

Вимірювання сили струму навантаження за допомогою ІС цифрового керування електроживленням по шині PMBus

Частина 2

Міхаель Пітерс (Michael Peters)

У другій частині статті описуються методи вимірювання сили струму в лініях живлення під високою або від'ємною напругою та налаштування регістрів конфігурації для методу вимірювання через вивід IMON. У цій публікації розглянуто питання точності вимірювання струму та надано вказівки щодо програмування ІС за допомогою ПЗ LTpowerPlay. Перша частина циклу була присвячена загальним питанням вимірювання струму, зокрема різним методам і топологіям схем.

ПЕРЕХОДИМО МЕЖИ

Для ІС сімейства LTC297x задано гранично допустимі рівні напруги, що подається на вимірювальні входи — як V_{SENSE} так і I_{SENSE} . Більша частина подальшого обговорення стосується майже всіх ІС сімейства LTC297x, для яких гранично допустима напруга на вимірювальних входах становить 6 В, за винятком мікросхеми LTC2971, у якій ця напруга становить ± 60 В. Для лінії живлення під напругою вище 6 В або під від'ємною напругою необхідно придумати особливий метод вимірювання падіння напруги на опорі обмотки дроселя або вимірювальному резисторі.

ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗИСТИВНОГО ДІЛЬНИКА НАПРУГИ

У разі напруг живлення, що перевищують гранично допустиму для входів I_{SENSE} , може виникнути ідея застосувати два дільники напруги. Це здається розумною ідеєю до того моменту, поки ви не обчислите похибку, яку дільники вносять у сигнал. До кожного полюса струмовимірювального елемента під'єднано дільник напруги. Вихідний сигнал береться з обох дільників і подається на вимірювальні виводи ІС LTC297x. Якщо відношення опорів резисторів верхнього і нижнього плеча у двох дільників відповідають один одному, то вдається знизити високовольну синфазну складову, без

впливу на корисний сигнал. Напруга лінії живлення знижена настільки, щоб на входах ІС напруга залишалася в допустимих межах, а між виходами дільників створювалася пропорційна струму навантаження напруга, яка може бути виміряна мікросхемою. Однак необхідний допуск резисторів робить цей підхід непрактичним. Ба більше, що сильніше знижується синфазна напруга, то вища похибка. Наприклад, якщо опір тільки одного з резисторів має відхилення 0.1%, результатом стане похибка від постійного зміщення нуля. Внесок похибки коефіцієнта передачі схеми (*Gain Error*) дуже незначний, і домінує похибка зміщення нуля (*Offset Error*).

Припустимо, потрібно виміряти струм на виході джерела з напругою 12 В. Джерело розраховане на струм 2 А, а в колі навантаження встановлено шунт 10 мОм ($R_{\text{вимір}}$). На шунті буде розвиватися сигнал у 20 мВ за номінального навантаження. Відповідним варіантом стане схема з дільниками на 3, а номінальні резисторів верхніх і нижніх плечей обрано рівними 2 і 1 кОм відповідно. Тим самим встановлюється синфазна напруга на виводах I_{SENSE} що дорівнює 4 В. Застосовуючи резистори з відносно низькими опором, домагаються низького внутрішнього опору джерела сигналу, що еквівалентний цій схемі за теоремою Тевеніна (ще відомою, як теорема про еквівалентний генератор напруги) і «видно» входу ІС, для зменшення похибок, викликаних струмами витoku з вимірювальних входів ІС (рис. 1).

Припустимо, що схема працює в режимі холостого ходу, а всі резистори ідеальні. Напруга на середній точці кожного діль-

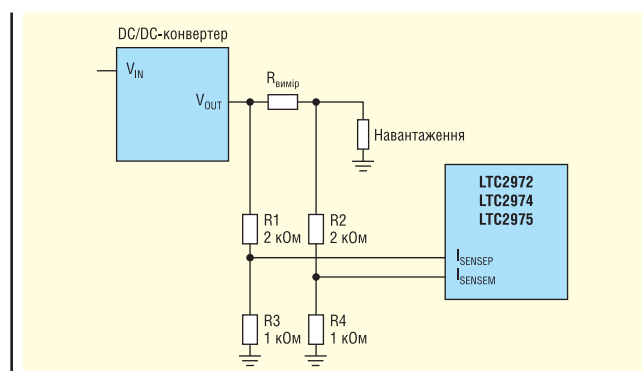


Рис. 1. Резистивний дільник напруги для вимірювання струму вносить велику похибку

