Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Розроблено новий метод компенсації впливу електромагнітних завод у вимірювальних перетворювачах струму на основі датчиків Холла. Виготовлено дослідний зразок прецизійного перетворювача струму. Досліджено його метрологічні характеристики. Результати досліджень у вигляді струмових кліщів впроваджено у серійне виробництво. Бібл. 2, рис. 10, таблиця.

Ключові слова: точність, електрична потужність, похибка, датчик Холла, струмові кліщі.

За способом перетворення вимірювальні перетворювачі (ВП) струму розділяються на оптоелектронні, шунтові, трансформаторні та на основі датчиків Холла. Всі зазначені ВП, крім шунтових, можуть успішно застосовуватись для створення вимірювань струму без розриву кіл.

Необхідно зауважити, якщо для вимірювання змінних синусоїдальних струмів широко використовуються вимірювальні трансформатори струму, то при вимірюванні струмів складної форми, у тому числі таких, що мають постійну складову, потрібно застосовувати спеціальні методи та прилади. До них належать прилади, в яких в якості магнітних перетворювачів використовуються перетворювачі Холла (ПХ). Головними перевагами таких магнітних перетворювачів є:

- а) можливість виконання вимірювання без розриву ланцюга;
- б) відсутність гальванічного зв'язку між вхідним та вихідним сигналами;
- в) відсутність обмоток забезпечує більшу динамічну стійкість;
- г) можливість вимірювання в широкому інтервалі частот при точній передачі форми сигналу у вигляді кривої напруги;
- д) вихідний сигнал може бути довільним, тобто постійним при постійному струмі, змінним та імпульсним при змінному струмі;
- е) можливість використання в установках з високою напругою завдяки простоті ізолювання ПХ.

Вихідна напруга ПХ визначається формулою

$$U_x = kI_x B = S_x B, \quad (1)$$

де U_x – чутливість ПХ; I_x – значення струму живлення ПХ (А); B – значення складової вектора індукції магнітного поля, перпендикулярного до площини ПХ (Тл); k – коефіцієнт, що залежить від параметрів матеріалу ПХ, зокрема постійної Холла, співвідношення його геометричних розмірів та режиму роботи (живлення від джерела струму чи джерела напруги).

З виразу (1) видно, що чутливість ПХ до магнітної індукції залежить від струму живлення, який за умов використання найбільш розповсюдженого способу живлення від джерела струму намагаються вибрати якомога більшим. Його максимальна величина, обмежена потужністю розсіювання ПХ, визначається виразом [1]

$$I_{x \max} = \sqrt{2\nu\Delta T_{\max} d\delta(B_{\max})}, \quad (2)$$

де $\delta(B_{\max})$ – питома провідність між струмовими електродами ПХ при максимальному значенні індукції магнітного поля, що вимірюється; ν – коефіцієнт тепловіддачі; ΔT_{\max} – допустима температура перегрівання ПХ; d – товщина ПХ.

Струм живлення та чутливість ПХ змінюються в широких діапазонах в залежності від типу напівпровідника, розмірів ПХ та умов тепловідведення. Так, для ПХ, виготовлених на основі високоомних напівпровідників (Ge, Si, GaAs), струм живлення становить від одиниць до десятків міліампер, а чутливість досягає 0,5...1 В/Тл. Для ПХ на основі низькоомних напівпровідників (InSb, InAs) струм живлення становить від десятків до сотень міліампер, а чутливість – 1,5...5 В/Тл.

Одна з найбільш суттєвих характеристик ПХ – поріг чутливості, пов'язана з непостійністю його вихідної напруги (U_{x0}) при $B = 0$.

У загальному випадку складовими цієї напруги є такі: $U_{не}$ – напруга нееквіпотенціальності; $U_{те}$ – напруга термоЕРС; $U_{ф}$ – напруга, зумовлена випрямляючою дією електродів ПХ; $U_{ш}$ – напруга шумів; $U_{тм}$ – напруга, спричинена термомагнітними ефектами; U_t – напруга Тауца, що з'являється за наявності поперечного градієнта питомого опору.

