

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.316.722

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1.43-54](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.43-54)**О.Ф. Баранюк**, доц., канд. техн. наук*Центральноукраїнський державний університет імені Володимира Винниченка,**м. Кропивницький, Україна**e-mail: baranyuk60@gmail.com***В.М. Каліч**, проф., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: vmk041954@gmail.com*

Розробка цифрового інтерфейсу для керування імпульсним блоком живлення

Викладено результати розробки цифрового інтерфейсу до імпульсних блоків живлення з аналоговим контуром керування. Показано, що регулювання напруги блоку живлення можна здійснити шляхом ін'єкції струму у вихідний вимірювальний подільник напруги. Запропонований метод дозволяє одержати лінійну залежність приросту вихідної напруги від величини додаткового струму. Для цифрового керування блоком живлення може бути використаний набір ключів на польових транзисторах або цифро-аналоговий перетворювач.

імпульсний блок живлення, керування, інтерфейс, зворотний зв'язок, цифровий код

Постановка проблеми. Сучасна людина використовує багато електронних та побутових пристроїв, які потребують електричного живлення. Блоки живлення з фіксованою вихідною напругою використовуються для живлення пристроїв, які потребують чітко визначеної напруги, зокрема, ноутбуків, планшетів, сканерів, роутерів та ін. Вони можуть бути лінійними або імпульсними, хоча останнім часом використовують переважно імпульсні блоки живлення як більш ефективні і менш габаритні. Лабораторні блоки живлення є універсальними приладами, призначеними для розробників електронної апаратури, інженерів і науковців. Вони дозволяють плавно змінювати вихідну напругу в заданому діапазоні, мають ряд додаткових корисних функцій, таких як, вимірювання та індикація напруги, струму, потужності, обмеження струму, захист від перевантажень та коротких замикань. Отже, такі прилади, відповідно, більш складні і значно дорожчі.

Імпульсні блоки живлення (ІБЖ) з аналоговим контуром зворотного зв'язку відомі вже кілька десятиліть, їх теорія, схемотехніка і елементна база добре відпрацьовані. Провідні виробники електронних компонентів пропонують широкий асортимент напівпровідникових приладів, у тому числі спеціалізованих контролерів, а також програмні засоби для проектування блоків живлення. Аналогові системи керування імпульсними блоками живлення це перевірені часом, доступні, надійні і стабільні рішення. Вони добре знайомі інженерам, відносно просто діагностуються і ремонтуються.

Незважаючи на очевидні переваги, аналогове керування джерелом живлення не має деяких корисних можливостей, які могли б запропонувати відповідні цифрові системи. Найважливішим недоліком є те, що вони негнучкі. Внесення будь-яких змін до параметрів вимагає зміни схеми, конструкції або заміни обладнання. Такі блоки живлення найкраще підходять для автономних застосувань, які не вимагають модифікацій, моніторингу та зовнішнього керування.

Імпульсні блоки живлення з аналоговим керуванням погано пристосовані для зміни напруги. Вони або взагалі не мають регулювання вихідної напруги, або допускають незначне підлаштування напруги за допомогою регулювального потенціометра. Будь-який інтерфейс для зовнішнього керування відсутній. Разом з тим, бувають випадки, коли потрібно мати недорогий блок живлення з можливістю керувати його вихідною напругою за заданою програмою. Такі рішення стають привабливими й актуальними у зв'язку з доступністю на ринку численних мікроконтролерів, які можна використовувати для керування різними електронними пристроями, у тому числі для побудови автоматизованих зарядних пристроїв.

Системи під керуванням мікроконтролера можуть контролювати та зберігати технологічні параметри, керувати обладнанням, змінювати налаштування та алгоритми роботи, їх легко модифікувати та перепрограмувати. Джерела живлення з цифровим керуванням мають багатшу функціональність, гнучкість та універсальність. Вони допускають дистанційне керування, довгостроковий моніторинг та сигналізацію, встановлення обмежень на струм та потужність. Звичайно, є й певні труднощі, пов'язані з переходом на цифрові технології. Цифрові системи з програмним забезпеченням значно дорожчі, їх складніше розробляти, тестувати, обслуговувати й ремонтувати.

Існує також компромісний підхід, який поєднує переваги як аналогового, так і цифрового керування. Цей підхід передбачає використання аналогового контролера блоку живлення, доповненого цифровим інтерфейсом. Аналоговий контролер забезпечує надійну і стабільну роботу, тоді як цифровий інтерфейс надає канал зв'язку для моніторингу та керування за допомогою мікроконтролера.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема розробки, аналізу, дослідження, ремонту та модернізації імпульсних джерел живлення присвячено досить багато публікацій вітчизняних і зарубіжних дослідників і практиків. Однією з кращих в галузі електроніки можна, без сумніву, назвати книгу Пола Горовіца та Вінфілда Хілла «Мистецтво електроніки» [1], відому всебічним висвітленням питань електроніки та безліччю прикладів практичних схем. Глава 9 цієї книги повністю присвячена лінійним та імпульсним джерелам живлення.

Відомі потужні виробники електроніки Microchip Technology Inc., Texas Instruments Inc., Analog Devices, Inc., ON Semiconductor періодично випускають довідкові та методичні матеріали для розробників електронних пристроїв (Application Report, Reference Manual), у тому числі так звані Нотатки щодо застосування (Application Notes), в яких детально висвітлюють окремі питання теорії та розробки імпульсних блоків живлення [2–4].

