

П. І. Гаранюк¹, І. П. Гаранюк²Національний університет "Львівська політехніка",
¹ кафедра захисту інформації,² кафедра комп'ютеризованих систем автоматки

ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА ОСНОВІ КВАНТОВИХ МАГНІТОМЕТРИЧНИХ СЕНСОРІВ

© Гаранюк П. І., Гаранюк І. П., 2019

Запропоновані структури частотокерованого калібратора, вимірювального перетворювача та компаратора постійного струму, побудованих на основі квантових магнітометричних сенсорів. Особливістю запропонованого комплексу є застосування універсальної структури КМС, для якого тільки зовнішні комутації визначають тип приладу та його призначення. Точність та стабільність таких приладів забезпечується високою точністю визначення та стабільністю атомних констант робочої речовини застосованих в КМС, стабільністю магнітної системи перетворення постійного струму в індукцію магнітного поля та ступенем захисту від впливу зовнішніх магнітних полів.

Ключові слова – квантовий магнітометричний сенсор, частотокерований калібратор постійного струму, вимірювальний перетворювач, компаратор постійного струму, індукція магнітного поля.

The structures of the frequency-guided calibrator, measuring transducer and DC comparator based on quantum magnetometric sensors are proposed. The peculiarity of the proposed complex is the use of the universal structure of the QMS, for which only external commutations determine the type of device and its purpose. The accuracy and stability of such devices is ensured by the high accuracy of determination and stability of the atomic constants of the working substance used in the QMS, the stability of the magnetic DC conversion system in the induction of the magnetic field, and the degree of protection against the influence of external magnetic fields.

Keywords: quantum magnetometric sensor, frequency-guided DC calibrator, measuring transducer, DC comparator, magnetic field induction.

Вступ

Важливе місце в області електричних вимірювань займають вимірювання сили постійного струму в діапазоні десятки міліампер, десятки ампер. Повірка сучасних приладів, призначених для вимірювання постійного струму, передбачає застосування стаціонарної апаратури, до складу якої бажано ввести частотокерований калібратор постійного струму, вимірювач струму та компаратор. У такій апаратурі висока точність відтворення струму та його вимірювання забезпечуються застосуванням нормального елемента (НЕ) як опорного джерела електрорушійної сили. Найвищу точність відтворення міри ЕРС мають насичені нормальні елементи, які поділяються на три класи точності: 0.001; 0.002; 0.005. [7, 8]. Сьогодні в метрологічних лабораторіях застосовують НЕ типу Х 489, клас точності яких 0.0005 [8]. Слід сказати, що НЕ потребують термостатування з похибкою підтримки температури $\pm 0,01$ °С. Результати дослідження [6] показують, що формула для визначення зміни ЕРС НЕ, які експлуатуються в діапазоні температур, правильна тільки для групи НЕ, але приводить до додаткової похибки порядку $2,5 \cdot 10^{-6}$ в діапазоні робочих температур для конкретного елемента. Суттєвими недоліками НЕ є малий струм його навантаження (не більше 1 мкА), вплив зміни положення в просторі, ударів, після транспортування НЕ потребують, як мінімум, добової витримки [2, 4]. У зв'язку з цим використання НЕ як зразкових опорних джерел ЕРС може бути виправдане тільки в стаціонарних вимірювальних установках. Викладені вимоги унеможливають отримання високої точності повірки приладів постійного струму за допомогою переносних приладів.

Аналіз літературних джерел

Вимірювати постійну напругу можна перетворенням значення напруги на частотний сигнал з подальшим вимірюванням частоти. Точність вимірювання в цьому випадку переважно визначається точністю перетворювача. Фірма Analog Devices наводить дані про вимірювальні перетворювачі постійної напруги в частоту [6] для кращих типів – AD 7741, AD7742, інтегральна нелінійність перетворення яких дорівнює 0,012 %. Найточніші вимірювальні перетворювачі інтегруючого типу мають відносну похибку, не меншу за 0,005 %, яка переважно визначається похибкою опорного джерела напруги [1, 6]. У [9] описано принципи побудови, аналіз похибок та результати експериментальних досліджень вимірювального перетворювача для великих значень струмів (1, 200 кА). Для перетворення індукції на частоту застосований квантовий сенсор на основі резонансу ядер. Вплив магнітних полів докілья суттєво впливає на точність такого перетворювача. Відносна похибка перетворення внаслідок впливу нормального магнітного поля Землі визначається співвідношенням варіацій значень індукції цього поля до поля перетворювача струму в індукцію магнітного поля і може досягати значення $d^3 \cdot 5 \times 10^{-4}$. У лабораторних умовах, де діють значні поля електротехнічних пристроїв, ця похибка досягає значення 0,1 % [9]. В окремих роботах розглядають можливість побудови стабілізаторів та вимірювальних перетворювачів постійного струму в частоту високої точності, побудованих з використанням квантових магнітометричних сенсорів (КМС) [1]. Такого типу сенсори забезпечують високу точність та стабільність вимірювання індукції постійного магнітного поля завдяки застосуванню спеціальних робочих речовин – метастабільного гелію, цезію чи рубідію в газоподібному стані [2].