Напруги $U_{тм}$ і U_t складають незначне значення від решти складових, що дає змогу знехтувати ними. Напруга $U_{ф}$ оцінюється з відношення постійної складової напруги до діючого значення змінної складової при випрямленні останньої в ланцюзі контактів ПХ. Її значення коливається від 0,5 % для ПХ з InAs до 0,01 % для ПХ з InSb та HgSe.

Напруга $U_{не}$ є наслідком асиметрії контактів ПХ, нерівномірної товщини та неоднорідності пластини ПХ. При ретельному виготовленні ця напруга складає 5...10 мкВ для ПХ з InSb. Напруга $U_{те}$ залежить від типу напівпровідника, концентрації носіїв заряду та різниці температур між холлівськими електродами, її приріст зі зміною температури складає від 1...3 мкВ/*К (для InSb) до 1..3 мВ/*К. Напруга $U_{ш}$ складається з теплового, дробового, мерехтливого шуму, зумовленого різноманітними явищами на поверхні ПХ. Остання складова на 3–4 ступеня вища теплового та дробового шумів.

Суттєве значення мають також температурні коефіцієнти постійної Холла та напруга нееквіпотенціальності, котрі визначають додаткові похибки ПХ.

Необхідно зазначити, що останнім часом на основі монокристалічного InSb отримано ПХ з температурним коефіцієнтом, меншим 1 мкВ/*К, та температурним коефіцієнтом постійної Холла, меншим 0,005 %/*К, крім того, ці ПХ характеризуються коефіцієнтом

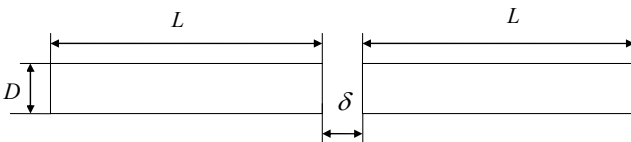


Рис. 1

нелінійності, не більшим 1 % в полях з магнітною індукцією до 15 Тл.

Для зменшення порога чутливості вимірювальних перетворювачів (ВП) з ПХ широко використовують концентратори потоку магнітної індукції. На рис. 1 наведена одна з найпростіших конструкцій концентратора, що складається з двох співвісно розташованих феритових чи пермалоевих стержнів довжиною L , круглого перетину діаметром D , у вузький повітряний зазор δ між торцевими гранями яких розміщується ПХ.

Коефіцієнт підсилення магнітної індукції K_B такого концентратора значною мірою залежить від величини повітряного зазору та розмірів стержнів. На рис. 2 наведено результати експериментальних досліджень цієї залежності.

За умови $\delta=0$ коефіцієнт підсилення магнітної індукції буде мати максимальне значення, що визначається виразом

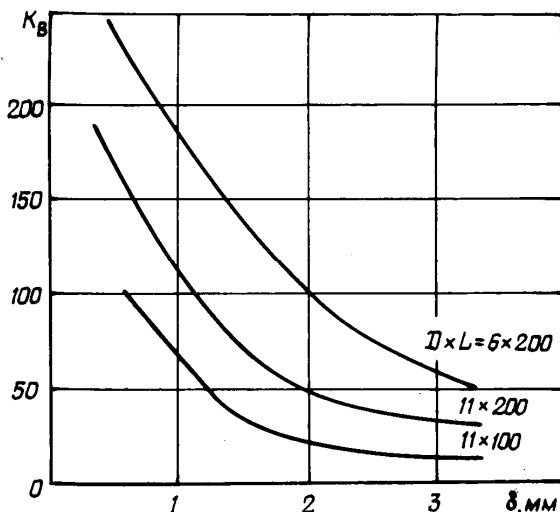


Рис. 2

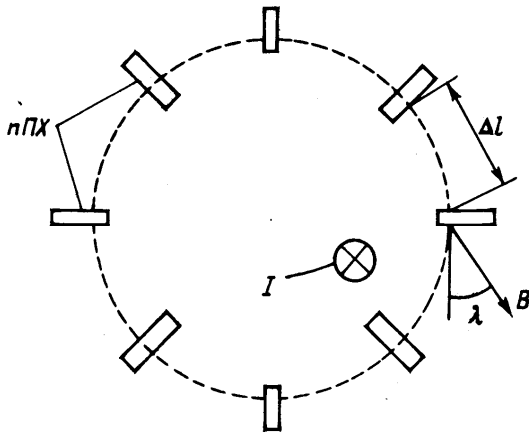


Рис. 3

$$K_{B \max} = \frac{\mu_r}{0,765 \left(1 + \mu_r \frac{\ln 4\lambda - 1}{4\lambda^2} \right)}, \quad (3)$$