Сучасні імпульсні джерела живлення являють собою досить складні і ретельно розраховані системи стабілізації із зворотними зв'язками. В роботах [2, 5, 6] розглядаються різні методи керування імпульсними перетворювачами постійної напруги, зокрема керування за напругою VMC, керування за струмом CMC, пропорційно-інтегрально-диференціальне керування PID, ковзне керування SM та керування з нечіткою логікою FLC.

Загальні питання побудови ІБЖ зворотного ходу (Flyback), режими неперервного та розривного струму, способи керування на первинній і вторинній стороні викладені в публікаціях [2, 4, 5, 7].

Ряд робіт присвячено питанням теорії та розробки аналогових пристроїв керування ІБЖ. Зокрема роботи [8, 9] розглядають принципи побудови та частотної корекції зворотного зв'язку ІБЖ з гальванічною ізоляцією, побудованих на основі високоточного програмованого джерела опорної напруги TL431 та більш сучасного ATL431LI з низьким споживанням.

В роботі [10] представлено опис лабораторного джерела живлення з регулюванням вихідної напруги в межах 1,3–30 В з дискретністю 0,1 В, що складається з попереднього DC-DC перетворювача на LM2576, регулятора на ОП та мікроконтролера STM32, модуля управління та індикації. В цій схемі контролер реалізує алгоритм роботи і використовується для подачі установки на основний конвертор.

У статті [11] наведена реалізація блоку живлення 0–25 В з цифровим керуванням на основі доступної елементної бази з використанням лінійного стабілізатора напруги LM317 та мікросхеми цифро-аналогового перетворювача MCP4725 з опорною напругою живлення +5 В. Для того, аби основний регулятор LM317 менше грівся, на його вхід подається напруга від імпульсного перетворювача на XL4005, яка завжди вища від вихідної напруги LM317 лише на 2,5 В.

Останнім часом значна кількість публікацій присвячена питанням розробки ІБЖ з цифровими регуляторами, роль яких виконує мікроконтролер, процесор цифрових сигналів або спеціалізований контролер ІБЖ з вбудованим мікроконтролером. З'явився навіть новий термін «цифрова енергія» (Digital Power), який насправді позначає цифрове керування джерелом живлення.

Питання розробки ІБЖ на основі мікроконтролера розглядаються в публікаціях [4, 7, 12, 13] та багатьох інших.

Так, в роботі [4] детально розглядається процес проектування ІБЖ на основі контролера PIC16F1768 як основного ШІМ-регулятора, описано режими керування за напругою і струмом.

Стаття [7] пропонує цифровий контролер для ІБЖ зворотного ходу з м'яким перемиканням ключів з обох сторін трансформатора. Схема забезпечує контроль переходу через нуль за струмом ZCS на первинній стороні і напругою ZVS на вторинній, що дає суттєву економію енергії.

Стаття [12] присвячена розробці цифрового блоку керування на основі продуктивного МК STM32G474RET6 як універсальної основи для потужних джерел живлення зі складними топологіями. В системі використано ПІД-алгоритм керування перетворювачем, фільтрацію із скінченою імпульсною характеристикою в каналі зворотного зв'язку, 16-розрядний таймер для формування ШІМ-сигналу та 12-розрядний АЦП мікроконтролера.

В роботі [13] представлено результати розробки і моделювання понижуючого DC-DC перетворювача на основі МК Arduino, драйвера IR2110 та MOSFET-ключа K2837. Використання МК забезпечує кращу гнучкість у проектуванні системи керування для різних напруг живлення та навантаження, а також низьку вартість і кращу реакцію системи на збурення.

Разом з тим, в [4] наголошується, що далеко не кожний МК доцільно використовувати для керування ІБЖ, тому, що типовий МК з чисто програмним керуванням не завжди встигає своєчасно реагувати на зовнішні події. Значно кращі результати дають МК, що мають незалежну від ядра периферію (Core Independent

Peripheral, CIP), зокрема компаратори, конфігуровані логічні елементи (Configurable Logic Cell, CLC), апаратні таймери (HLT), детектор нульового переходу (ZCD), тощо.

Є також певна кількість публікацій, у яких розглядаються питання програмованого керування існуючими аналоговими ІБЖ.

В роботі [10] представлено опис лабораторного джерела живлення, у якому мікроконтролер STM32 керує режимом основного імпульсного перетворювача напруги. Контролер вимірює напругу на виході і струм споживання та формує опорну напругу для підсилювача сигналу похибки, побудованого на операційному підсилювачі. Сигнал з контролера виводиться через вихід ШІМ та низькочастотний фільтр.

У доповіді про застосування від Texas Instruments [14] як загальний підхід розглядається подача струму у дільник вихідної напруги. Пропонується здійснювати це двома способами: через звичайний АЦП і через струмовий АЦП. З метою формування заданої величини струму [15] пропонує схему програмованого споживача струму на основі ЦАП, операційного підсилювача (ОП), транзистора і резисторного датчика струму.

В [16] описано приклади застосування цифрових потенціометрів, проаналізовано їх особливості та недоліки, показано як можна замінити схеми з цифровими потенціометрами на відповідні схеми з ЦАП сімейства DACx3401, які мають вбудоване джерело опорної напруги та вихідний буферний ОП.

