

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПІДСИЛЕННЯ СИГНАЛІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Пропонується метод підвищення точності вимірювального підсилення слабких сигналів постійного струму, який ґрунтується на знайдених авторами властивостях функцій відносної чутливості та призначений для створення прецизійних підсилювачів як масштабних чи нормуючих перетворювачів сигналів для інформаційно-вимірювальних систем.

The method of accuracy increasing of measuring amplification of direct current weak signal is suggested. It is based on properties of relative sensitivity functions, which are proposed by authors. The method is destined for making sensitive amplifiers as zoom or normalizing converters for information-measuring system.

Ключові слова: функції чутливості, точність, адитивна похибка, мультиплікативна похибка, інваріант, підсилення.

Вступ. Вимірювальне підсилення слабких електричних сигналів постійного струму суміщає операцію вимірювання напруги з операцією підсилення до необхідної величини з метою їх використання в системах інформації та управління. Саме тому до вимірювальних підсилювачів ставляться вимоги високої стабільності заданого значення коефіцієнта підсилення у всьому динамічному діапазоні та високої чутливості в нижній ділянці динамічного діапазону. Дія дестабілізуючих зовнішніх факторів навколишнього середовища та внутрішніх факторів, пов'язаних зі старінням та деструктуризацією схемних елементів, завдає труднощів у реалізації вказаних вимог. Ці труднощі ускладнюються явищем дрейфу нуля та електромагнітними завадами. Тому прямому вимірювальному підсиленню, як і багатьом вимірювальним перетворенням, притаманні мультиплікативні, адитивні похибки та похибка нелінійності.

Вимірювальні підсилювачі постійного струму складають окрему групу (У7) стандартних засобів вимірювання, які серійно виробляє промисловість, але важко переоцінити той обсяг нестандартних вимірювальних підсилювачів постійного струму, що в якості масштабуючих чи нормуючих перетворювачів впроваджуються в комп'ютеризовані системи інформації та управління. Тому вже тривалий час залишається актуальною проблема підвищення точності цієї групи засобів вимірювання.

Метод прецизійного вимірювального підсилення, що надалі обговорюється, започатковано двома фундаментальними теоріями – теорією зворотного зв'язку та теорією інваріантності [1–3]. Запропонований метод найбільш послідовно наближений до вказаних публікацій, аналіз яких призводить до висновку, що, по-перше, подальше поглиблення негативного зворотного зв'язку (НЗЗ) для зменшення мультиплікативної похибки обмежене втратою динамічної стійкості, по-друге, НЗЗ не зменшує адитивну похибку, нарешті, виконання умов інваріантності породжує багатоканальність, яка, в свою чергу, супроводжується не ідентичністю параметрів каналів, а це не сприяє досягненню повної інваріантності.

Метою запропонованого методу підвищення точності вимірювального підсилення є безперервна автоматична корекція мультиплікативної та адитивної похибки, створення вбудованої взірцевої міри для поточного метрологічного забезпечення результату вимірювального підсилення та використання обчислювальних та керуючих можливостей комп'ютеризованої системи, яка використовує вимірювальні підсилювачі, що реалізують даний метод.

Виконані дослідження базуються на адекватності методу математичної моделі вимірювального підсилювача слабких електричних сигналів постійного струму та його функціональних ланок.

Перетворення виду функцій відносної чутливості. Помічена важлива властивість інваріантності функції вимірювального перетворення до дії дестабілізуючих факторів: умова абсолютної інваріантності – це умова нульової чутливості [3]. Саме це спрямувало дослідження застосування математичного апарату теорії чутливості для вирішення поставленої задачі.

Якщо рівняння вимірювального перетворення є функцією схемних параметрів K , β , тобто $y = f(K, \beta)$, то функції відносної чутливості визначають диференціюванням цього рівняння за схемними параметрами [4]

$$\varphi_K^{(y)} = \frac{\partial y}{\partial K} \cdot \frac{K}{y}, \quad \varphi_\beta^{(y)} = \frac{\partial y}{\partial \beta} \cdot \frac{\beta}{y}. \quad (1)$$