де μ_r – відносна магнітна проникність речовини стержня; $\lambda = L/D$.

Така конструкція концентратора характеризується суттєвою похибкою вимірювання від взаємного положення концентратора та провідника зі струмом.

Зокрема і завдяки цьому на практиці значно більш широкого розповсюдження набули конструкції, які дають змогу реалізувати залежність між вимірювальним струмом та

магніторушійною силою у замкнутому контурі, що охоплює струмопровід.

На рис. 3 наведено приклад такого контура, що складається з декількох ПХ, розташованих по обвідній навкруг струмопроводу, на якому позначено: n – число ПХ в контурі; Δl – відстань між ПХ; $l = n \cdot \Delta l$ – довжина інтегруючого контура; λ – кут між магнітною віссю ПХ та вектором магнітної індукції, що створюється струмом I . У цьому випадку закон повного струму має вигляд

$$\oint B_0 \cos \lambda dl = \mu_0 I \quad (4)$$

або після переходу до кінцевих прирощень

$$\left(B_1 \cos \lambda_1 + B_2 \cos \lambda_2 + \dots + B_n \cos \lambda_n \right) \Delta l = \mu_0 I. \quad (5)$$

Явно, що з метою підвищення чутливості вимірювального перетворювача, доречно додавання ЕРС Холла усіх ПХ, тобто його вихідна напруга, припускаючи однаковість чутливості усіх ПХ, буде визначатися виразом

$$U_{\text{вих}} = \sum_{i=1}^n U_{xi} = S_x \cdot (B_1 \cos \lambda_1 + B_2 \cos \lambda_2 + \dots + B_n \cos \lambda_n). \quad (6)$$

Виходячи з цього, можна записати

$$I = \frac{U_{\text{вих}}}{n} \frac{l}{\mu_0 S_x} = \frac{\sum_{i=1}^n U_{xi}}{\mu_0 S_x}. \quad (7)$$

При цьому чутливість вимірювального перетворювача буде визначатися виразом

$$S_{III} = \frac{dU_{\text{вих}}}{dI} = \frac{\mu_0 S_x}{l} n. \quad (8)$$

Необхідно зазначити, що в такому ВП є можливість знизити його адитивну похибку. Так, при парній кількості ПХ, оскільки знак дрейфу напруги нееквіпотенціальності залежить тільки від напрямку струму живлення ПХ, а знак ЕРС Холла – як від напрямку струму живлення, так і від напрямку магнітної осі ПХ по відношенню до вектора B , завжди можливе з'єднання кожної пари ПХ таким чином, щоб ЕРС Холла додавалися, а напруга дрейфу напруги нееквіпотенціальності віднімалася. Це досягається зміною напрямку струму живлення ПХ з одночасним його розверненням на 180° .

Для збільшення чутливості ВП проміжки між окремими ПХ на рис. 3 заповнимо матеріалом з високою магнітною проникністю, що утворює концентратор магнітного потоку.

У граничному випадку n ПХ, що утворюють інтегральний контур, можна замінити одним ПХ, розташованим у зазорі концентратора. Якщо припустити, що товщина ПХ настільки мала, що магнітним опором зазору можна знехтувати порівняно з магнітним опором феромагнетика і врахувати, що магнітна проникність магнітного матеріалу набагато більша проникності повітря, то індукція на будь-якій ділянці концентратора незалежно від його

форми і взаємного розташування щодо провідника з вимірюваним струмом має практично однакове значення. Тоді необхідність в інтегруванні відпадає, і вимірювати можна за допомогою невеликої кількості ПХ чи навіть одного ПХ, розміщеного в зазорі концентратора.