Мета роботи

Метою статті є дослідження способу побудови мобільного комплексу апаратури підвищеної точності та універсального призначення для повірки вимірювальних приладів постійного струму класу точності понад 0,01, який побудовано на основі КМС.

Основна частина

Запропоновано структури частотокерованого калібратора, вимірювального перетворювача та компаратора постійного струму, побудованих на основі квантових магнітометричних сенсорів. Особливістю пропонованого комплексу є застосування універсальної структури КМС, для якого тільки зовнішні комутації визначають тип приладу та його призначення. Точність та стабільність таких приладів забезпечується високою точністю визначення та стабільністю атомних констант робочої речовини, застосованих в КМС, стабільністю магнітної системи перетворення постійного струму на індукцію магнітного поля та ступенем захисту від впливу зовнішніх магнітних полів. На рис. 1 наведено структуру квантового магнітометричного сенсора.

У такому сенсорі завдяки реалізації додатного зворотного зв'язку, утвореного елементами 4, 5, 6, 7, 8 та під впливом опромінення атомів робочої речовини в елементі 5 резонансним світлом спектральної лампи 2 виникають незатухаючі коливання, частота яких пропорційна до індукції зовнішнього магнітного поля, утвореного елементом 9.

Вихідну частоту сенсора визначають за виразом:

$$f_{\text{пол}} = K_g \times B, \quad (1)$$

де B – індукція зовнішнього магнітного поля; K_g – квантова стала, яка визначається типом робочої речовини в елементі 5. Для реалізації структур частотокерованого калібратора, вимірювального перетворювача та компаратора постійного струму, побудованих на основі квантових магнітометричних сенсорів, необхідно застосувати первинний перетворювач вхідного струму в індукцію магнітного поля (ПП) та магнітні екрани (МЕ) для захисту цього поля від зовнішніх магнітних впливів. Потенційно висока точність перетворення струму на частоту забезпечується завдяки точному теоретичному або експериментальному визначенню сталих перетворення $K_{\text{ин}}$, K_g та їх стабільності.

Вихідна частота перетворювача визначається виразом:

$$f_{\text{вих}} = \Gamma_{\text{во}} \times K_{\text{..}} \times K_g \quad (2)$$

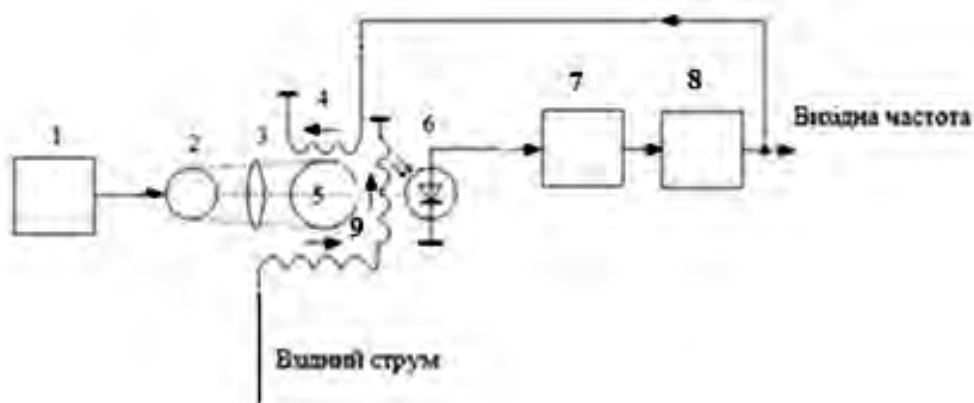


Рис. 1. Структура квантового магнітометричного сенсора
 1 – генератор збудження спектральної лампи накачування;
 2 – спектральна лампа накачування; 3 – фокусуюча лінза;
 4 – котушка резонансного радіополя; 5 – комірка з газоподібною робочою речовиною; 6 – фотоприймач; 7 – підсилювач сигналу прецесії;
 8 – 90° фазоповертач; 9 – магнітна система.