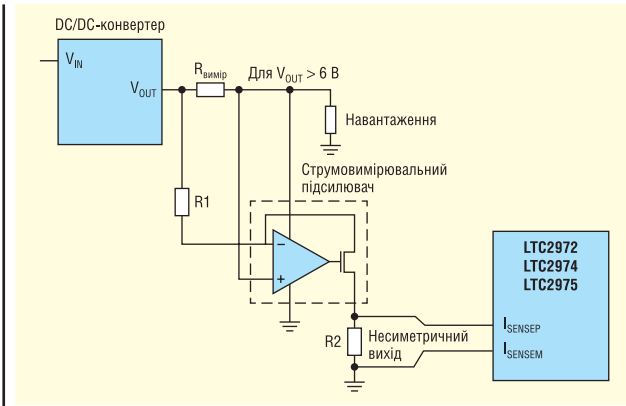


Рис. 2. Струмвимірвальний підсилювач виключає синфазну напругу на шунті

ника буде 4 В, а різниця цих напруг ΔV дорівнює нулю. Отже, значення $READ_IOUT$, що зчитується з ІС, становитиме 0 А. Однак якщо відхилення опору 2 кОм одного з плечей дорівнює +0.1% (тобто фактичний опір 2002 Ом), то ΔV складе 2.665 мВ. Але врахуйте, що повна шкала сигналу, приведена до входу I_{SENSE} , становить $20/3 = 6.667$ мВ. Відлік у 2.665 мВ відповідає струму навантаження 0.4 А. Це 40% від очікуваного значення повної шкали! Як згадувалося раніше, внесена похибка є похибкою зміщення нуля, а не коефіцієнта передачі. Проте це велика похибка. Цей метод отримання сигналу занадто чутливий до допуску резисторів, і ми повинні шукати інше рішення.

СТРУМВИМІРВАЛЬНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ, УВІМКНЕНИЙ МІЖ ДЖ І НАВАНТАЖЕННЯМ

Оскільки гранично допустима напруга на виводах I_{SENSE} для ІС LTC2972/LTC2974/LTC2975 дорівнює 6 В, розв'язати проблему можна застосуванням спеціального струмовимірвального підсилювача, увімкненого між джерелом живлення та навантаженням, щоб унеможливити синфазну напругу. Підсилювачі LT6100/LTC6101 користуються популярністю завдяки фіксованому або такому, що обирається користувачем, коефіцієнту підсилення. Точність набагато вища, ніж у разі застосування резистивних дільників (рис. 2).

Наведемо відповідні рівняння та умови:

$$V_{\text{вих підс}} = I_{\text{нав}} \times R_{\text{вимір}} (R2/R1).$$

Задаємо параметр $IOUT_CAL_GAIN = R_{\text{вимір}} \times (R2/R1)$, тоді допустима напруга $V_{I_{SENSEP}} < \pm 170$ мВ.

ВИМІРЮВАННЯ СИЛИ СТРУМУ У ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЛІНІЯХ ЖИВЛЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ LTC2971

Для високовольтних ліній слід використовувати LTC2971 (2-канална ІС цифрового керування живленням) для вимірювання струму та напруг до 60 В (табл. 1). Є чотири різні типонамінали мікросхеми LTC2971. ІС LTC2971-1 підтримує вимірювання напруги 60 В в одному каналі та -60 В в іншому каналі. ІС LTC2971-2 підтримує вимірювання -60 В в обох каналах, а ІС LTC2971-3 підтримує 60 В в одному каналі та 1.8 В в іншому. Мікросхема LTC2971 підтримує вимірювання напруги 60 В в обох каналах. Пряме під'єднання шунта до виводів $IOUT_SNS$ дає змогу уникнути додаткових струмовимірю-

Таблиця 1. Модифікації LTC2971 — основні відмінності

Модифікація	Вимірювання напруги (канал 1), В	Вимірювання напруги (канал 2), В
LTC2971	0–60	
LTC2971-1	0–60	від -60 до 0
LTC2971-2	від -60 до 0	
LTC2971-3	0–60	0–1.8

вальних підсилювачів, що підвищило б вартість і займалу на платі площу, а також внесло б похибку. Похибка вимірювання струму за допомогою LTC2971 — 0.6% відліку $READ_IOUT$.