Огляд літератури показує, що наукові публікації та технічні рекомендації виробників електроніки більшою мірою зосереджені на питаннях розробки нерегульованих джерел живлення із заданими параметрами, в той час як питанням керування вихідною напругою приділяється значно менше уваги.

Постановка завдання. Бувають випадки, коли потрібно змінювати вихідну напругу існуючого імпульсного джерела живлення. Завданням дослідження є розробка практичної схеми інтерфейсу для цифрового керування вихідною напругою імпульсного блоку живлення.

Виклад основного матеріалу. Переважна більшість імпульсних джерел живлення призначені для використання з конкретними приладами, мають постійну стабілізовану вихідну напругу і не пристосовані для регулювання вихідної напруги. Деякі з ІБЖ допускають підлаштування вихідної напруги в незначних межах. Досить часто виникає необхідність програмно змінювати вихідну напругу ІБЖ.

Імпульсний блок живлення з аналоговим контролером являє собою замкнену систему автоматичного керування вихідною напругою, в якій зворотний зв'язок організовано шляхом вимірювання вихідної напруги, визначення величини і знаку її відхилення від заданої (похибки) з метою подальшої зміни стану регулюючого силового елемента, роль якого, у більшості випадків, виконує польовий або біполярний транзистор з імпульсним трансформатором.

Розглянемо структурну схему типового імпульсного блоку живлення зворотного ходу (Flyback) ізольованого типу, представлену на рис. 1. На схемі опущено вхідні кола змінного струму, що зазвичай включають ЕМІ-фільтр та випрямляч.

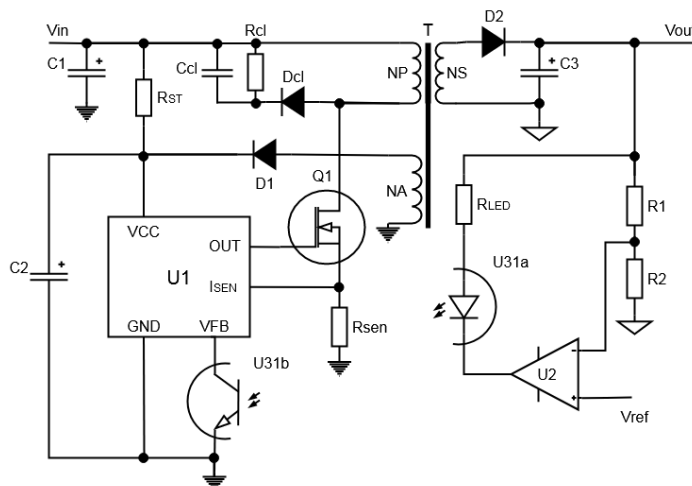


Рисунок 1 – Структурна схема зворотного імппульсного блока живлення

Джерело: розроблено авторами

Випрямлена діодним мостом напруга мережі заряджає високовольтний накопичувальний конденсатор C1. Починаючи з цього конденсатора всі імппульсні блоки живлення можна вважати перетворювачами постійної напруги (DC-DC). Основними елементами ІБЖ є імппульсний трансформатор T, силовий транзистор Q1 та вторинний діодний випрямляч D2. Насправді, ІБЖ зворотного ходу використовує обмотку NP як накопичувальний дросель, але він має також одну або кілька ізолюваних вторинних обмоток, тому його часто називають трансформатором. Усіма процесами перетворювача керує контролер U1. Він має вбудований генератор і схему формування ШІМ-сигналу на виході OUT. Вихідний сигнал контролера періодично відкриває і закриває ключовий транзистор Q1. Коли транзистор відкритий (прямий хід), енергія з конденсатора C1 передається і накопичується в первинній обмотці NP. Коли транзистор закривається, енергія вивільняється, передається у вторинну обмотку NS, напруга вторинної обмотки випрямляється діодом D2 і подається на вихід. Конденсатор C3 згладжує пульсації вихідної напруги.

З метою стабілізації вихідної напруги схема має головний контур зворотного зв'язку, утворений подільником напруги R1–R2, підсилювачем сигналу похибки U2, джерелом опорної напруги (ДОН) Vref, оптронним ізолятором U3, входом зворотного зв'язку VFB основного контролера U1. Оскільки більшість високоточних джерел опорної напруги мають напругу 2,5 В (рідше 1,25 В або іншу), вихідна напруга ІБЖ ділиться подільником напруги R1–R2 до величини, рівної напрузі ДОН. В такому разі робота системи стабілізації напруги зводиться до підтримки напруги в середній точці подільника напруги, рівної напрузі ДОН. Таким чином, головний контур зворотного зв'язку забезпечує керування вихідним сигналом за напругою.

Схема має ще один контур зворотного зв'язку, утворений датчиком струму Rsen, входом Isen, ШІМ-контролером основного контролера U1, транзистором Q1. Це контур керування за струмом ключового транзистора. Він виконує обмежувальні та захисні функції для транзистора Q1. Коли струм транзистора перевищує задану величину, падіння напруги на резисторі Rsen перевищує поріг спрацювання, визначений для Isen, і транзистор Q1 примусово закривається. Цей контур працює в кожному циклі роботи ШІМ-контролера.

Якщо компоненти схеми, крім контуру зворотного зв'язку, представити як перетворювач однієї постійної напруги в іншу DC-DC, то отримаємо узагальнену схему будь-якого блоку живлення із зворотним зв'язком за напругою (рис. 2).