Виникає складність у точному виконанні операції диференціювання функції $y(K, \beta)$ з невідомими параметрами. Розклад функції у ряд Тейлора, наприклад, дає похибку декілька відсотків [5]. Ця складність спрощується шляхом перетворення функції відносної чутливості у диференційній формі у функції відносної та напіввідносної чутливості за кінцевими приростами параметрів та доказом їх адекватності за результатом математичних операцій з ними. Одержані функції відносної та напіввідносної чутливості мають такий вигляд

$$f_K^{(y)} = \frac{\Delta y}{\Delta K} \cdot \frac{K}{y}, \quad f_\beta^{(y)} = \frac{\Delta y}{\Delta \beta} \cdot \frac{\beta}{y}. \quad (2)$$

Фундаментальні властивості функцій відносної чутливості в кінцевих приростах. Функція вимірювального підсилення має такий вид (рис. 1)

$$u_{вих} = \frac{\bar{K} \cdot u_{ex} + \bar{a}}{1 + \bar{K} \cdot \beta}, \quad (2)$$

де \bar{a} – абсолютна величина адитивної похибки; \bar{K} – коефіцієнт підсилення прямого каналу; β – коефіцієнт ЗЗ. Риска над позначенням величини означає її схильність до дії дестабілізуючих факторів, тобто нестабільність.

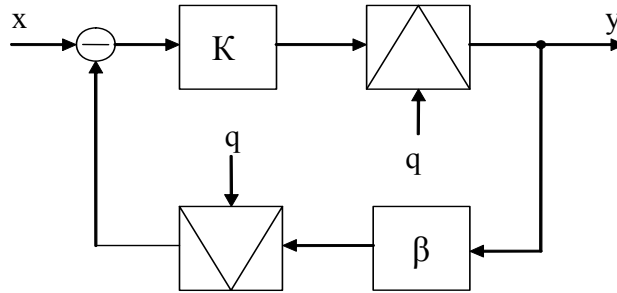


Рис. 1. Структура вимірювального перетворювача із параметричним НЗЗ

Існують інші записи функції вимірювального підсилення:

$$u_{вих} = \frac{\bar{K} + \bar{S}_a}{1 + \bar{K} \cdot \beta} u_{ex}, \quad (3)$$

де $\bar{S}_a = \frac{\bar{a}}{u_{ex}}$ – відносна величина адитивної похибки, що приведена до вхідної величини (напруги u_{ex})

$$u_{вих} = \frac{\bar{K}}{1 + \bar{K} \cdot \beta} u_{ex} + \bar{u}_a = \bar{S} \cdot u_{ex} + \bar{u}_a, \quad (4)$$

де $\bar{S} = \frac{\bar{K}}{1 + \bar{K} \cdot \beta}$ – загальний коефіцієнт підсилення з НЗЗ; $u_a = \frac{a}{1 + K\beta}$ – абсолютна величина адитивної похибки, що приведена до виходу вимірювального підсилювача

$$u_{вих}^{(K)} = \frac{q\bar{K} + \bar{S}_a}{1 + q\bar{K}\beta} \cdot u_{ex}, \quad (5)$$

$$u_{вих}^{(\beta)} = \frac{\bar{K} + \bar{S}_a}{1 + q\bar{K}\beta} \cdot u_{ex}, \quad (6)$$

де q – коефіцієнт мультиплікативної зміни параметрів \bar{K} , β .

Важливі властивості функцій відносної чутливості вихідної величини функції вимірювального підсилення до зміни параметрів \bar{K} , β визначаються наведеними нижче теоремами.

Теорема 1. Сума функцій відносної чутливості Q_K та P_β до параметрів K і β функції

вимірювального підсилення $u_{вих} = \frac{\bar{K} + \bar{S}_a}{1 + \bar{K} \cdot \beta} u_{ex}$ наближається до інваріанту $J(u) = 1$ на величину $\varepsilon = \frac{u_a}{u_{вих}}$

$$1 - [Q_K + (-P_\beta)] = \varepsilon.$$

Доказ. Функції відносних чутливостей в кінцевих приростах визначаються залежностями

$$Q_K = \frac{\Delta u_{вих}^{(K)}}{\Delta q} \cdot \frac{1}{u_{вих}^{(K)}} = \frac{\bar{K}(1 - \beta\bar{S}_a)}{(1 + \bar{K}\beta)(\bar{K} + \bar{S}_a)}, \quad (7)$$

$$P_\beta = \frac{\Delta u_{вих}^{(\beta)}}{\Delta q} \cdot \frac{1}{u_{вих}^{(\beta)}} = -\frac{\bar{K}\beta}{1 + \bar{K}\beta}, \quad (8)$$