ВИМІРЮВАННЯ СТРУМУ ЗА ДОПОМОГОЮ «ЗАЗЕМЛЕНОГО» ШУНТА

У деяких випадках може підійти метод вимірювання струму за допомогою «заземленого» шунта (*Low-Side Sensing*; один із полюсів шунта «заземлений»). Вимірвальний резистор (шунт) можна розмістити між «землею» і полюсом навантаження, а виводи I_{SENSE} під'єднати до полюсів резистора. Завдяки цьому синфазна напруга на виводах I_{SENSE} майже нульова. Метод може бути корисним у тому разі, якщо напруга живлення навантаження вища за 6 В. Це хороше рішення для вимірювання струму практично в будь-яких лініях живлення, в тому числі високовольтних. Вибір опорного шунта $R_{\text{вимір}}$ — компроміс між отриманням досить великого сигналу для хорошої точності та досить малими втратами, коли немає відчутного падіння напруги на шунті, що знижує вихідну напругу (на навантаженні), тобто погіршує стабілізацію. На рисунку 3 показано, як «заземлений» шунт з'єднано з входом I_{SENSE} підключенням Кельвіна. «Підключення Кельвіна» — термін, що застосовується до таких з'єднань з вимірвальним елементом, які не враховують сторонній падіння напруги.

Зверніть увагу, як проходить зворотний шлях струму навантаження через вимірвальний резистор. Багато плат з високою щільністю монтажу мають безліч шарів із заливкою «землі», що дає змогу зворотному струму протікати кількома шляхами. Шунт за такого методу надає можливість спрямувати зворотний струм через нього, завдяки чому виводи I_{SENSE} мікросхеми керування живленням можна з'єднати з шунтом підключенням Кельвіна.

ВИМІРЮВАННЯ СТРУМУ В ВІД'ЄМНІЙ ЛІНІЇ ЖИВЛЕННЯ

Існує кілька способів вимірювання струму на виході джерела живлення з від'ємною напругою. Найпростіше рі-

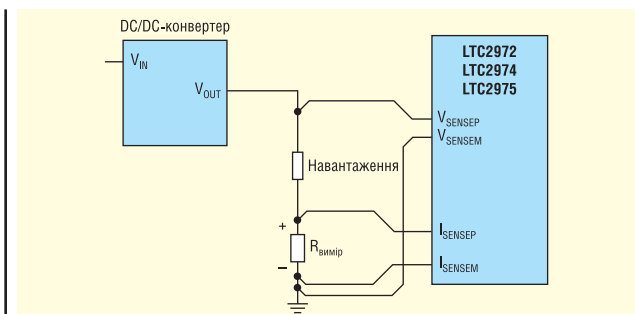


Рис. 3. Метод «заземленого» шунта розв'язує задачу вимірювання струму у високовольтному навантаженні, але має і недоліки

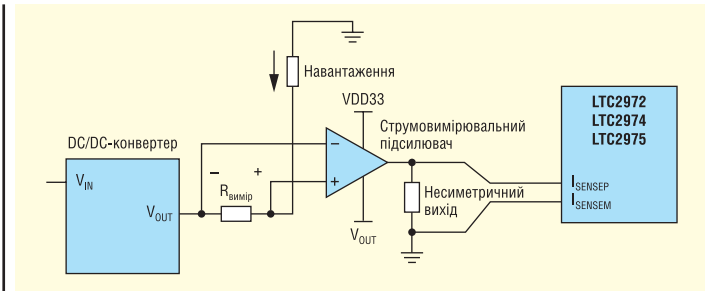


Рис. 4. Вимірювання струму (у від'ємній лінії) за допомогою струмовимірювального підсилювача (LTC6105)

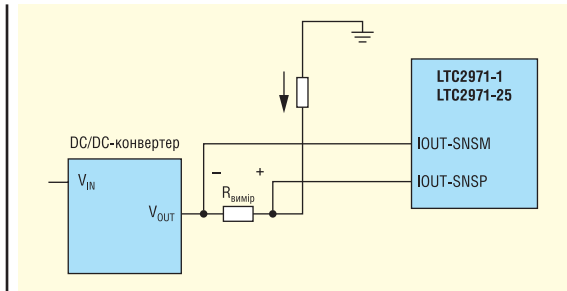


Рис. 5. Вимірювання струму в від'ємній лінії живлення без допоміжних компонентів

шення — застосування спеціального струмовимірювального підсилювача сигналу із «заземленого» шунта, такого як LTC6105. На рисунку 4 показано такий підсилювач, входи якого під'єднано до шунта, а сам він отримує живлення від виходу VDD33 IC і власне від'ємної лінії живлення. Сигнал з несиметричного виходу підсилювача можна подати на будь-який вимірювальний вхід (I_{SENSE} або V_{SENSE}) IC керування живленням.