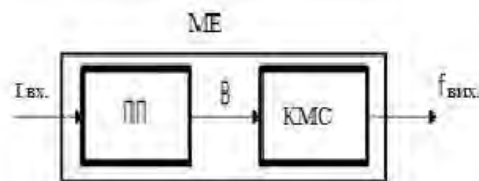


Рис. 2. Загальна структура перетворювача «струм-частота»
 на основі квантового магнітометричного сенсора

Вимірювальний перетворювач постійного струму

Перспективним, на наш погляд, є використання для високоточних вимірювань постійного струму КМС індукції постійного магнітного поля в частотний сигнал (рис.3). Вимірювання полягає у перетворенні струму на індукцію магнітного поля ПП, перетворенні індукції на частоту КМС з подальшим вимірюванням частоти, значення якої буде пропорційне до сили струму. Враховуючи те, що вимірювати частоту можна з мінімальною похибкою, точність вимірювання сили струму в цьому випадку визначатиметься точністю та стабільністю ПП та КМС.

Розроблений вимірювальний перетворювач постійного струму (ВППС) для діапазону середніх значень струму можна зарахувати до робочих засобів вимірювання, які мають експериментально підтверджену відносну похибку перетворення, не більшу за 0,005 %. Застосовуючи ПП із різними значеннями $K_{\text{пп}}$, можна розширити діапазон перетворення струму від одиниць міліампер до десятків ампер. Коефіцієнт перетворення ВППС визначається типом робочої речовини КМС та значенням $K_{\text{пп}}$. Велике значення коефіцієнта перетворення струму в частоту дає змогу з високою точністю та швидкістю вимірювати частоту вихідного сигналу. Габаритні розміри та маса ВППС на основі КМС не більші за серійні цифрові вимірювальні прилади. Перевагою окремих типів перетворювачів є гальванічне розділення входу, що дає змогу вимірювати силу струму у високовольтних колах.

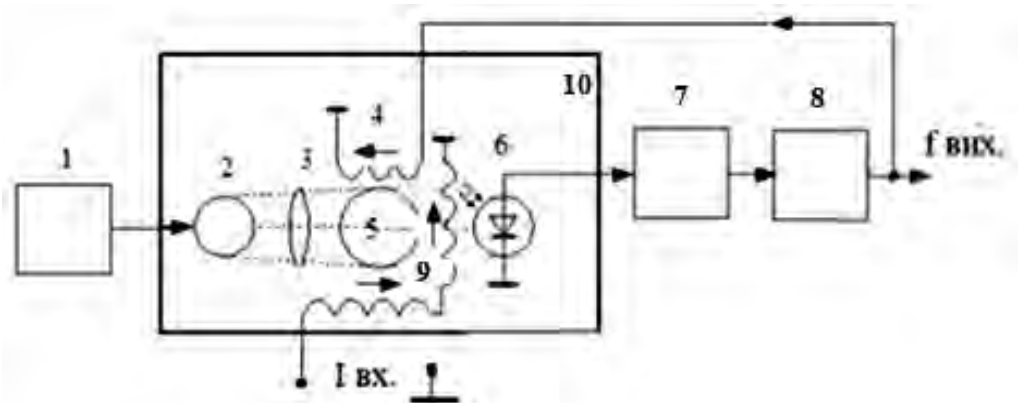


Рис. 3. Структура вимірювального перетворювача постійного струму

1 – генератор збудження спектральної лампи накачування;

2 – спектральна лампа накачування; 3 – фокусуюча лінза;

4 – котушка резонансного радіополя;

5 – комірка з газоподібною робочою речовиною; 6 – фотоприймач;

7 – підсилювач сигналу прецесії; 8 – 90° фазовертач;

9 – магнітна система ПП; 10 – магнітний екран.