де

$$\Delta u_{вих}^{(K)} = u_{вих} - u_{вих}^{(K)} = \frac{\bar{K}\Delta q(1 - \beta\bar{S}_a)}{(1 + \bar{K}\beta)(1 + Kq\beta)} \cdot u_{ex}, \quad (9)$$

$$\Delta u_{вих}^{(\beta)} = u_{вих} - u_{вих}^{(\beta)} = \frac{\bar{K}\beta\Delta q(\bar{K} + \bar{S}_a)}{(1 + \bar{K}\beta)(1 + Kq\beta)} \cdot u_{ex}, \quad (10)$$

$$\Delta q = 1 - q.$$

Наближення ε до інваріанту $J(u) = 1$ має величину

$$1 - \frac{\bar{K}(1 - \beta\bar{S}_a)}{(1 + \bar{K}\beta)(\bar{K} + \bar{S}_a)} - \frac{\bar{K}\beta}{1 + \bar{K}\beta} = \varepsilon, \quad (11)$$

$$\varepsilon = \frac{\bar{S}_a}{1 + \bar{K}\beta} \cdot \frac{1 + \bar{K}\beta}{\bar{K} + \bar{S}_a}.$$

Прийmemo до уваги, що $\bar{S}_a = \frac{\bar{a}}{u_{ex}}$, $\bar{u}_a = \frac{\bar{a}}{1 + \bar{K}\beta}$, $\frac{\bar{K} + \bar{S}_a}{1 + \bar{K}\beta} = \frac{u_{вих}}{u_{ex}}$, вираз (11) набуває вигляду

$$\varepsilon = \frac{\bar{a}}{u_{ex}(1 + \bar{K}\beta)} \cdot \frac{1}{\frac{\bar{K} + \bar{S}_a}{(1 + \bar{K}\beta)}} = \frac{u_a}{u_{вих}}, \quad (12)$$

що і треба було довести.

Наслідок теореми 1. Функції відносної чутливості, що визначаються виразами (7)-(10) в приростах параметрів, визначаються також в приростах вихідної напруги, що обумовлені приростами параметрів

$$\left. \begin{aligned} u_{вих} &= \frac{K + S_a}{1 + K\beta} \cdot u_{ex}, \\ u_{вих}^{(K)} &= \frac{qK + S_a}{1 + qK\beta} \cdot u_{ex}, \\ u_{вих}^{(\beta)} &= \frac{K}{1 + qK\beta} \cdot u_{ex} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Адитивна похибки \bar{u}_a виражається залежністю

$$\bar{u}_a = \frac{u_{вих}^{(K)} - qu_{вих}^{(\beta)}}{\Delta qu_{вих}^{(\beta)}} \cdot u_{вих}. \quad (14)$$

Функція вимірювального підсилення (4) корегується за адитивною похибкою

$$u_{вих}^{(кор)} = u_{вих} - \bar{u}_a = \bar{S}u_{ex} + \bar{u}_a - \bar{u}_a,$$

$$u_{вих}^{(кор)} = \frac{u_{вих}^{(\beta)} - u_{вих}}{(u_{вих}^{(\beta)} - u_{вих}^{(K)})\beta} \cdot u_{ex}. \quad (15)$$

Останній вираз надає можливість визначити підсиловану напругу, яка виражається

$$u_{ex} = \frac{u_{вих}^{(\beta)} - u_{вих}^{(K)}}{u_{вих}^{(\beta)} - u_{вих}} \cdot \beta \cdot u_{вих}^{(кор)}. \quad (16)$$

Теорема 2. Залежність між функціями відносної чутливості Q_K , P_β

$$M = \frac{P_\beta}{Q_K - P_\beta}$$

є зворотним відношенням $T = -\beta \frac{u_{вих}}{u_{ex}}$ функції вимірювального підсилення з НЗЗ $u_{вих} = \frac{\bar{K} + \bar{S}_a}{1 + \bar{K}\beta} \cdot u_{ex}$.