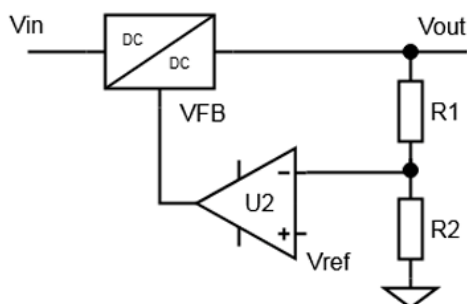


Рисунок 2 – Узагальнена схема блока живлення

Джерело: розроблено авторами

Ця схема є базовою для побудови інтерфейсу керування блоком живлення. Слід відзначити, що у більшості сучасних ІБЖ дуже рідко використовують окреме ДОН і операційний підсилювач. Існують прості, дешеві і надійні схеми на зразок програмованого стабілізатора TL431 [8, 9], що містить вбудоване прецизійне ДОН, операційний підсилювач і транзистор (рис 3, а).

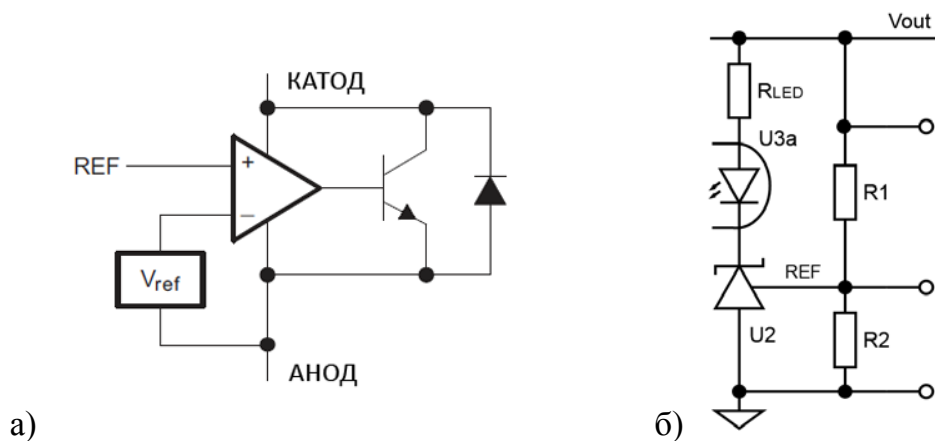


Рисунок 3 – Програмоване ДОН (а) та його застосування в блоці живлення (б)

Джерело: розроблено авторами на підставі [8]

Напруга вбудованого ДОН TL431 дорівнює 2,5 В, отже, схема на рис. 3, б веде себе таким чином, щоб підтримувати на вході REF напругу 2,5 В, оскільки ОП, охоплений від'ємним зворотним зв'язком намагається утримувати між своїми входами напругу, близьку до 0. Основний контур зворотного зв'язку включає оптрон U3, основний контролер ІБЖ U1, транзисторний ключ Q1, трансформатор Т і випрямляч D2 (рис. 1). При зменшенні вихідної напруги блоку живлення TL431 збільшує провідність внутрішнього транзистора і струм, який проходить через світлодіод оптрона. Фототранзистор оптрона U3, підключений до входу зворотного зв'язку VFB основного регулятора ІБЖ, зменшує напругу VFB, у відповідь контролер U1 збільшує робочий цикл ШІМ-контролера і відновлює напругу на виході БЖ.

Оскільки вбудоване ДОН знаходиться всередині мікросхеми і недоступне для регулювання, єдино можливим залишається впливати на схему через вхід REF TL431

або з'єднаний із ним подільник напруги R1–R2. Змінюючи значення резисторів R1, R2 дільника, можна змінювати вихідну напругу всього БЖ. Резистори подільника напруги можна теоретично збільшувати або зменшувати. Практично нас цікавлять методи, що передбачають мінімальне втручання в схему існуючого БЖ. Тому розглянемо лише методи, що використовують зменшення резисторів шляхом паралельного під'єднання іншого резистора. Схемотехнічно простіше підключати резистор на «низькій стороні», тобто паралельно нижньому резистору R2. Розглянемо, до якого ефекту призводить таке підключення.

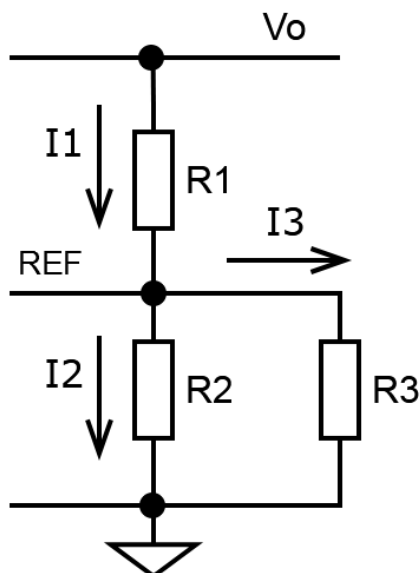


Рисунок 4 – Зміна параметрів подільника напруги

Джерело: розроблено авторами

Визначимо, як впливає на вихідну напругу БЖ додатковий струм I_3 , створений резистором R3. Виходимо з того, що в точці REF за рахунок зворотного зв'язку завжди підтримується напруга V_{ref} , що дорівнює опорній (2,5 В). Розглянемо два випадки.