Якість концентратора досить повно характеризують чотири величини: магнітна проникність тіла, обумовлена магнітними властивостями матеріалу концентратора і його геометричною формою, яка значною мірою забезпечує чутливість ВП; нелінійність залежності індукції в повітряному зазорі від величини струму, яка є однією з причин мультиплікативної похибки ВП; залишкова індукція в концентраторі (B_r) та її нестабільність, що є джерелом адитивної похибки ВП; фазове зрушення ϕ – між вимірюваним струмом і індукцією в зазорі, яке призводить до фазових перекручувань у випадках вимірювання змінного струму.

Залежно від області застосування ВП головного значення набувають ті чи інші вимоги до його концентратора.

Так, для досягнення максимальної чутливості важливо мати максимальне значення магнітної проникності тіла. Для кільцевого сердечника діаметром D , зазором завширшки d , виготовленого з магнітного матеріалу з відносною магнітною проникністю μ , при виконанні умови $\pi D - d \sim \pi D$, магнітна проникність тіла μ_ϕ визначається виразом

$$\mu_\phi = \frac{1}{\mu + \frac{d}{\pi D}} \quad (9)$$

Сімейство кривих $\mu_\phi / \mu_{\phi \text{ макс}} = \phi(\mu)$ наведено на рис. 4, де відношення $\pi D/d$ взято як параметр. Користаючись ним, можна визначити мінімальне значення μ , при якому відношення $\mu_\phi / \mu_{\phi \text{ макс}}$ складе бажане значення. Наприклад, при $D = 100$ мм і $d = 0,1$ мм для досягнення $\mu_\phi / \mu_{\phi \text{ макс}} = 0,9$ отримаємо значення $\mu \geq 8000$. Вибір матеріалу з більшою магнітною проникністю не забезпечує помітного збільшення проникності тіла концентратора.

Залишкова індукція в концентраторі визначає постійну адитивну складову похибки ВП. Вона вносить похибку при вимірюванні постійної складової досліджуваного струму і не впливає на точність вимірювання синусоїдальних струмів. Її вплив може бути значно зменшено вибором магнітотякого матеріалу з вузькою петлею гістерезису (пермалой, нікель-марганцеві ферити та ін.).

Значення фазового зрушення між вимірюваним струмом та індукцією в зазорі, створюваного концентратором у випадку приблизної однаковості індукції по всіх перетинах, можна визначити за формулою [2]

$$\text{tg} \phi = \frac{\text{tg} \phi}{1 + \frac{\mu}{\eta} \sqrt{\text{tg}^2 \phi + 1}}, \quad (10)$$

де ϕ – кут втрат у сталі, тангенс якого дорівнює відношенню питомої потужності втрат p до загальної питомої потужності намагнічування q ; η – відношення довжини l середньої лінії магнітного потоку в матеріалі концентратора до ширини повітряного зазору d .

Так, наприклад, для концентратора з фериту марки НМ4000 при значенні $\eta = 300$, при напруженості магнітного поля, створюваного

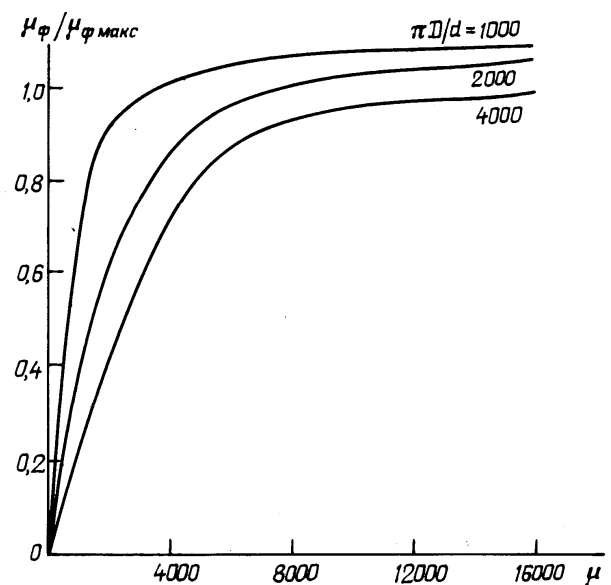


Рис. 4

вимірюваним струмом, 8 а/м і частоті 100 кГц кут зрушення фази складає 48', а для ферита марки 1000НМ – 23'.