Доказ. Залежність M між відносними чутливостями Q_K , P_β за параметрами K , β та за відносною адитивною похибкою \bar{S}_a має наступне перетворення

$$M = \frac{P_\beta}{Q_K - P_\beta} = -\frac{\bar{K}\beta}{1 + \bar{K}\beta} \left/ \left(\frac{\bar{K}(1 + \beta\bar{S}_a)}{(1 + \bar{K}\beta)(\bar{K} + \bar{S}_a)} + \frac{\bar{K}\beta}{1 + \bar{K}\beta} \right) \right. = \quad (17)$$

$$= -\beta \frac{\bar{K} + \bar{S}_a}{1 + \bar{K}\beta}.$$

Термін «зворотне відношення» та його вираз відомі з роботи [6].

Зворотне відношення перетворюється наступним чином

$$T = -\beta \frac{u_{вих}^{(\beta)}}{u_{вх}} = -\beta \frac{\bar{K} + \bar{S}_a}{1 + \bar{K}\beta}. \quad (18)$$

З виразів (17), (18) видно, що $T \equiv M$.

Наслідок до теореми 2. Встановлена залежність M між функціями чутливості (7), (8) надає можливість визначати параметри \bar{S} , \bar{K} , T як функції відомих вихідних напруг

$$\bar{S} = \frac{u_{вих}^{(\beta)} - u_{вих}}{\Delta q \beta u_{вих}^{(\beta)}}, \quad (19)$$

$$\bar{K} = \frac{u_{вих}^{(\beta)} - u_{вих}}{(u_{вих} - q \beta u_{вих}^{(\beta)})\beta}, \quad (20)$$

$$T = \frac{u_{вих}^{(\beta)} - u_{вих}}{u_{вих}^{(\beta)} - u_{вих}^{(K)}}. \quad (21)$$

Глибина зворотного зв'язку $F = T + 1$ [7] також визначається як функція відомих вихідних напруг

$$F = \frac{u_{вих}^{(\beta)} - u_{вих}^{(K)}}{u_{вих}^{(\beta)} - u_{вих}^{(K)}}. \quad (22)$$

Математична модель вимірювального підсилення електричних сигналів постійного струму.

Функції відносної чутливості надають можливість побудувати математичну модель вимірювального підсилення, керуючись залежностями між ними, які встановлені теоремами 1, 2.

Побудова математичної моделі виконується таким чином:

- визначається за функціями відносної чутливості загальний коефіцієнт підсилення \bar{S} ;
- визначається абсолютна адитивна похибка \bar{u}_a та надається їй від'ємне корегуюче значення.

Таким чином, математична модель набуває наступного вигляду

$$u_{вих} = \frac{-P\beta}{(Q_K - P\beta)^2} u_{вх}. \quad (23)$$

Математична модель вимірювального підсилення за варіаціями вихідної напруги вже наведена в (15). Метрологічна атестація вимірювального підсилювача виконуються з допомогою взірцевої міри, роль якої виконує коефіцієнт зворотного зв'язку β . Згідно з (15) перевіряється на відповідність таке рівняння у всьому динамічному діапазоні підсилення

$$\beta = \frac{u_{вих}^{(\beta)} - u_{вих}}{u_{вих}^{(\beta)} - u_{вих}^{(K)}} \cdot \frac{u_{вх}}{u_{вих}^{(кор)}}. \quad (24)$$

Висновки

1. Встановлено вид функції відносної чутливості за кінцевими приростами параметрів вимірювального перетворення. На відміну від диференційної форми, яка відома, ця функція відтворюється схемотехнічно самим вимірювальним засобом та обчислюється комп'ютерною системою, в якій вимірювальний засіб функціонує.

2. Визначені фундаментальні властивості функцій відносної чутливості в кінцевих приростах, що надають можливість побудувати математичну модель вимірювального підсилення слабких електричних сигналів динамічно стійким підсилювачем з НЗЗ.

3. Запропоновано метод вимірювального підсилення з визначенням величини напруги підсилюваного сигналу, похибка якого залежить від точності взірцевої міри, похибки вимірювання вихідної напруги високого рівня та швидкодії, операцій підсилення та вимірювання.

4. Метод може бути використаний у створенні прецизійних вимірювальних підсилювачів для комп'ютерних систем інформації та управління.

Література

1. Horovits I. Synthesis of Feedback System. Academic Press / Horovits I. – New York and London, 1963. – 600р.
2. Кухтенко А.И. Проблема инвариантности в автоматике / Кухтенко А.И. – К. : Гостехиздат, 1963.