1) Зовнішній резистор відсутній. $R_3 = \infty$. Знайдемо вихідну напругу U_{out} :

$$U_{out} = U_{ref} + U_1 = U_{ref} + I_1 R_1 = U_{ref} + I_2 R_1. \quad (1)$$

2) Зовнішній резистор R3 підключено паралельно нижньому R2.

$$U'_{out} = U_{ref} + U'_1 = U_{ref} + I'_1 R_1 = (I_2 + I_3) R_1 = U_{ref} + I_2 R_1 + I_3 R_1. \quad (2)$$

Приріст вихідної напруги ΔU_{out} буде становити:

$$\Delta U_{out} = U_{ref} + I_2 R_1 + I_3 R_1 - U_{ref} - I_2 R_1 = I_3 R_1, \text{ де } I_3 = U_{ref} / R_3. \quad (3)$$

Саме в такому вигляді зручно керувати вихідною напругою, отримавши лінійну залежність приросту напруги від додаткового струму через додатковий резистор R3 нижнього плеча подільника (рис. 5).

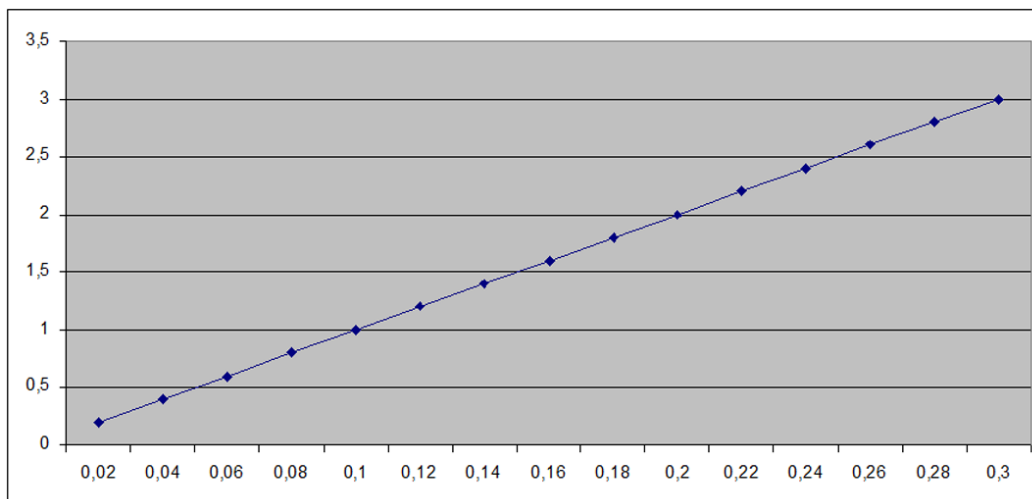


Рисунок 5 – Графік залежності приросту напруги від струму через резистор R3

Джерело: розроблено авторами

Якщо потрібно отримати кілька значень напруги на виході, достатньо підключити кілька резисторів потрібного опору. Для цього можна скористатися ключами на польових транзисторах, подавши на їх затвори сигнали з цифрових виходів МК, як на рис. 6.

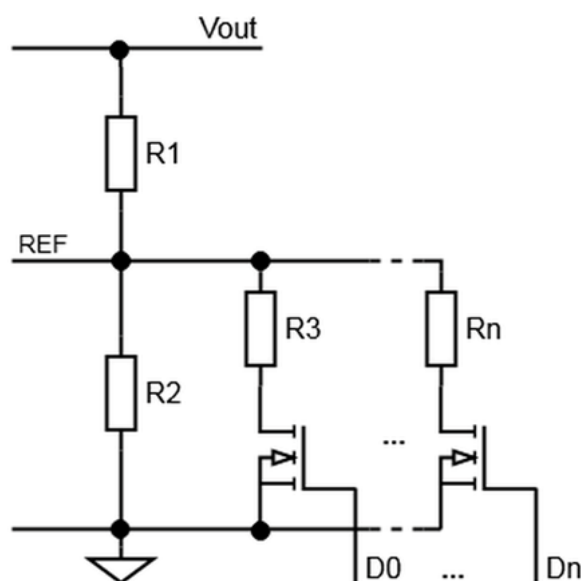


Рисунок 6 – Цифрове керування подільником напруги

Джерело: розроблено авторами

Розглянемо на прикладі ІБЖ R-80-12, як одержати на виході потрібні напруги.

Приклад 1. ІБЖ R-80-12 потужністю 80 Вт і вихідною напругою 12 В має верхній резистор подільника 10 кОм, нижній складається з постійного і регульованого, що в сумі дають значення 2–3 кОм. При значенні $R_2 = 2,63$ кОм маємо на виході 12 В. Якщо нам потрібно одержати напругу 12,6 В, то $R_3 = (U_{ref}/\Delta U_{out}) \cdot R_1 = 41,67$ кОм. Аналогічно, для напруги 13,6 В потрібен $R_3 = 15,625$ кОм, для 14,4 В $R_3 = 10,42$ кОм. Для прикладу взято напруги, які часто зустрічаються в зарядних пристроях.