Якщо струмовимірювальний підсилювач під'єднано до входу I_{SENSE} , то задаємо параметр (мОм):

$$IOUT_CAL_GAIN = R_{\text{вимір}} \times K_{\text{підс}}$$

де $K_{\text{підс}}$ — коефіцієнт підсилення струмовимірювального підсилювача. Наприклад, якщо опір шунта 10 Ом, а коефіцієнт підсилення $K_{\text{підс}} = 10$, то задаємо параметр $IOUT_CAL_GAIN = 100$ мОм.

Використання IC LTC2971-1 або LTC2971-2 є найпростішим рішенням для вимірювання сили струму в від'ємній лінії живлення (рис. 5). Це двоканальні IC керування живленням, а у LTC2971-2 обидва канали від самого початку можуть вимірювати струм у від'ємній лінії живлення тільки в каналі 1 (рис. 6).

Примітка. У IC LTC2971 результат $READ_VOUT$ подано у форматі L16 без знака. Для від'ємних ліній живлення цей результат відображається в графічному інтерфейсі ПЗ зі зворотним знаком.

ПРИКЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ СИЛИ СТРУМУ НАВАНТАЖЕННЯ ЧЕРЕЗ ВИХІД I_{MON}

Струмовий вихід I_{MON} дає змогу обирати опір навісного резистора, який задає коефіцієнт передавання (відношення напруги сигналу I_{MON} до $I_{нов}$) для вимірювання струму навантаження та напруги повної шкали сигналу. IC керування живленням вимірює різницеву напругу між виводами I_{SENSE} і I_{SENSEM} , а через $IOUT_CAL_GAIN$ потрібно задати загальний коефіцієнт передавання (відношення $READ_IOUT$ до $I_{нов}$), що схоже з принципом вимірювання за допомогою шунта.

LDO-стабілізатор LT3081 має вихід I_{MON} , його можна розглянути як приклад (рис. 7). У LT3081 сила струму з виходу I_{MON} — це сила струму навантаження, поділена на 5000. Припустимо, до нього під'єднано навісний резистор 2 кОм. Напруга на виводі I_{MON} , що відповідає 1 А струму навантаження, становить:

$$V_{I_{MON}} = (I_{нов} / 5000) \times 2000 \text{ Ом} = 0.4 \text{ В/А.}$$

Якщо струм навантаження дорівнює 2 А, напруга на виводі I_{MON} становитиме 0.8 В. З цього рівняння ми бачимо, що напругу на виводі I_{MON} можна зробити більш «чутливою» до струму навантаження (тобто підвищити коефіцієнт передачі схеми), просто збільшивши опір навісного резистора. Якщо ми це зробимо, то напруга повної шкали (за номінального навантаження) цілком може перевищувати 1 В. Вхід I_{SENSE} IC керуван-

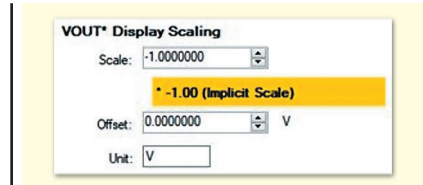


Рис. 6. Вкладка налаштування в LTpowerPlay для 1-го каналу LTC2971-1 і обох каналів LTC2971-2

ня живленням потрібно узгодити з таким великим розмахом сигналу. Для IC LTC2974/LTC2975 цей розмах перевершує допустиму диференціальну вхідну напругу, обмежену ± 170 мВ. На щастя, мікросхеми LTC2971 і LTC2972 мають біт конфігурації $imon_sense$ (рис. 8), який переводить внутрішні кола вимірювання струму IC у режим, що дає змогу вимірювати несиметричну напругу сигналу до 6 В.

Параметри конфігурації потрібно задати відповідно до обраної нами апаратної частини. У цьому прикладі параметр $IOUT_CAL_GAIN$ має дорівнювати 400 мОм (0.4 В/А). Решту параметрів, що стосуються вимірювання струму, можна залишити за замовчу-