Частотокерований калібратор постійного струму

На рис. 4 зображено структуру частотокерованого калібратора постійного струму (ЧКПС). Прилад побудовано на основі ВППС. Особливістю побудови ЧКПС є використання керованого стабілізатора постійного струму 13, включеного в коло навантаження R_N та ПП 9 ВППС. У межах нестабільності керованого стабілізатора 13 підстроювання струму стабілізації ведеться сигналом частотного детектора 11, на один вхід якого надходить частотокерований сигнал опорної частоти $f_{\text{опор}}$, а на інший – частотний сигнал ВППС, пропорційний до струму стабілізації в колі навантаження.

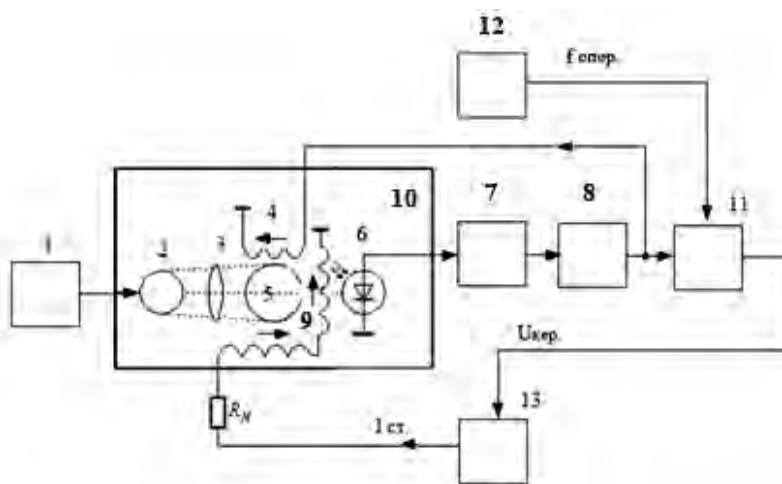


Рис. 4. Структура частотокерованого калібратора постійного струму

1 – генератор збудження спектральної лампи накачування;

2 – спектральна лампа накачування; 3 – фокусуюча лінза;

4 – котушка резонансного радіополя; 5 – комірка з газоподібною робочою речовиною;

6 – фотоприймач; 7 – підсилювач сигналу прецесії; 8 – 90° фазообертач;

9 – магнітна система; 10 – магнітний екран; 11 – частотний детектор;

12 – генератор опорної частоти; 13 – керований стабілізатор струму

Похибка стабілізації струму визначатиметься похибкою перетворення струму стабілізації на вихідний частотний сигнал ВППС, похибкою нестабільності частоти генератора опорної частоти 12 та похибкою відслідковування частоти ВППС до значення опорної частоти елемента 12. Зміною значення опорної частоти можна змінювати значення каліброваного струму.

Експериментальні дослідження ЧКПС показують, що при забезпеченні достатнього коефіцієнта екранування ВППС від впливу зовнішніх магнітних полів, за достатньої стабільності генератора опорної частоти 13 та первинного перетворювача 9 похибка нестабільності струму може мати значення $d_{\text{ст.}} \pm 0.0005\%$. Основною перевагою пропонованої міри струму є його мобільність та відсутність вимог, які накладаються на нормальні елементи.

Компаратор постійного струму

Значного підвищення точності порівняння постійних струмів можна досягти, застосовуючи компаратор постійного струму (КПС), побудований з використанням квантового магнітометричного сенсора (КМС) [1,3]. Особливо високу чутливість до вимірюваного постійного магнітного поля при мінімальних його значеннях КМС має в режимі параметричного резонансу, який полягає в явищі пересічення атомних магнітних підрівнів основного стану робочої речовини, наприклад, метастабільного гелію (He^4), при оптичній орієнтації, та магнітній модуляції вимірюваного магнітного поля. На рис. 5 показано структурну схему КПС із КМС у режимі параметричного резонансу. Порівнювані струми $I_{\text{вх.1}}$ та $I_{\text{вх.2}}$ магнітними системами 9 перетворюються на зустрічно направлені магнітні поля B_1 та B_2 , різниця яких сприймається коміркою поглинання 5 КМС. Оптичний сигнал, пропорційний до різниці цих полів, на частоті модуляції виділяється фотоприймачем 6 КМС та підсилюється вибіркоким підсилювачем 7. На виході фазового детектора 8 сигнал дорівнюватиме нулю при абсолютній рівності полів B_1 і B_2 , тобто коли $B_1 - B_2 = 0$, а у межах ширини резонансної характеристики пропорційний до значення величини цієї різниці. На виході фазового детектора включений фільтр 12 та індикатор напруги.