Приклад 2. Припустимо, що потрібно змінювати напругу ІБЖ в межах 12–15 В з дискретністю 0,1 В. Тоді маємо всього $3/0,1 = 30$ рівнів напруги, а отже 30 значень додаткового струму через R3. У цьому випадку доцільно обрати $\log_2 30 \approx 5$ значень струму, пропорційних вагам розрядів двійкової системи числення. При цьому струм наймолодшого розряду дорівнює 10 мкА, інших 20 мкА, 40 мкА, 80 мкА, 160 мкА. Для цього потрібні резистори опором 250 кОм, 125 кОм, 62,5 кОм, 31,25 кОм, 15,625 кОм, які доведеться підібрати або використати цифровий потенціометр. Максимальний струм I3 дорівнює 310 мкА, що дає максимальний приріст напруги 3,1 В. 5-розрядний двійковий код в діапазоні 00000–11110 дає приріст напруги в межах 0–3 В, тобто на виході можна отримати напругу 12–15 В.

І все ж, для деяких задач наявність кількох десятків рівнів напруги може бути недостатньою. В такому випадку слід використати інший підхід. Додатковий струм в середню точку подільника напруги можна сформувати за допомогою ЦАП. Тоді ЦАП виступає як джерело прецизійної напруги, а додатковий струм визначається різницею Uref БЖ і вихідної напруги ЦАП Udac (рис. 7). При нульовій напрузі на виході ЦАП приріст напруги на виході БЖ, аналогічний попередньому випадку. Якщо напруга Udac = Uref, ЦАП не впливає на роботу БЖ. Перевага використання ЦАП у тому, що можна не тільки збільшувати, а й зменшувати вихідну напругу БЖ. Для цього Udac повинна бути більшою від Uref.

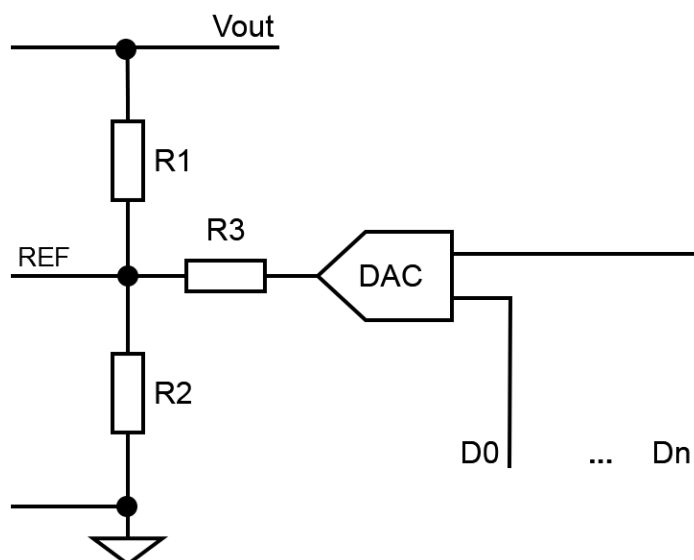


Рисунок 7 – Керування ІБЖ через ЦАП

Джерело: розроблено авторами

Приріст напруги на виході БЖ визначається за формулою (3). Але, на відміну від попередньої схеми, додатковий струм подільника напруги залежить від Udac:

$$I_3 = (U_{ref} - U_{dac}) / R_3. \quad (4)$$

Приклад 3. Нехай потрібно змінювати напругу ІБЖ R-80-12 в межах $12 \pm 2,5$ В з дискретністю 5 мВ. Отже, нам потрібно одержати $5/0,005=1000$ рівнів напруги від ЦАП. Візьмемо 10-розрядний ЦАП з опорною напругою 5 В. Він має 1024 рівні напруги в діапазоні 0–5 В. Візьмемо 1000 рівнів напруги відносно середнього значення 2,5 В, тобто діапазон $2,5 \pm 2,4414$ В. При максимальній різниці $U_{ref} - U_{dac} = 2,4414$ В,

одержимо: $I_3 = 2,5/10 = 0,25$ мА. $R_3 = 2,4414/0,25 = 9,766$ кОм. При цьому цифрові коди на входах ЦАП обираються в діапазоні 12–1011 (двійкові коди 1100–111110011).

Залежність приросту напруги на виході БЖ від напруги ЦАП подано на рис. 8.