При значенні $\phi = 30$ кути зрушення фаз складають відповідно 5' і 3'.

Аналіз властивостей магнітних матеріалів дає змогу зробити такі висновки:

1) концентратори, виготовлені з матеріалів з найбільш високою магнітною проникністю (пермалої), вносять найбільше (0,5 ... 10°) фазове зрушення, у зв'язку з чим їхнє застосування найбільш доцільне у ВП для вимірювання постійних і змінних магнітних полів, що повільно змінюються;

2) найменше фазове зрушення вносять концентратори, зроблені з феритів; їх можна використовувати при вимірюваннях слабких і середніх змінних струмів, у тому числі імпульсних струмів;

3) при розробці ВП для сильних (порядку 1 кА і більше) струмів використання феритів і пермалоїв неможливе через їх значний розігрів під дією струмів Фуко; у цьому випадку раціональна побудова ВП у вигляді інтегруючого контура з декількома ПХ без застосування

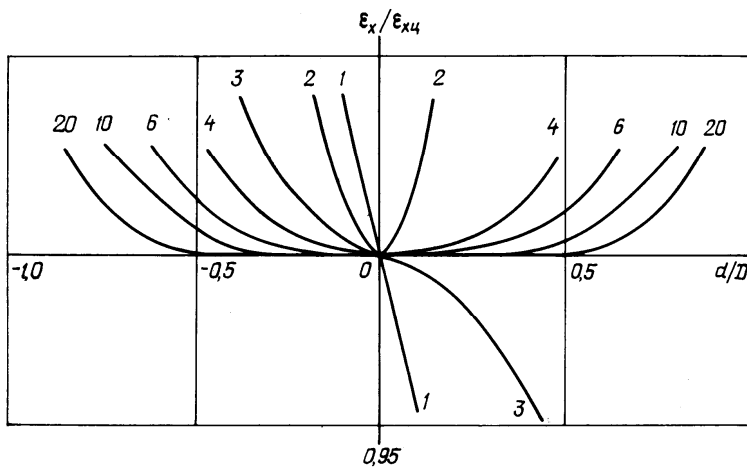


Рис. 5

концентратора.

При заміні ідеального інтегруючого контура реальним ВП, що складається з кінцевої кількості ПХ, виникає методична похибка. Експериментальне дослідження величини цієї похибки через зсув провідника зі струмом, обумовленої різною кількістю ПХ, розташованих по колу навколо цього провідника (за умови, що діаметр провідника дорівнює близько 5% від D), представлено на рис 5, на якому по осі абсцис відкладено значення d/D , де D – діаметр кола, по якому розташовані ПХ; d – подвоєне значення відстані від центра цього кола до провідника; по осі ординат – відношення суми ЕРС Холла всіх ПХ до цієї ж ЕРС при центральному розміщенні провідника зі струмом.

Якщо врахувати, що при роботі з переносними пристроями типу кліщів положення провідника зі струмом стосовно ВП ніяк не фіксується і його зсув від геометричного центра інтегрального перетворювача може досягати $0,25 D$ і більше (що відповідає $d/D = 0,5$), то число ПХ варто вибирати не менше 8 для забезпечення похибки порядку 0,2...0,3 %.

У ВП, що мають концентратор магнітного потоку, похибка, обумовлена зсувом струму відносно геометричного центра ВП, набагато менша (при тій же кількості ПХ). Розглянемо конструкцію концентратора, показану на рис. 6, де контур інтегрування пролягає по середній лінії кільця. Вважаючи напруженості магнітного поля в повітряних зазорах (H_B) однаковими, закон повного струму можна записати у вигляді

$$\oint H dl = H_g \delta + \int_{l_c} H_C dl = I, \quad (11)$$

де H_C – напруженість магнітного поля в сердечнику; l_c – частина контура інтегрування, розташована у сердечнику.

При виконанні умови $\int_{l_c} H_C dl \ll H_g \delta$ одержимо

$$H_g = I/\delta \quad \text{або} \quad B_g = \mu_0 I/\delta. \quad (12)$$

Таким чином, сумарна індукція в зазорах пропорційна вимірюваному струму. Похибки вимірювання струму (Δ) через зсув провідника зі струмом від центра концентратора з

конструкцією, показаною на рис. 6, отримані на основі експериментальних даних, наведених на рис. 7.

В якості концентратора застосовано кільцевий ферит марки М6000НМ із зовнішнім діаметром 80 мм з одним і двома повітряними зазорами.

На рис. 8 наведена залежність похибки вимірювання залежно від кута спостереження провідника зі струмом з центра вікна концентратора при його фіксованому віддаленні від цього центра ($1 - r/R = 0,75$, $2 - r/R = 0,5$).

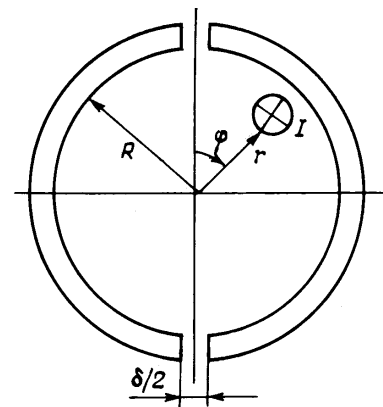


Рис. 6

З аналізу особливостей конструкцій ВП можна зробити висновок про доцільність використання концентраторів магнітного потоку з не менш ніж двома ПХ, наприклад, наведеного на рис. 6, тому що такі конструкції дають змогу:

1. У разі і більше підвищити чутливість ВП;
2. Зменшити похибку вимірювання від зсуву провідника зі струмом у вікні концентратора;
3. Значно послабити вплив зовнішніх магнітних полів на точність вимірювання;
4. Зробити конструкцію концентратора роз'ємною, що забезпечує оперативність вимірювань.

Блок-схема вимірювального пристрою на основі ВП показана на рис. 9, де позначено:

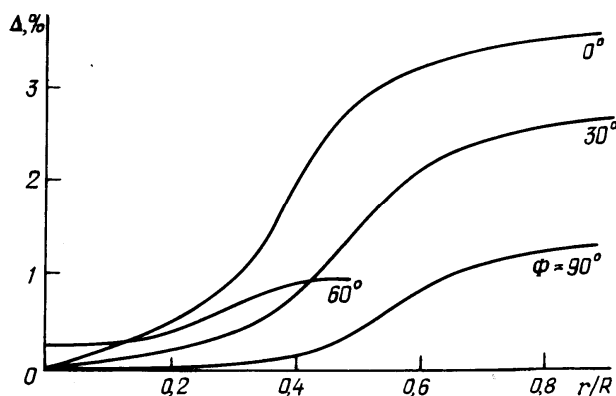


Рис. 7

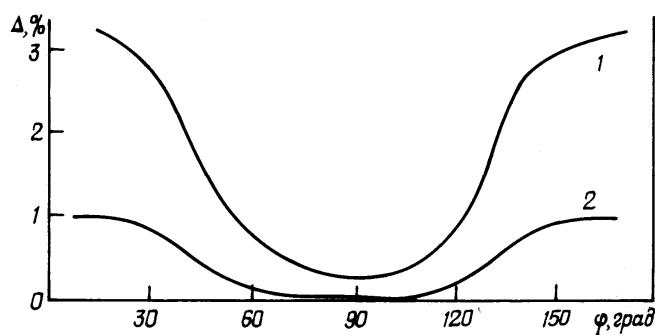


Рис. 8

1 – джерело живлення; 2 – трансформатор живлення ПХ; 3, 4 – ПХ; 4, 5 – диференційні підсилювачі; 6 – суматор; 7 – індикатор результату вимірювання.

З метою розширення динамічного діапазону струмових кліщів на основі датчиків Холла розвинуто метод амплітудної адаптації та комутаційні методи компенсації електрорушійної сили нееквіпотенціальності.