3. Webster J.G. The measurement, instrumentation and sensors handbook / Webster J.G. – United States, CRC Press LLC, 1999. – 2617ps.
4. Моставлюк А.С. Синтез алгоритмів високоточного визначення функції вимірювального перетворення/ А.С. Моставлюк // Наукові вісті НТУУ «КПІ» 2007. – № 6 – С. 121–125.
5. Ходько С.Т. Проектирование систем управления с нестабильными параметрами / Ходько С.Т. – Л. : Машиностроение, 1982. – 232 с.
6. Ernest O. Doebelin. Measurement System. Application and Design/ Ernest O. Doebelin. – Singapore, McGraw Hill Professional, 2004. – 1078ps.

Надійшла 8.7.2011 р.

Рецензент: д.т.н., проф. О.М. Шинкарук

УДК 621.3.029.6

Ю.В. ШИНКАРЕНКО, В.А. МИХАЙЛЕЦ
Киевский национальный университет технологий и дизайна

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ВЛАЖНОСТИ ГАЗОВ. СООБЩЕНИЕ 1

В статье произведен анализ напряженности магнитного поля влагопреобразующего элемента, а также анализ дрейфа гигроскопического вещества в межэлектродном промежутке, при переносе электрических зарядов, вследствие воздействия на их транспортные процессы ортогональных электрического и магнитного полей преобразователя. Полученные результаты позволят разрабатывать конструкции влагопреобразующих элементов с улучшенными техническими характеристиками.

In the article an analysis of magnetic field strength of humidity-sensitive element has been performed, as well as an analysis for the drift of absorbing material (humectants) within inter-electrode space (spark gap) while electric charges being transferred due to the transportation processes of abovementioned electric charges being affected by orthogonal electromagnetic fields of humidity transformer. This analysis will allow to developing the designs of humidity sensitive elements with enhanced operational and metrological capabilities.

Ключевые слова: термоэлектrolитический преобразователь влажности газовых сред, влагопреобразующий элемент, принцип суперпозиции полей, ресурс, дрейф, напряженность магнитного поля, гигроскопическое вещество (сорбент), межэлектродный промежуток, радиальный интеграл.

Вступление

В настоящее время в литературе при описании работы термоэлектrolитического преобразователя влажности газовых сред (ТЭПВ) отсутствует удовлетворительное описание физико–химических процессов протекающих в ТЭПВ при его эксплуатации. По этой причине его конструктивные и эксплуатационные решения лишены строгого научного обоснования и базируются, в основном, на экспериментальном поиске [1].

Постановка задачи

Авторами настоящей работы установлено, что на физико–химические процессы, протекающие в ТЭПВ при его эксплуатации, оказывает воздействие магнитное поле, существующее во влагопреобразующем элементе (ВПЭ), вследствие протекания по его электродам электрического тока. В этой связи представляется целесообразным произвести анализ напряженности магнитного поля влагопреобразующего элемента ТЭПВ для расчета профиля скорости дрейфа гигроскопического вещества в его межэлектродном промежутке. Аналогичные работы в научной литературе авторами настоящей статьи не обнаружены. Результаты исследования в конечном итоге позволят разрабатывать конструкции ТЭПВ и способы их эксплуатации с увеличенным ресурсом за счет предотвращения массопереноса сорбента. Так как подобные исследования производятся впервые, то из–за большого объема материала статья изложена в двух сообщениях, причем нумерация таблиц, рисунков, формул и использованная литература в выше упомянутой рубрике – сплошная (для удобства восприятия материала).

Результаты исследования

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КОЛЬЦЕВОГО ТОКА ОДНОГО ВИТКА ЭЛЕКТРОДОВ

Влагопреобразующий элемент ТЭПВ представляет собой цилиндрическую поверхность, на которую намотаны два электрода, т.е. представляют собой две винтовые линии одна в другой [2].

Винтообразную обмотку электродов аппроксимируем системой плоских круговых токов радиусом, равным радиусу цилиндрической поверхности ВПЭ. Выведем выражение для вычисления напряженности магнитного поля кругового тока (одного витка электрода) в любой точке цилиндрической поверхности межэлектродного промежутка, контуром сечения которого является виток электрода.

Для определения напряженности магнитного поля H в некоторой точке M , показано на рис. 1, лежащей на боковой поверхности цилиндра ВПЭ радиусом R и отстоящей от плоскости витка кругового тока на расстоянии $x = MN$, воспользуемся законом Био–Савара–Лапласа, позволяющего найти вектор напряженности магнитного поля электрического кругового тока [3]: