

# Розробка нового підходу проектування інтегральних сенсорів струму

Корчака М.О., ORCID [0000-0001-5370-7307](https://orcid.org/0000-0001-5370-7307)

Факультет електроніки

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Київ, Україна

**Анотація**—В цій статті розглядаються сучасні проблеми проектування датчиків струму як частини інтегральних мікросхем, серед яких точність, займане місце на кристалі, а також складність проектування і розробки. Розглянуто, загальний для більшості випадків, «струмовий» підхід проектування інтегральних датчиків, а також альтернативні підходи: підхід з використання «віртуальної» землі та повністю диференційний підхід. Для цих підходів проведено порівняльний аналіз разом з виокремленням переваг і недоліків кожного. На основі аналізу цих підходів запропоновано новий комбінований підхід, який буде мати кращі характеристики.

**Ключові слова** — інтегральний сенсор струму; вимірювання струму від плюса живлення; струмовий підхід; віртуальна земля.

## I. ВСТУП

Задача вимірювання із заданою точністю значення струму, що проходить через навантаження, є важливою в електроніці, наприклад для пристроїв управління акумуляторами, для пристроїв управління двигунами, для пристроїв захисту від перенапруги [1]. Для цього Існує кілька типів датчиків струму: індуктивні датчики (наприклад котушки Роговського) [2], датчики магнітного поля (на основі ефекту Холла) і датчики, які міряють напругу на шунті. Індуктивні та магнітні датчики дозволяють безконтактно вимірювати струм і добре підходять для високовольтних застосувань. Однак індуктивні датчики чутливі виключно до змінного струму. Також індуктивні та магнітні датчики відносно складні і дорогі у виробництві. Альтернативним рішенням є використання датчиків, які міряють напругу на прецизійних резисторах-шунтах. Оскільки вони прості та дешеві у виробництві, то вони знайшли широке використання в електроніці. Споживаний навантаженням струм можна виміряти, розмістивши прецизійний резистор між навантаженням і землею, або між шиною живлення і навантаженням. Перша конфігурація називається вимірювання струму від мінуса живлення (землі), а друга – вимірювання струму від плюса живлення [3].

Вимірювання струму від плюса живлення має дві основні переваги над вимірюванням від мінуса живлення: 1) даний спосіб може виміряти високі струми через навантаження, викликані раптовими короткими замиканнями в схемі; 2) включення в такий спосіб не впливає на опір шини землі. Однак для вимірювання струму від плюса живлення датчик має бути в змозі працювати з напругами, синфазний сигнал яких визначається напругою живлення і може становити кілька десятків вольт [4].

На сьогоднішній день на ринку електроніки є багато датчиків, які можуть міряти струм з високою точністю. Зазвичай ці датчики є дискретними, тобто виробляються як окремий чип. Однак для таких мікросхем як, наприклад, контролер BLDC двигуна в автомобілі, датчик струму має бути вбудованим в мікросхему. Створити вбудований датчик зі схожими параметрами як у дискретних датчиків – неможливо [5]. Це зумовлено малою площею кристалу відведеною для реалізації датчику струму (порядку 250000 мкм<sup>2</sup>).

На сьогодні серед виробники інтегральних мікросхем є поширеним виготовлення вбудованих датчиків струму, які міряють напругу на шунті, з використанням «струмового» підходу [6]. Приклад схеми, яка використовує даний підхід зображено на Рис. 1.

Для того щоб така схема могла фіксувати струм, що протікає у двох напрямках, від джерела до навантаження і навпаки від навантаження до джерела, необхідно створювати вбудоване зміщення в операційний підсилювач [7]. Однак під час масового виробництва, значення цього зміщення від мікросхеми до мікросхеми буде сильно варіювати. Це пов'язано із похибками у технологіях виробництва. Також дана схема є дуже чутливою до варіацій в напрузі живлення і до варіацій в напрузі синфазного сигналу, що може спричинити велику похибку вимірювання на виході. В таких схемах напругою живлення операційного підсилювача є напруга живлення схеми [3]. У зв'язку з цим операційний підсилювач має бути побудований на високовольтних транзисторах, які займають багато місця на кристалі, а також дуже чутливі до технологічного процесу.



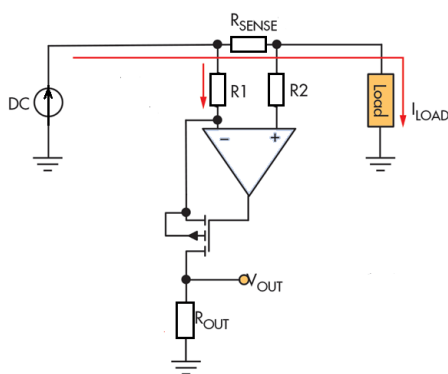


Рис. 1 «Струмовий» підхід вимірювання струму

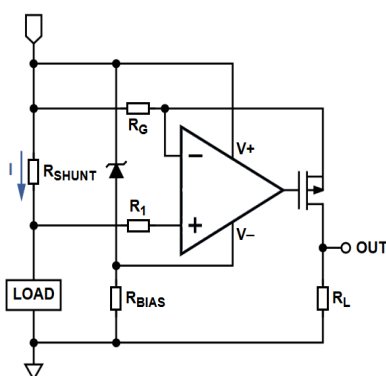


Рис. 2 Підхід "віртуальної" землі

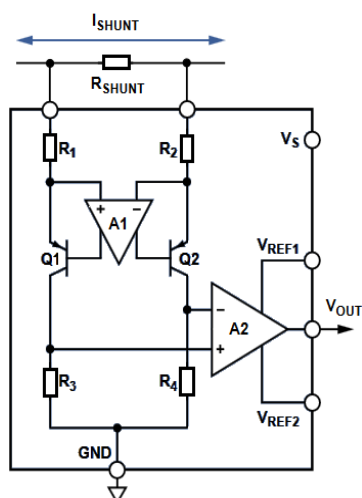


Рис. 3 Повністю диференційний підхід

Отже, задача розробки нового підходу проектування інтегральних датчиків струму, які займають малу площу на кристалі, використовують мінімум високовольтних транзисторів, вимірюють струм із високою точністю в діапазоні температур від  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , з високим коефіцієнтом подавлення синфазного сигналу, похибки яких мало залежать від технологічного процесу, є актуальною.

## II. Існуючі підходи розробки інтегральних датчиків струму

При огляді літератури було знайдено кілька можливих рішень. Перше з них - це створення «віртуальної» землі для низьковольтного підсилювача диференційної входної напруги в однополярну напругу [1]. На Рис. 2 наведено приклад схеми, що використовує цей підхід. Ця схема вимірює струм від плюса живлення.

Напруга живлення підсилювач визначається напругою, що падає на стабілітроні, яка у цьому випадку становить 5,1 В. Далі вихідна з операційного підсилювача напруга конвертується в струм, протікання якого через вихідний резистор визначає напругу виходу датчика. Дана напруга буде визначатися відносно землі і тому може бути безпосередньо використана для подальшого аналізу її схемою. Використання стабілітрона забезпечує безпечну роботу підсилювача з напругою, яка має високу синфазну складову, а також забезпечую стабільне значення напруги живлення операційного підсилювача.

Другий підхід – використання повністю диференційної системи. Приклад схеми, що використовує такий підхід, зображено на Рис. 3.

Система складається з двох основних блоків: диференційного підсилювача та інструментального підсилювача. Вхід підключений до диференційного підсилювача A1 через R1 і R2. Коли вхідний сигнал системи дорівнює нулю, струми через R1 і R2 рівні. Коли диференціальний сигнал не є нульовим, струм збільшується через один з резисторів, а в іншому зменшується. Різниця в струмі пропорційна розміру та полярності вхідного сигналу.

Різні диференційні струми через Q1 і Q2 перетворюються в диференційну напругу за допомогою R3 і R4. Інструментальний підсилювач A2 перетворює вхідну диференційну напругу в однополярну вихідну напругу на A2.

## III. Розробка нового підходу на основі аналізу існуючих

Підхід з використанням «віртуальної» землі легко може бути реалізованим, оскільки він не вимагає використання високовольтних транзисторів і подальшого їх налаштування одне під одного [3]. Однак, для вимірювання струму, що протікає в двох напрямках, необхідно створювати вбудоване зміщення, як це було необхідно для «струмового» підходу, що є проблемою.

Використання повністю диференційного підходу забезпечує систему високим коефіцієнтом послаблення синфазного сигналу [8]. За такого підходу струм може мірятися у двох напрямках, причому немає необхідності створювати для цього вбудоване зміщення. Недоліком цього підходу є використання інструментального підсилювача, оскільки його важко реалізувати схемотехнічно [9].

Переваги і недоліки підходів виокремлено у Таблиця 1.

ТАБЛИЦЯ 1 ПОРІВНЯННЯ ПІДХОДІВ ВИМІРЮВАННЯ СТРУМУ

Підхід	Переваги	Недоліки
«Віртуальна земля»	Легко реалізується схемотехнічно. Можна уникнути використання високовольтних транзисторів.	Необхідність створювати вбудоване зміщення для вимірювання струму в двох напрямках.
Повністю диференційний	Високий коефіцієнт послаблення синфазного сигналу	Необхідність створювати повністю диференційний підсилювач.

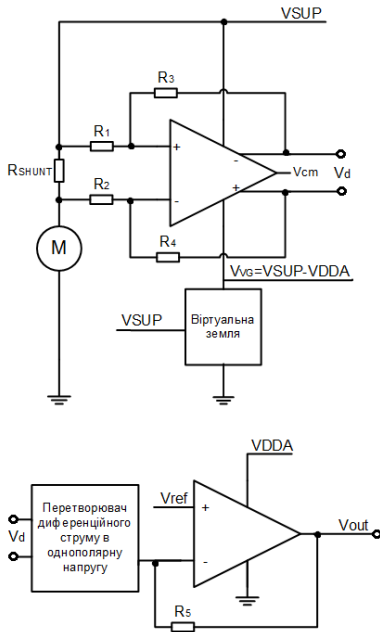


Рис. 4 Функціональна блок-схема нового підходу

В результаті аналізу існуючих підходів пропонується використання нового підходу на основі використання частково диференційної системи із віртуальною землею.

Вхід першого підсилювача є повністю диференційним. За допомогою створеної віртуальної землі, напруга живлення цього підсилювача буде рівна напрузі аналогового живлення. Тому система буде завадо стійкою і для неї непотрібно використовувати високовольтні транзистори.

Диференційний сигнал далі буде перетворений у струм, а потім у не диференційну напругу [10], яка далі піде на вхід аналого-цифрового перетворювача. Блок діаграму підходу зображено на Рис. 4.

#### ВИСНОВКИ

Використання новий підходу зможе усунути існуючі проблеми для інтегральних давачів струму.

Подальшим завданням є схемотехнічна реалізація даного рішення із подальшим моделюванням і дослідженням.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] J. W. Dixon and L. A. Leal, "Current control strategy for brushless DC motors based on a common DC signal," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 17, no. 2, pp. 232–240, Mar. 2002, DOI: [10.1109/63.988834](https://doi.org/10.1109/63.988834).
- [2] D. A. Ward and J. L. T. Exon, "Using Rogowski coils for transient current measurements," *Eng. Sci. Educ. J.*, vol. 2, no. 3, p. 105, 1993, DOI: [10.1049/ESEJ:19930034](https://doi.org/10.1049/ESEJ:19930034).
- [3] S. N. Easwaran, "High-Side Current Regulation and Energy Limitation," in *Current Sensing Techniques and Biasing Methods for Smart Power Drivers*, Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 43–71, URL: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-71982-5\\_4](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-71982-5_4).
- [4] S. N. Easwaran, "Low-Side Current Regulation and Energy Limitation," in *Current Sensing Techniques and Biasing Methods for Smart Power Drivers*, Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 73–91, URL: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-71982-5\\_5](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-71982-5_5).
- [5] P. Gray, P. Hurst, S. Lewis, and R. Meyer, *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits*. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010, ISBN: 978-0-470-24599-6.
- [6] Chucheng Xiao, Lingyin Zhao, T. Asada, W. G. Odendaal, and J. D. van Wyk, "An overview of integratable current sensor technologies," in *38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003.*, 2003, vol. 2, pp. 1251–1258, DOI: [10.1109/IAS.2003.1257710](https://doi.org/10.1109/IAS.2003.1257710).
- [7] B. Razavi, *Design of Analog CMOS Integrated Circuits*. New York: McGraw-Hill Education, 2017, ISBN: 978-0-07-252493-2.
- [8] F. O. Eynde, P. Wambacq, and W. Sansen, "On the relationship between the CMRR or PSRR and the second harmonic distortion of differential input amplifiers," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 24, no. 6, pp. 1740–1744, 1989, DOI: [10.1109/4.45014](https://doi.org/10.1109/4.45014).
- [9] J. Baker, *CMOS: Circuit Design, Layout, and Simulation, 4th Edition*. Wiley-IEEE Press, 2019, ISBN: 978-1-119-48151-5.
- [10] W. Surakampontorn, V. Riewruja, K. Kumwachara, C. Surawatpunya, and K. Anuntahirunrat, "Temperature-insensitive voltage-to-current converter and its applications," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 48, no. 6, pp. 1270–1277, 1999, DOI: [10.1109/19.816147](https://doi.org/10.1109/19.816147).

UDC 621.3

# Development of the New Approach for High-Side Current Sensing

M. O. Korchaka, ORCID [0000-0001-5370-7307](https://orcid.org/0000-0001-5370-7307)

Faculty of electronics

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Kyiv, Ukraine

**Abstract**—Accurate current sensing is critical in many applications including battery management, motor control, and over-current protection. Current can be sensed by either placing a small shunt resistor between the load and ground or between the battery and the load. High-side current sensing has two major advantages over low-side current sensing: it can detect high load current caused by accidental shorts, and it does not increase the resistance in the ground path. However, it does require interface circuits that can handle input common-mode voltages up to the battery voltage, which can be several tens of volts. The first part of this paper consists of a brief review of the existing approaches and methods of current sensing that widely used nowadays. This is followed by researching and development new schematic solution of the high-side current sensing which doesn't need usage of HV amplifiers, has variable gain and has small gain error in temperature range from  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Finally, suggested solution will be discussed and compared to existed ones. In previous current approach was used for high-side current measurement. However, this approach is not appropriate in mass production. So, the task of this work was to find out or come up with new solution, which would have same or better characteristics then previous one and would result in good yield in mass production. In reviewing the literature, several possible solutions were found. First of them is creating virtual ground for low voltage differential-input-single-output amplifier. Second approach is using fully differential system it comprises two main blocks, a differential amplifier, and an instrumentation amplifier. First approach is simple to be implemented and it doesn't need matched high voltage transistors. However, one unanticipated finding was that it was not easy to create build in offset, so this approach can't measure bidirectional current. Second approach system has good noise immunity and it is to create build in offset. At the same time, it is complex because of presence of instrumental amplifier in the second stage. Instrumental amplifier is hard to design and to match. As a result, new approach is proposed. This is mixing of differential-input-differential-output amplifier and virtual ground. This finding supports the ideas of previously described solutions. It has fully differential input, which results in high CMRR and PSRR, furthermore, it doesn't require matched HV transistors because of virtual ground for amplifier. In addition, this schematic can be easily matched in terms of temperature dependence. However, new solution has a drawback, that is relatively big input current.

**Keywords** — *current measurement; high-side current sensing; automotive; virtual ground; high voltage common mode.*