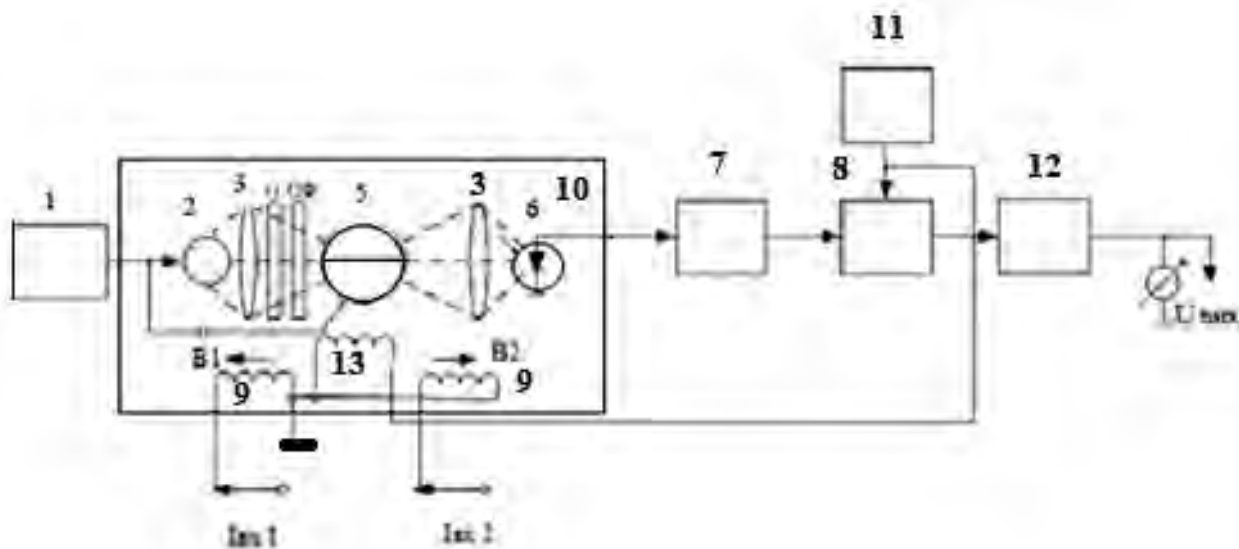


Рис. 5. Структура компаратора постійного струму:

- 1 – генератор збудження спектральної лампи накачування;
- 2 – спектральна лампа накачування; 3 – фокусуюча лінза;
- 5 – комірка з газоподібною робочою речовиною; 6 – фотоприймач;
- 7 – вибіркоким підсилювач; 8 – фазовий детектор; 9 – магнітні системи;
- 10 – магнітний екран; 11 – генератор модуляції; 12 – фільтр

Висновок

Наведені результати підтверджують можливість побудови мобільного комплексу апаратури, призначеної для перевірки вимірювальних приладів постійного струму класу точності понад 0,01, побудованих на основі квантових магнітометричних сенсорів. Особливістю пропонованого комплексу є застосування універсальної структури КМС, для якого тільки зовнішні комутації визначають тип приладу та його призначення. Це підтверджується структурами вимірювального перетворювача постійного струму, частотокерованого калібратора постійного струму та компаратора постійного струму. Точність та стабільність таких приладів забезпечується високою точністю визначення та стабільністю атомних констант робочої речовини, застосованих у КМС, стабільністю магнітної системи перетворення постійного струму на індукцію магнітного поля та ступенем захисту від впливу зовнішніх магнітних полів. Вимірювальний перетворювач, побудований на основі КМС для діапазону середніх значень струму, можна зарахувати до робочих засобів вимірювання струму, які мають експериментально підтверджену основну відносну похибку перетворення, не більшу за 0,005 %, у діапазоні вхідних струмів 10 мА – 1,0 А та вихідних частот 100 кГц – 10 МГц. Основна відносна похибка нестабільності струму частотокерованого калібратора досягає значення $d_{\text{ст.}} \leq \pm 0,0005$ % у діапазоні струмів 10 мА – 10 А, із дискретністю, що дорівнює дискретності задання частоти. Режим параметричного резонансу КМС використовується при побудові компаратора постійного струму. Такого типу компаратор може мати відносну похибку $2-7 \cdot 10^{-7}$ % у діапазоні струмів 10–100 мА.