На рис. 10 представлено фото експериментального зразка прецизійних струмових кліщів, виготовлених в Інституті електродинаміки НАН України. Ці кліщі були використані для проведення експериментальних досліджень з метою порівняння характеристик вітчизняних зразків та зразків найкращих світових фірм.

Зразок струмових кліщів	0 А	0 А	1 А	10 А	100 А
Похибка TagsLH100A Landis&Gyr, %	9,8	2,2	1,6	1,1	0,6
Похибка кліщів на основі магнітної системи, створених в ІЕД НАН України, %	0,25	0,10	0,04	0,06	0,1

У таблиці представлено залежності відносної похибки струмових кліщів зі звичайною магнітною системою і магнітною системою на основі ПХ при впливі зовнішнього магнітного поля напруженістю $H = 0,5$ мТ. Як експериментальний зразок звичайної магнітної системи були використані струмові кліщі Tags LH100A фірми Landis&Gyr (Швейцарія).

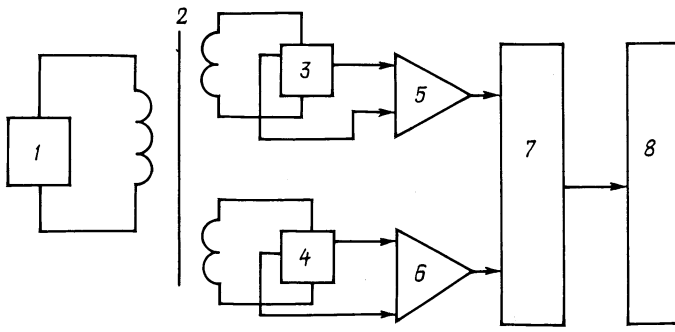


Рис. 9



Рис. 10

За результатами виконання НДР вперше в Україні виготовлено дослідні зразки струмових кліщів з компенсацією кутових похибок, які успішно пройшли заводські випробування. Отримані метрологічні характеристики вдвічі перевищують характеристики кращих світових виробників. Це дало змогу впровадити струмові кліщі у серійне виробництво на підприємстві ЗАТ „ЕЛВІН”. Їх використання на практиці дозволяє підвищити безпеку та зручність роботи в електроенергетиці, сприяє поліпшенню економічної ситуації в державі за рахунок зменшення імпортованих приладів.

1. Вайсс Г. Физика гальваномагнитных полупроводниковых приборов и их применение: Пер. с нем. / Под ред. О.К. Хомерики. – М.: Энергия, 1974.
2. Разин Г.И., Щелкин А.П. Бесконтактное измерение электрических токов. – М.: Энергоатомиздат, 1987.

УДК 621.317

С.Г. Таранов, чл.-корр. НАН України, **Ю.Ф. Тесик**, докт. техн. наук, **В.В. Брайко**, канд. техн. наук, **О.Л. Карасинский**, канд. техн. наук, **Г.И. Шувалов**, вед. инж., **С.Ю. Пронзалева**, инж.

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03680, Украина

Принципы построения преобразователей тока на основе датчиков Холла

Разработан новый метод компенсации влияния электромагнитных помех в измерительных преобразователях тока на основе датчиков Холла. Изготовлен опытный образец прецизионного преобразователя тока. Исследованы его метрологические характеристики. Результаты исследований в виде токовых клещей внедрены в серийное производство. Библ. 2, рис. 10, таблица.

Ключевые слова: точность, электрическая мощность, погрешность, датчик Холла, токовые клещи.

S.G. Taranov, Yu. F. Tesyk, V.V. Brayko, O.L. Karasynskyi, G.I. Shuvalov, S.Yu. Pronzeleva

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Principles of construction of Current converter based on the Hall-effect device

The new method for compensation of electromagnetic disturbances in the measuring current transducer based on the Hall sensor is developed. The experimental model of precision current transducer is built. Its metrological characteristics are and investigated. The results of investigation in the form of current clamp pushed into production.

References 2, figures 10, table.

Key words: accuracy, current converter, error, Hall transducer, current clamp.

Надійшла 27.05.2013
Received 27.05.2013