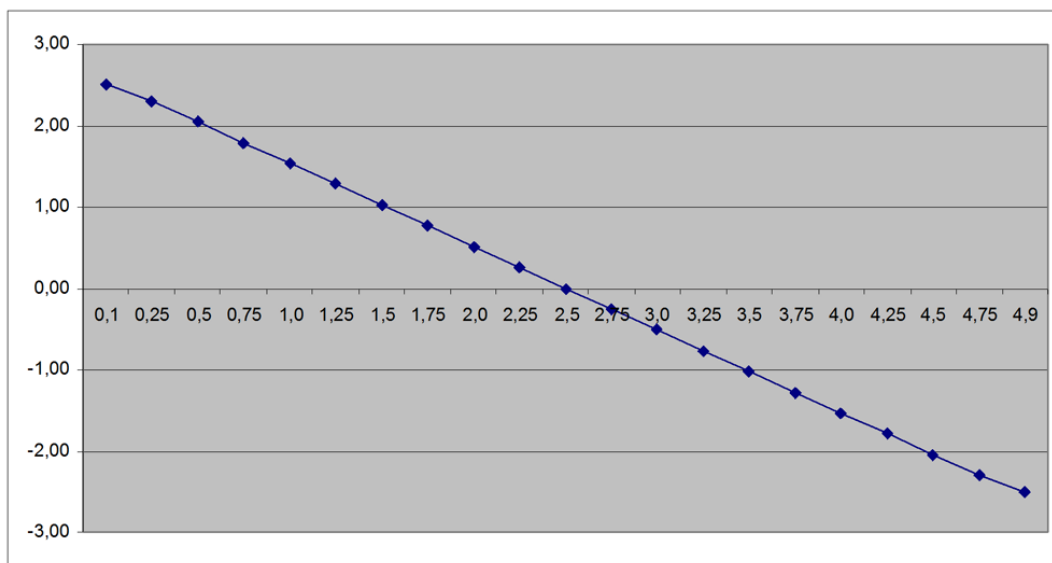


Рисунок 8 – Графік залежності приросту напруги БЖ від напруги ЦАП

Джерело: розроблено авторами

Слід зазначити, що таким чином не можна одержати будь-яку потрібну напругу на виході БЖ. Існують певні обмеження. ШІМ-контролер U1 (рис. 1) живиться від додаткової обмотки NA того самого трансформатора T, що й основний вихід БЖ, тому напруга живлення контролера змінюється одночасно з вихідною напругою БЖ. Мікросхема контролера має обмеження за напругою живлення. Так, контролер UC3842 БЖ R-80-12 вимикається при напрузі $V_{CC\text{OFF}}$, меншій 9 В. Напруга живлення контролера у даного блоку приблизно дорівнює вихідній. Отже, даний блок живлення не може працювати при напрузі на виході меншій, ніж 9 В. З іншого боку, є також верхня межа вихідної напруги, яка, у першу чергу, визначається максимальною допустимою напругою конденсаторів вихідного фільтру. У блоку живлення R-80-12 вихідні конденсатори розраховані всього на 16 В, тому потрібно обережно підходити до регулювання вихідної напруги. Для розширення діапазону регулювання напруги потрібна модифікація схеми блоку живлення, що не завжди видається доцільним.

Висновки. У дослідженні викладено результати розробки цифрового інтерфейсу до імпульсних блоків живлення зворотного ходу з аналоговим контуром керування. Встановлено, що для досягнення задач керування вихідною напругою достатньо здійснити ін'єкцію або відведення струму у вихідному вимірювальному подільнику напруги блоку живлення. Відведення струму призводить до підвищення вихідної напруги, а ін'єкція струму до зниження. Запропонований метод дозволяє одержати лінійну залежність приросту вихідної напруги від величини струму відведення. Показано, що схема цифрового інтерфейсу залежить від кількості дискретних рівнів необхідної вихідної напруги. При невеликій кількості рівнів для керування блоком живлення можуть бути використані ключі на польових транзисторах, що управляються позиційним або двійковим кодом, а при значній кількості рівнів доцільно використати готові цифро-аналогові перетворювачі.

Список літератури

1. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. 3rd ed. New York: Cambridge University Press, 2015. 1220 p.
2. An Introduction to Flyback Converters: Parameters, Topology, and Controllers. Monolithic Power Systems. 2023. 7 p. URL: <https://www.monolithicpower.com/en/an-introduction-to-flyback-converters-parameters-topology-and-controllers>
3. Switch-Mode Power Supply. Reference Manual. Denver : ON Semiconductor, 2014. 72 p.
4. Turcan G. Flyback SMPS Using a Microcontroller as Control Unit. Microchip Technology, 2016. 72 p.
5. Betten J. Flyback converter design considerations. Dallas: Texas Instruments, 2024. 4 p.
6. Verma S., Singh S.K., Rao A.G. Overview of control Techniques for DC-DC converters. *Research Journal of Engineering Sciences*, 2013. Vol. 2, No. 8. P. 18–21.
7. Mahdavihah B., Prodić A. A Digitally Controlled DCM Flyback Converter With a Low-Volume Dual-Mode Soft Switching Circuit. *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition – APEC 2014*. Fort Worth, 2014. P. 63–68. DOI: 10.1109/APEC.2014.6803290.
8. TL431, TL432 Precision Programmable Reference. Dallas: Texas Instruments, 2023. 84 p.
9. Zamora M. Designing with the ATL431LI in Flyback Converters. Dallas : Texas Instruments, 2018. 7 p.
10. Поліщук М.М., Гринюк С.В., Білоус М.В. Лабораторний блок живлення на базі мікроконтролера STM32F103VET6. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2018. Вип. № 30–31. С. 251–256.
11. Юрко О.О., Мосьпан Д.В., Кухаренко Д.В. Блок живлення з програмним керуванням. *Виклики та проблеми сучасної науки : зб. наук. пр.* 2023. Т. 1. С. 294–298. DOI: 10.6084/m9.figshare.22886720.
12. Деркач М.В., Єрьоменко А.Ю. Цифровий блок керування імпульсними джерелами живлення на основі мікроконтролера STM32G474RET6. *Вісник Національного технічного університету "ХПИ"*, 2022. № 1–2 (7–8). С. 65–77. DOI: 10.20998/2411-0558.2022.02.07.
13. Viswanatha V., Reddy R.V.S., Digital Control of Buck Converter Using Arduino Microcontroller for Low Power Applications. *2017 International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon)*, Bengaluru, India, 2017. P. 439–443, DOI: 10.1109/SmartTechCon.2017.8358412.
14. How to Dynamically Adjust Power Module Output Voltage. Application Report SLVA861. Dallas: Texas Instruments, 2016. 5 p.
15. Satterfield G. Programmable low-side current sink circuit. SLAA868. Dallas: Texas Instruments, 2018. 6 p.
16. Replacing Digital Potentiometers with Precision DACs. Dallas: Texas Instruments, 2019. 4 p.

References

1. Horowitz, P. & Hill, W. (2015). The Art of Electronics. (3rd ed.). New York: Cambridge University Press.
2. Monolithic Power Systems. (2023). An Introduction to Flyback Converters: Parameters, Topology, and Controllers. MPS. Retrieved from: <https://www.monolithicpower.com/en/an-introduction-to-flyback-converters-parameters-topology-and-controllers>
3. ON Semiconductor (2014). Switch-Mode Power Supply. Reference Manual. Denver: SCILLC.
4. Turcan G. (2016). Flyback SMPS Using a Microcontroller as Control Unit. AN2122. Chandler: Microchip Technology.
5. Betten, J. (2024). Flyback converter design considerations. Dallas: Texas Instruments.
6. Verma, S., Singh, S.K. & Rao, A.G. (2013). Overview of control Techniques for DC-DC converters. *Research Journal of Engineering Sciences*. 2(8), 18–21.
7. Mahdavihah, B & Prodić, A.A. (2014). Digitally Controlled DCM Flyback Converter With a Low-Volume Dual-Mode Soft Switching Circuit. *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition – APEC 2014*. Fort Worth, 63–68. DOI: 10.1109/APEC.2014.6803290.
8. Texas Instruments (2023). TL431, TL432 Precision Programmable Reference. Dallas: Texas Instruments.
9. Zamora, M. (2018). Designing with the ATL431LI in Flyback Converters. Dallas: Texas Instruments.
10. Polishchuk M.M., Hryniuk S.V., Bilous M.V. (2018). Laboratornyi blok zhyvlennia na bazi mikrokontrolera STM32F103VET6 [Laboratory power supply based on STM32F103VET6 microcontroller]. *Komp'uterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo – Computer-integrated technologies: education, science, production*, 30–31, 251–256 [in Ukrainian].
11. Yurko, O.O., Mos'pan, D.V. & Kukharenko, D.V. (2023). Blok zhyvlennia z prohramnym keruvanniam [Power supply unit with software control]. *Vyklyky ta problemy suchasnoi nauky : zb. nauk. pr. –*

- Challenges and problems of modern science: coll. of science Ave, 1*, 294–298. DOI: 10.6084/m9.figshare.22886720 [in Ukrainian].
12. Derkach, M.V. & Yer'omenko, A.Yu. (2022). Tsyfrovyy blok keruvannia impul'snyy dzherelamy zhyvlennia na osnovi mikrokontrolera STM32G474RET6 [Digital control unit for switching power supplies based on the STM32G474RET6 microcontroller]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KhPI" – Bulletin of the National Technical University "KhPI"*, 1–2 (7–8), 65–77. DOI: 10.20998/2411-0558.2022.02.07 [in Ukrainian].
 13. Viswanatha V., Reddy R.V.S. (2017). Digital Control of Buck Converter Using Arduino Microcontroller for Low Power Applications. *International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon)*. Bengaluru, India. 439–443. DOI: 10.1109/SmartTechCon.2017.8358412.
 14. Texas Instruments (2016). How to Dynamically Adjust Power Module Output Voltage. Application Report SLVA861. Dallas: Texas Instruments.
 15. Satterfield G. (2018). Programmable low-side current sink circuit. SLAA868. Dallas: Texas Instruments.
 16. Texas Instruments (2019). Replacing Digital Potentiometers with Precision DACs. Dallas: TI.

Oleksandr Baraniuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Viktor Kalich, Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitsky, Ukraine

Development of a Digital Control Interface for a Switching Power Supply

Most switching power supplies are not designed to change their output voltage. However, situations arise where a different voltage from the power source is needed. The purpose of this article is to develop a practical interface scheme for digitally controlling the output voltage of a switching power supply with an analog feedback loop.

The article presents the results of the research of isolated flyback switch-mode power supply (SMPS) circuits, determines the method of controlling the output voltage of the SMPS, and proposes a digital interface for controlling the output voltage of the power supply. The emphasis was on using readily available, inexpensive components with minimal modification to the existing design. The study revealed limitations in existing switching power supply designs regarding effective output voltage control. Modifying the internal reference source is often not an available option. Therefore, influencing the feedback circuit emerges as a simple and viable control method. All power supply feedback loops include a voltage divider measuring the output voltage of switching power supply. This research demonstrates that controlling output voltage can be achieved by injecting or draining current within or from output voltage divider of power supply. Draining current increases the output voltage, while injecting decreases it. The additional resistor only requires a single connection point within the existing circuit.

The proposed method provides a linear dependence of the output voltage increase on the value of the injected/drained current. It is shown that the digital interface scheme depends on the number of discrete levels of the required output voltage. For a small number of levels, field-effect transistors controlled by a positional or binary code can be used to control the power supply, and with a significant number of levels, it is advisable to use ready-made digital-to-analog converters.

switching power supply, control, interface, feedback, digital code

Одержано (Received) 24.01.2024

Прорецензовано (Reviewed) 29.02.2024

Прийнято до друку (Approved) 25.03.2024