Список літератури

1. Бобков Ю. М., Томаш М. Й., Гаранюк І. П. До питання побудови прецизійних перетворювачів та стабілізаторів струму // Вісник Львівського політехнічного інституту, “Автоматичні та інформаційно-обчислювальні пристрої” – 1972. № 68. С. 33–38.
2. Бобков Ю. Н., Гаранюк І. П. и др. Квантовые измерительные преобразователи / под общей ред. Ю. Н. Бобкова. Львов: Издательское объединение “Выща школа”, 1978. – 181 с.
3. Бичківський Р. В., Зорій В. І., Столярчук П. Г. Основи метрологічного забезпечення: навч. посіб. Львів: Видавництво Державного університету “Львівська політехніка”, 1999. – 180 с.
4. А. с. 2109191 (СССР). Квантовый магнитометр M_s -типа / Ю. Н. Бобков, И. П. Гаранюк и др. 1976.
5. Гаранюк І. П. Система компенсації залишкового поля магнітних екранів у стабілізаторі струму з квантовим магнітометричним перетворювачем: Збірник наукових праць Української Академії друкарства “Комп’ютерні технології друкарства”. 2010. № 24.
6. Обозовський С. С. Інформаційно-вимірювальна техніка / Методологічні питання теорії вимірювань. К.: ІСДО, 1993. 424 с.
7. Розенблат М. Г., Михайлов Г. Х. Источники калиброванных напряжений постоянного тока. М.: Энергия, 1976. 208 с.
8. Безикович А. Я. и др. Источник опорного напряжения для компенсационных измерительных систем постоянного тока // Исследования в области электрических измерений. Л.: Энергия, 1971. С. 58–63.
9. Зограф И. А. Методика расчета и анализ погрешностей преобразователей цифровых приборов, использующих явление ядерного магнитного резонанса // Сб. “Электроизмерительная техника и автоматика” ЛПИ им. М. И. Калинина, 1963. – С. 10–18.

Reference

1. Bobkov Yu. M., Tomash M. I., Haraniuk I. P. Do pyannia pobudovy pretsyziinykh peretvoriuvachiv ta stabilizatoriv strumu // Avtomatychni ta informatsiino-obchysliuvalni prystroi : Visnyk Lvivskoho politekhnichnoho instytutu, 1972. No. 68. S. 33–38.
2. Bobkov Yu. N., Garanyuk I. P. i dr. Kvantovyye izmeritelnyye preobrazovateli / Pod obschey red. k.t.n. Yu.N. Bobkova. Lvov: Izdatelskoe ob'edinenie “Vyischa shkola”, 1978. 181 s.
3. Bychkivskiy R. V., Zorii V. I., Stoliarchuk P. H. Osnovy metrolohichnoho zabezpechennia: Navchalnyi posibnyk. Lviv: Vydavnytstvo Derzhavnoho universytetu “Lvivska politekhnika”, 1999. 180 s.
4. А. s. 2109191 (SSSR). Kvantovyi mahnitometr M_s -tipa / Bobkov Yu. N., Haraniuk I. P. i dr. 1976.

5. Haraniuk I. P. Systema kompensatsii zalyshkovoho polia mahnitnykh ekraniv u stabilizatori strumu z kvantovym mahnitometrychnym peretvoriuvachem. Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoi Akademii drakarstva «Kompiuterni tekhnologii drakarstva», 2010, No. 24, s.
6. Obozovskyi S. S. Informatsiino-vymiriuvalna tekhnika / Metodolohichni pytannia teorii vymiriuvan. K.: ISDO, 1993. 424 s.
7. Rozenblat M.G., Mikhajlov G.Kh. Istochniki kalibrovanny`kh napryazhenij postoyannogo toka. M.: E`nergiya, 1976. 208 s.
8. Bezikovich A. Ya. i dr. Istochnik opornogo napryazheniya dlya kompensatsionny`kh izmeritel`ny`kh sistem postoyannogo toka // Issledovaniya v oblasti e`lektricheskikh izmerenij. L: E`nergiya, 1971. S. 58–63.
9. Zograf I. A. Metodika rascheta i analiz pogreshnostej preobrazovatelej czifrovy`kh priborov, ispol`zuyushchikh yavlenie yadernogo magnitnogo rezonansa // Sb. "E`lektroizmeritel`naya tekhnika i avtomatika" LPI im. M. I. Kalinina, 1963. S. 10–18.