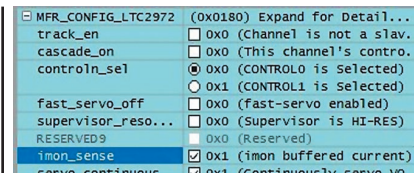


Рис. 8. Біт $imon_sense$ у регістрі MFR_CONFIG

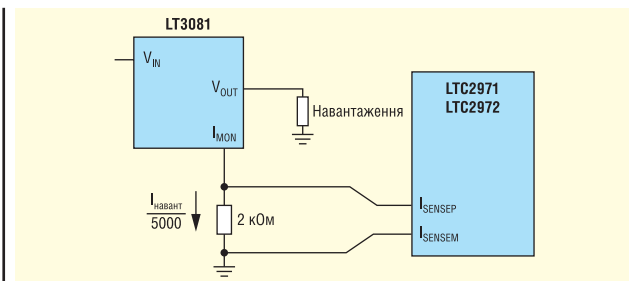


Рис. 7. Використання виходу I_{MON} стабілізатора LT3081

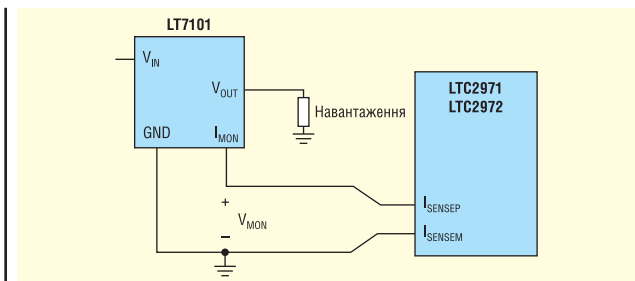


Рис. 9. Використання виходу I_{MON} стабілізатора LT7101

ванням, якщо це не температурний коефіцієнт або теплова постійна часу, які можуть вплинути на значення READ_IOUT. Значення за замовчуванням для MFR_IOUT_CAL_GAIN_TC, MFR_IOUT_CAL_GAIN_TAU_INV і MFR_IOUT_CAL_GAIN_THETA дорівнюють нулю.

Вихід I_{MON} понижувального стабілізатора LT7101 є складом виходу за напругою. На виході також присутня напруга зміщення. Тобто в режимі холостого ходу стабілізатора напруга на виході I_{MON} перебуває на рівні 0.4 В. Спочатку це може здатися проблематичним, оскільки допустима межа диференціальної напруги на вході ІС керування живлення становить ±170 мВ. Однак ІС LTC2972/LTC2971 можуть працювати з виходом I_{MON} такого типу та допускають набагато більший диференційний сигнал між своїми виводами I_{SENSE}. Розглянемо це на реальному прикладі (рис. 9).

Мікросхеми LTC2971/LTC2972 можна під'єднати до LT7101, з'єднавши їхній вивід I_{SENSEP} із виходом I_{MON}, а вивід I_{SENSEM} із «землею». Значення параметрів розраховують таким чином:

- Починаємо з рівняння для значення READ_IOUT:

$$\begin{aligned} \text{READ_IOUT} &= \\ &= \frac{V_{\text{IOUT_SNSP}} - V_{\text{IOUT_SNSM}}}{\text{IOUT_CAL_GAIN} \times T_{\text{CORRECTION}}} + \text{IOUT_CAL_OFFSET}. \end{aligned}$$

- Виразимо з нього параметр IOUT_CAL_GAIN, вважаючи T_{CORRECTION} = 1:

$$\text{IOUT_CAL_GAIN} = \frac{V_{\text{IOUT_SNSP}} - V_{\text{IOUT_SNSM}}}{\text{READ_IOUT} - \text{IOUT_CAL_OFFSET}}.$$

- У технічному описі стабілізатора LT7101, що можна знайти на сайті, виробника, наводяться рівні сигналу I_{MON} для струмів навантаження 1 і 0.25 А, це 1.21 і 0.603 В відповідно. Отже, IOUT_CAL_GAIN становить:

$$\text{IOUT_CAL_GAIN} = (1.21 - 0.603) / (1 - 0.25) = 810 \text{ мОм}.$$

- Значення IOUT_CAL_OFFSET становить:

$$\text{IOUT_CAL_OFFSET} = (0.603 / 0.81) - 0.25 = -0.494 \text{ А}.$$

Параметр IOUT_CAL_OFFSET від'ємний, тому що нам потрібно зменшити результат вимірювання READ_IOUT. Ви можете виявити, що обчислені значення параметрів необхідно змінити для кращої збіжності вимірюваної сили струму навантаження зі значенням READ_IOUT. Звідси впливає необхідність у кроці калібрування. За відомого струму навантаження значення READ_IOUT порівнюється з очікуваним, потім у регістри записується скориговане значення IOUT_CAL_GAIN і/або IOUT_CAL_OFFSET.

Загалом точність сигналу I_{MON} у багатьох стабілізаторів гірша, ніж допуск вимірювальних резисторів, але калібрування самих стабілізаторів значно покращує точність вимірювання.

Далі буде

Література:

1. Пітерс М. Вимірювання сили струму навантаження за допомогою ІС цифрового керування електроживленням по шині PMBus. Частина 1 // CHIP NEWS. 2024. № 8 (223). **CN**

eSUN®

Філаменти для 3D-друку

<https://altwaylab.com/>